

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

Институт энергетики и электротехники  
(наименование института полностью)

Кафедра «Электроснабжение и электротехника»  
(наименование кафедры)

13.04.02 Электроэнергетика и электротехника  
(код и наименование направления подготовки)

Общая теория электромеханического преобразования энергии  
(направленность (профиль))

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

на тему «Повышение надежности электромеханического оборудования  
кондитерской фабрики»

Студент

Д.А. Орлов

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный

М.Н. Третьякова

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

руководитель

Руководитель программы к.т.н., профессор В.В. Ермаков

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

(личная подпись)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2018 г.

**Допустить к защите**

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

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

(личная подпись)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2018 г.

Тольятти 2018

## **Аннотация**

В результате анализа аварийных остановок производственного процесса на кондитерской фабрике было выявлено, что наиболее часто причина этих прерываний связана с перерывом в электроснабжении основного электромеханического оборудования и его внутренними неисправностями.

В данной работе обоснована целесообразность установки автоматического ввода резерва в систему электроснабжения кондитерской фабрики и замены нерегулируемого асинхронного привода конвейера винтовой конструкции на частотно регулируемый асинхронный привод конвейера спирально – винтовой конструкции.

В целях повышения надежности электроснабжения оборудования кондитерской фабрики проведен анализ различных видов автоматического ввода резерва (АВР), произведены расчет и выбор силового оборудования для АВР, разработан алгоритм выбора вида АВР и рассчитана величина ущерба от пропадания электроэнергии до внедрения автоматического ввода резерва и после его внедрения.

Для увеличения межремонтного интервала и снижения количества отказов оборудования кондитерской фабрики проработан вариант замены винтового конвейера на спирально-винтовой с преобразователем частоты. Рассмотрены этапы расчета и выбора основных компонентов конвейера: электродвигателя, преобразователя частоты, винтовой спирали.

Основное содержание работы изложено на 75 страницах, содержит 20 рисунков и 3 таблицы.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
1. Анализ решений по повышению надежности работы электромеханического оборудования кондитерской фабрики.....	13
2.Проработка внедрения АВР на трансформаторной подстанции.....	25
2.1Анализ видов АВР.....	26
2.2 Требования, предъявляемые к АВР.....	27
2.3 Расчет параметров АВР.....	28
2.3.1 Выбор напряжения срабатывания для переключения ввода системы электропитания.....	28
2.3.2 Выбор силового оборудования для коммутации токов нагрузки АВР. Расчет рабочего тока АВР.....	29
2.4 Алгоритм выбора вида АВР.....	31
3. Проработка решения повышения надежности работы шнекового конвейера подачи муки.....	34
3.1Сравнительный анализ электроприводов винтовых конвейеров.....	34
3.2 Расчёт мощности двигателя конвейера.....	40
3.3 Расчёт и выбор элементов силового канала электропривода.....	45
3.4 Выбор конструкции винтового конвейера.....	47
3.5 Расчёт характеристик спирально – винтового конвейера.....	51
4. Оценка эффективности технических решений.....	68
Заключение.....	70
Список используемых источников .....	71

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время не найдется отрасли человеческой деятельности, где бы не применялось электричество. И хотя в нашей стране производится достаточно электроэнергии, однако проблема бесперебойного электроснабжения остаётся актуальной.

Согласно п/п 1.2.18 Правил устройства электроустановок [1] по надежности электроснабжения все потребители электрической энергии (электроприемники) делятся на три категории:

**I категория** – «электроприемники, перерыв электроснабжения которых может повлечь за собой опасность для жизни людей, угрозу для безопасности государства, значительный материальный ущерб, расстройство сложного технологического процесса, нарушение функционирования особо важных элементов коммунального хозяйства, объектов связи и телевидения.

Из состава электроприемников первой категории выделяется особая группа электроприемников, бесперебойная работа которых необходима для безаварийного останова производства с целью предотвращения угрозы жизни людей, взрывов и пожаров» [1, с. 21].

**II категория** – «электроприемники, перерыв электроснабжения которых приводит к массовому недоотпуску продукции, массовым простоям рабочих, механизмов и промышленного транспорта, нарушению нормальной деятельности значительного количества городских и сельских жителей» [1, с. 21].

**III категория** – «все остальные электроприемники, не подпадающие под определения первой и второй категорий». [1, с. 21].

Кондитерская фабрика «Услада» относится ко II категории потребителей электроэнергии, перебои в сети её электроснабжения могут привести к аварийным и пожароопасным ситуациям.

Кондитерская фабрика является предприятием с непрерывным технологическим процессом. В технологическом процессе выпечки вафель,

вафельных рулетов и печений используются 7 газовых печей в комплексе с конвейерным и холодильным оборудованием. Даже кратковременное прекращение подачи электропитания указанного оборудования ведет к остановке технологического процесса, необходимости изъятия из печей бракованной продукции, повторному розжигу печей и выводу их на требуемые технологические параметры. Это приводит к существенным материальным издержкам, которые включают потерю сырья, штрафы за нарушение поставок, перерасход энергоносителей (газа), простои оборудования, и недоотпуск продукции. Анализ работы данного предприятия показывает, что подобные остановки основного технологического оборудования случаются с частотой до 5÷8 раз в год. За счет этих перерывов прямые убытки предприятия составляют до 50 тысяч рублей в год, что сказывается на себестоимости выпускаемой продукции. Цена кондитерских изделий формируется с учетом понесенных убытков.

Стоит отметить, что оборудование кондитерской фабрики, задействованное в основном технологическом процессе, имеет следующую особенность. В ходе производства кондитерской продукции в едином цикле задействованы печи, работающие на природном газе и конвейерные линии, приводимые в движение асинхронными электроприводами. Регулировка скорости вращения электропривода, требуемая для обеспечения заданных показателей технологического процесса, осуществляется с помощью электромеханических вариаторов, мотор-редукторов. Электроснабжение электропривода конвейера и другого технологического и специального оборудования осуществляется от РУ-6/0,4кВ и силовых трансформаторов, расположенных на открытой площадке, принадлежащей фабрике. Подача электроэнергии на фабрику осуществляется по двум воздушным кабельным линиям, называемым фидерами Ф32 и Ф58.

По кабельным линиям электричество поступает на трансформаторную подстанцию ТП-26 с трансформатором типа ТМГ-400 6/0,4кВ мощностью

400кВА и комплектную трансформаторную подстанцию КТП-26а с трансформатором типа ТМ-400 6/0,4кВ мощностью 400кВА.

Схема электроснабжения фабрики представлена на рисунке 1.

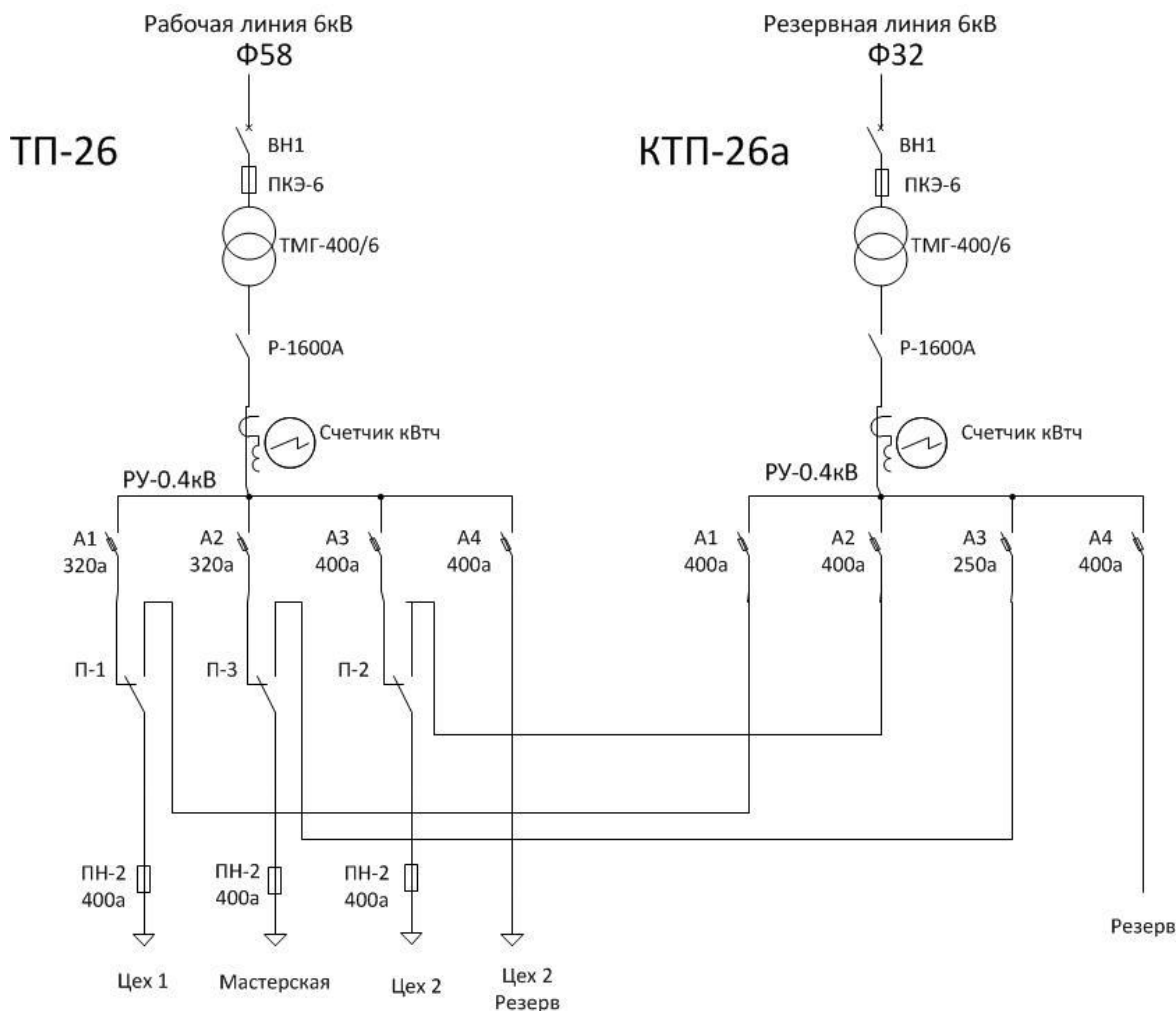


Рисунок 1 – Линейная схема электроснабжения кондитерской фабрики «Улада»

В нормальном режиме все оборудование кондитерской фабрики питается от рабочей линии Ф58, а резервная линия Ф32 не используется (находится в резерве). При пропадании напряжения на рабочей линии дежурный электрик убеждается с помощью исправного прибора в отсутствии напряжения на вводе в цех, затем берет в мастерской ключи от подстанции ТП-26 и после проверки производит переключение рубильниками П1÷П3 [30]. На все передвижения и

переключения дежурного электрика затрачивается 10÷15мин. После восстановления подачи электроэнергии по резервной линии производится перезапуск всего технологического оборудования, разгрузка печей от бракованной продукции, приготовление нового сырья согласно рецептуре.

Процесс запуска в работу технологического оборудования длится  $5 \div 25$  мин. Поэтому суммарные потери времени при внезапной аварии, связанной с пропаданием питающего напряжения составляют 15÷40мин.

Анализ аварийных остановок производственного процесса показывает, что наиболее часто причина этих прерываний связана с перерывом в электроснабжении основного электромеханического оборудования и его внутренними неисправностями.

Значительные экономические потери на кондитерской фабрике ООО «Услава» связаны с неэффективным использованием громоздких винтовых конвейеров (шнеков), что приводит к увеличению затрат на производстве. Кроме того, они требуют постоянного технического обслуживания и санитарной обработки.

На рисунке 2 представлен горизонтальный винтовой конвейер подачи муки.

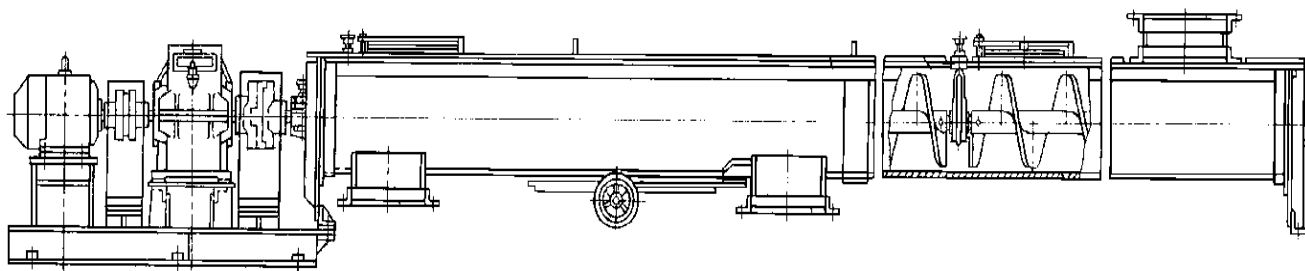


Рисунок 2 – Винтовой конвейер

Поэтому, руководствуясь разработками ведущих фирм и специалистов в области транспортирования сыпучих материалов, проводится работа по внедрению новых, наиболее экономичных и соответствующих международным стандартам качества (ISO) видов оборудования. Одной из таких новинок

является так называемый спирально - винтовой конвейер, который всё шире используется в пищевой промышленности стран Европы [30].

«Он предназначен для транспортировки сахара, муки и прочих сыпучих продуктов на расстояние до 12 метров в длину и до 10 метров в высоту. Использование спирально-винтового конвейера предоставляет следующие преимущества:

- простота конструкции, которая позволяет легко производить монтаж и обслуживание транспортной системы;
- возможность прокладки трассы в любом направлении и под разным углом;
- герметичность трассы позволяет исключить потери продукта и его загрязнение;
- малое энергопотребление;
- бесшумность в работе;
- конкурентно низкая стоимость» [30].

Конструкция шнека спирально - винтового конвейера очень проста. Шнек состоит из трубы с продетой в нее бесстержневой спиралью в соответствии с рисунком 3.





Рисунок 3 – Шнек спирально-винтового конвейера

С одной стороны спираль соединена с валом мотора-редуктора, с другой стороны закреплена в подшипниковом узле. В конструкции спирально-винтового конвейера отсутствуют подшипники, цепи шестеренки, привода,. «Диаметр условного прохода остается неизменным по всей длине, что исключает возникновение зон прессования продукта. Максимальный объем продукта в трубопроводе почти на 70 % больше, чем у аналогичного винтового конвейера, что достигается из-за отсутствия внутреннего вала» [30].

Главное преимущество транспортеров с гибкой спиралью заключается в возможности подавать продукт по наклонам и изгибам.

Спиральный транспортер позволяет монтировать изгибы трассы вплоть до 360 градусов и свободно поднимать продукт на высоту до 10 метров. Использование нескольких приводов позволяет транспортировать продукт на расстояние более 100 м и высоту до 50 м. На рисунке 4 показана схема трассы подачи муки в наклонной трубе на высоту 10метров.

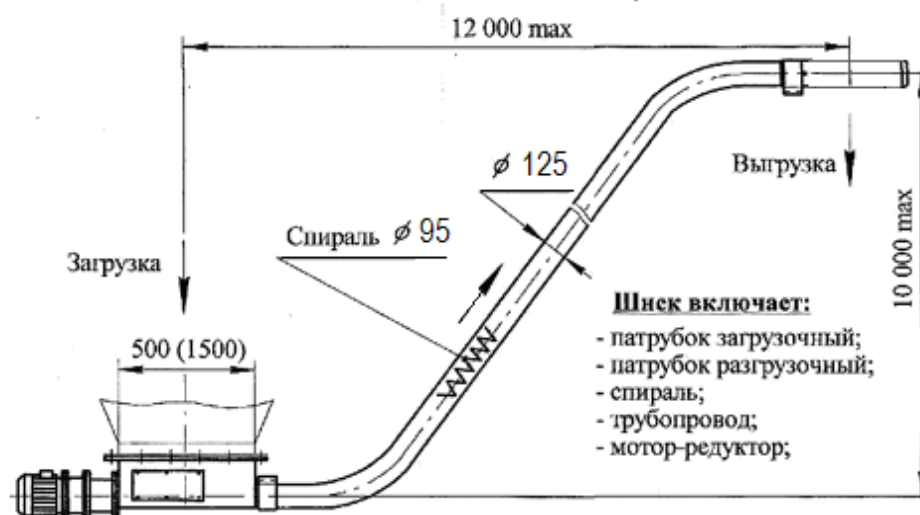


Рисунок 4 – Схема трассы подачи муки

Благодаря применению в транспортёре гибкой спирали предоставляется возможность более компактного размещения технологического оборудования.

Неоспоримым преимуществом спирального транспортёра является его герметичность. Это позволяет устранить потери продукта вдоль всей трассы, загрязнение рядом расположенного оборудования и исключить попадание в транспортируемый продукт посторонних предметов и примесей.

К преимуществам рассматриваемого конвейера также можно отнести возможность его работы сразу с несколькими стационарными емкостями, длительный срок службы и безопасность эксплуатации.

Спиральный конвейер позволяет производить бережную транспортировку продукта.

Немаловажным свойством спирального конвейера является его бесшумность. Она достигается посредством правильного натяжения гибкого несущего элемента. Спираль центрируется продуктом и не касается стенок трубопровода.

Спиральный транспортер позволяет реализовать точное дозирование продукта. Это обеспечивается путем оснащения технологического оборудования весовыми комплексами и автоматической системой управления.

«Спирально-винтовые транспортеры напоминают винтовые транспортеры, однако упругая спираль, в отличие от шнека, не имеет центрального вала, и следовательно, исключены застойные зоны» [30].

Для обеспечения возможности регулировки скорости спирально-винтовые транспортеры снабжают преобразователем частоты (ПЧ). Он надежно защищает электродвигатель от перегрузки по току при заклинивании механических частей транспортера, а также от чрезмерных механических нагрузок на саму спираль, ведущих к ее поломке.

Однако, некоторые потребители, стараясь сэкономить, отказываются от применения частотных преобразователей, ограничиваясь применением устройств защитного отключения трёхфазного электродвигателя. Данное решение не позволяет в полной мере обеспечить надежную защиту электропривода от выхода из строя. В результате повышается вероятность появления поломок: либо горит электродвигатель, либо закручивается и ломается спираль, либо протирается трубопровод. В настоящее время до 80 % заказчиков понимают необходимость установки частотного преобразователя, что приводит к повышению безотказной работы промышленного оборудования. Частотный преобразователь убережет спираль от поломки во время запуска и останова. Стандартные обороты мотора-редуктора на шнековом конвейере: 380÷400 об/мин. Одномоментное достижение этой скорости при наличии в транспортере продукта приводит к очень большим динамическим нагрузкам на спираль. Преобразователь частоты позволит плавно развивать обороты, при этом нагрузка успеет распределиться вдоль всей спирали. Кроме того, ПЧ защитит двигатель от перегрузок по току и по напряжению. Поэтому в модернизируемом устройстве транспортировки муки целесообразно использовать регулируемый электропривод с преобразователем частоты.

Исходя из выше изложенного тема «Повышение надежности электромеханического оборудования кондитерской фабрики» является актуальной.

Цель работы – уменьшить убытки кондитерской фабрики ООО “Услада”, связанные с прерыванием основного технологического процесса за счет внедрения автоматического ввода резерва на трансформаторной подстанции и замены нерегулируемого асинхронного электропривода на регулируемый.

Предполагается, что автоматический ввод резерва сократит время переключения с основной линии электроснабжения на резервную. Это позволит исключить перезапуск в работу всего технологического оборудования и уменьшить вероятность поломки электромеханического оборудования от внезапного пропадания электроэнергии.

Замена нерегулируемого асинхронного электропривода на регулируемый также позволит избежать повышенных нагрузок на электродвигателе и механических частях привода во время пуска и останова, что позволит увеличить их срок службы.

Данные мероприятия увеличат срок безаварийной эксплуатации электромеханического оборудования и позволят повысить надежность его работы.

## **1 Анализ решений по повышению надежности работы электромеханического оборудования кондитерской фабрики**

Проблема обеспечения надежности электроснабжения электромеханического оборудования является интернациональной, что подтверждается многочисленными публикациями [3, 6, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 19, 20, 21, 22, 23, 26, 27].

Согласно ГОСТ 27.002- 2015, ГОСТ 27.310- 95, ГОСТ 27.301-95[10, 11, 12] под надежностью техники подразумевают, «свойство объекта сохранять во времени способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования» [10, с. 2].

Надежность включает в себя целый набор базовых параметров: безотказность, ремонтпригодность, долговечность, восстанавливаемость, сохраняемость, готовность.

«Безотказность – свойство объекта непрерывно сохранять способность выполнять требуемые функции в течение некоторого времени или наработки в заданных режимах и условиях применения» [10, с. 2]

«Ремонтпригодность – свойство объекта, заключающееся в его приспособленности к поддержанию и восстановлению состояния, в котором объект способен выполнять требуемые функции, путем технического обслуживания и ремонта» [10, с. 2]

«Долговечность – свойство объекта, заключающееся в его способности выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях использования технического обслуживания и ремонта до достижения предельного состояния» [10, с. 2]

«Восстанавливаемость – свойство объекта, заключающееся в его способности восстанавливаться после отказа без ремонта» [10, с. 2]

«Сохраняемость – свойство объекта сохранять способность к выполнению требуемых функций после хранения и (или) транспортирования при заданных сроках и условиях хранения и (или) транспортирования» [10, с. 3]

«Готовность – свойство объекта, заключающееся в его способности находиться в состоянии, в котором он может выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания и ремонта в предположении, что все необходимые внешние ресурсы обеспечены» [10, с. 3]

Существуют множество методов определения надежности системы электроснабжения. Для обеспечения требуемой надежности необходимо проанализировать причины, которые приводят к отказам оборудования. Причины отказов можно разделить на две группы [21]:

- 1) неисправности и повреждения элементов, входящих в энергетическую систему снабжения электроэнергией;
- 2) неквалифицированные действия обслуживающего персонала (ошибки при ремонте элементов системы или переключениях).

Надежность, определяемая классом причин 1, называется аппаратной, а классом 2 – эксплуатационной.

Аппаратная надежность имеет свои особенности при эксплуатации оборудования и проходит 3 стадии развития, обозначенные на рисунке 1.1.

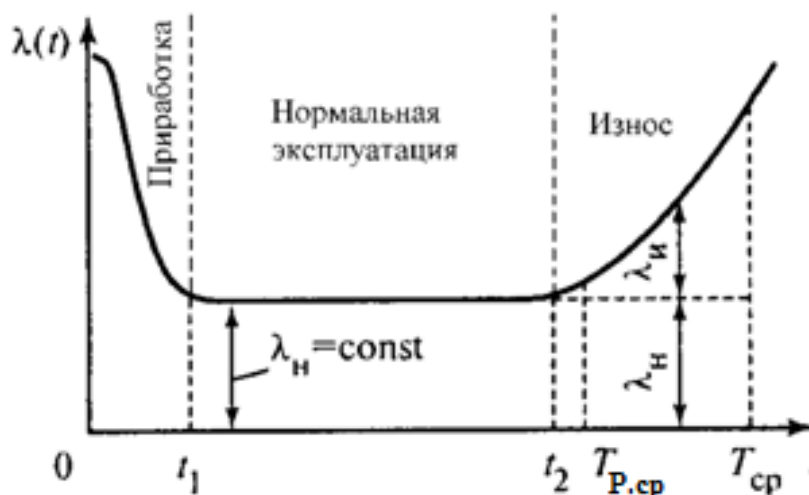


Рисунок 1.1 – «Кривая жизни» оборудования

На рисунке 1.1 представлен график интенсивности отказов оборудования  $\lambda(t)$ , которая представляет собой условную плотность вероятности возникновения отказа за рассматриваемый момент времени. Интенсивность отказа определяется по формуле [21]:

$$\lambda(t) = \frac{1}{P(t)} \frac{dQ(t)}{dt} = \frac{n(t)}{N_0 - n(t)}, \quad (1.1)$$

где  $P(t)$  – вероятность безотказной работы оборудования в заданном интервале времени. Она определяется по формуле:

$$P(t) = \frac{N_0 - n(t)}{N_0}, \quad (1.2)$$

где  $N_0$  – начальное количество исследуемых объектов;

$n(t)$  – число объектов, отказавших за время  $t$

$Q(t)$  – вероятность отказа, которая указывает на то, что в интервале времени  $t$  произойдет хотя бы один отказ:

$$Q(t) = \frac{n(t)}{N_0} \quad (1.3)$$

На периоде времени  $t_0 - t_1$ , называемом временем приработки повышенное число отказов оборудования обусловлено конструкторскими и технологическими недоработками, а также ошибками персонала при монтаже оборудования и его эксплуатации. В этот период из-за указанных ошибок наблюдается скачок частоты отказов.

На периоде времени  $t_1 - t_2$  интенсивность отказов приблизительно постоянна и обусловлена только непредвиденными восстанавливаемыми отказами. Данный период времени является нормальной эксплуатацией оборудования. В это время количество отказов минимально и они носят внезапный, быстро проявляющийся характер. Чаще всего эти отказы связаны с чрезвычайными внешними обстоятельствами.

На периоде времени, большем  $t_2$  интенсивность отказов начинает увеличиваться, что связано со старением и износом оборудования. В данном периоде времени, называемом старением, наблюдается постепенное увеличение отказов оборудования под воздействием постоянно действующих внешних

факторов. Отказы в этот период становятся чаще, а их возникновение проявляется внезапно и не поддается прогнозированию.

По данным наблюдения за работой электрооборудования ООО «Услава» за 2017г. произошло 5 случаев пропадания электроэнергии, 2 из которых были по 20мин, один 15мин, один 30мин, один 1час, а также отказ в работе силового трансформатора 30 мин. Данные по отказам занесены в таблицу 1.1.

Таблица 1.1

Статистика отказов электроснабжения за 2017г.

Номер отказа	Причина отказа	Время отказа, час	Примечание
1	Перерыв подачи электроэнергии	0,33	
2	Перерыв подачи электроэнергии	0,33	
3	Перерыв подачи электроэнергии	0,25	
4	Перерыв подачи электроэнергии	0,5	
5	Перерыв подачи электроэнергии	1	Авария на снабжающей станции
6	Авария на силовом трансформаторе	0,5	
Итог		2,91	

Исходя из годового рабочего фонда оборудования трансформаторной подстанции интенсивность отказов электроснабжающих сетей за 2017г согласно формуле (1.1) составила:

$$\lambda 1(t) = \frac{(0,33+0,33+0,25+0,5+1)}{8760} = 2,75 \cdot 10^{-4}$$



где 2,41 часов – продолжительность отказов электроснабжающих сетей;

8760 часов – фонд рабочего времени в 2017г. при круглосуточной работе оборудования.

Интенсивность отказов оборудования трансформаторной подстанции:

$$\lambda_2(t) = \frac{0,5}{8760} = 5,7 \cdot 10^{-5}$$

Причины отказов эксплуатационной надежности подразделяются на две группы. В первую входят причины, вызываемые низкой квалификацией ремонтного, обслуживающего и эксплуатирующего персонала или недостаточностью их опыта. Вторую группу составляют причины, обусловленные технической сложностью устройств и схем оборудования, с которым работает обслуживающий и ремонтный персонал. В качестве примера можно рассмотреть наличие на силовой питающей трансформаторной подстанции большого количества выключателей, разъединителей и другой коммутационной аппаратуры, которые повышают риск осуществления неправильных переключений. При этом возможные последствия приведут к коротким замыканиям на оборудовании или отключениям ответственных технологических комплексов.

В общем случае, независимо от того, по какой причине произошел отказ, событие, которое его повлекло, происходит случайным образом.

Для обеспечения необходимой степени надежности оборудования в современное время используют следующие средства [21]:

- резервирование;
- техническое обслуживание;
- ремонт;
- управление процессами, происходящими в системе.

Резервирование обеспечивает повышение надежности за счёт избыточно вводимых элементов. Существуют несколько видов резервирования: структурное, функциональное, временное и информационное.

Структурное резервирование заключается во внедрении избыточных элементов, которые в нормальном случае не используются для обеспечения требуемых функций. Например, установка на подстанции резервного силового трансформатора при наличии основного рабочего трансформатора или прокладка второго силового кабеля при имеющемся рабочем кабеле.

Функциональное резервирование позволяет использовать дополнительные возможности элементов системы, повышая надежность оборудования за счет перераспределения функций при отказах. Например, при отказах в электроснабжающей линии, для обеспечения бесперебойной подачи электропитания, возможно задействование дизельных генераторов, выполняющих функцию источников электроэнергии.

Временное резервирование заключается в использовании избыточного времени. Это означает, что системе в процессе работы возможно потратить дополнительное время для выполнения требуемого задания либо за счет резерва времени, за которое она имеет возможность выполнить задание, либо за счет резерва мощности при уменьшении времени выполнения задачи. В качестве примера можно рассмотреть две независимые энергосистемы: в одной имеются неиспользуемые в течение какого-либо времени генераторы, которые возможно задействовать для электроснабжения другой системы, в которой испытывается дефицит электроэнергии.

Информационное резервирование заключается в использовании избыточной информации. В качестве примера можно привести систему объединённых серверов, между которыми возможно перераспределение хранящейся информации.

Техническое обслуживание (ТО) оборудования заключается в организации мер и проведении комплексных работ для поддержания работоспособности оборудования. ТО включает в себя несколько направлений для обеспечения надежности работы оборудования:

- обеспечение оптимальных режимов работы оборудования;

- соблюдение благоприятных условий содержания;
- внедрение системы профилактического осмотра оборудования согласно разработанного графика;
- проведение диагностики состояния оборудования.

Ремонт позволяет обеспечить надежность оборудования за счет проведения комплекса работ по восстановлению его работоспособности. Существует два вида ремонта оборудования: аварийный и предупредительный.

Аварийный ремонт невозможно спрогнозировать и он служит для экстренного восстановления работоспособности оборудования после наступления аварии. Аварийный ремонт требует проведения неотложных мер и, как правило, ведет к повышенным затратам на устранение причин аварии.

Предупредительный ремонт является планируемым ремонтом и в свою очередь подразделяется на текущий и капитальный.

Текущий ремонт проводится согласно разработанного инженерно-техническими работниками графика для обеспечения работоспособности оборудования или восстановления его технологических параметров при выявленных дефектах отдельных элементов. При текущем ремонте оборудования выполняется чистка, герметизация, замена уплотнений, ремонт или замена быстроизнашивающихся неисправных элементов без разборки основной конструкции оборудования, регулировка и настройка входящих в состав оборудования блоков, узлов и механизмов, а также послеремонтные испытания. Текущий ремонт производится на месте дислокации оборудования посредством его остановки и отключением от энергоносителей силами оперативного, оперативно-ремонтного или электротехнологического персонала, обслуживающего данное оборудование. Как правило, продолжительность текущего ремонта оборудования не превышает продолжительность одной рабочей смены.

Капитальный ремонт проводится для восстановления исправности и полного восстановления ресурса оборудования с заменой или восстановлением

любых его частей, в том числе и базовых. При капитальном ремонте производится полная разборка всех узлов и механизмов, необходимые измерения параметров, устранение выявленных дефектов, восстановление работоспособности оборудования с обеспечением всех номинальных характеристик, указанных в паспорте оборудования. Важным этапом после восстановления характеристик оборудования является его регулировка и послеремонтные испытания. Во время выполнения капитального ремонта возможно проведение модернизации электрооборудования с учётом достижений науки и техники и передового опыта эксплуатации. Как правило, продолжительность капитального ремонта составляет от нескольких недель до двух месяцев.

Целенаправленное управление процессами, протекающими в системе, обеспечивает надежность с помощью создания соответствующей системы управления.

Примерами данной системы управления процессами является разработанный в США «Цикл Шухарта-Деминга» или PDSA, который расшифровывается как «Plan, Do, Study, Act» (планируй, делай, проверяй, действуй) [24]. Диаграмма «Цикла Шухарта-Деминга» представлена на рисунке 1.2.



Рисунок 1.2 Цикл Шухарта-Деминга

Основная идея цикла Шухарта-Деминга состоит в том, что если процесс деятельности будет качественно организован, то в результате будет гарантированно производиться качественная продукция.

Цикл Шухарта-Деминга проходит следующие этапы:

Планируй – руководитель, в управлении которого находится процесс, планирует пути его осуществления;

Делай – подчиненные руководителя (исполнители) выполняют работы в строгом соответствии с процессом, который был разработан руководителем;

Проверяй – исполнителями собирается полная информация о результатах процесса, руководитель проводит анализ, определяет наличие отклонений, стабилен или нет процесс, вносит корректирующие действия;

Действуй – руководитель предпринимает управленческие решения по улучшению процесса.

Затем цикл повторяется на новом уровне, руководитель вносит корректировки в планирование процесса и исполнители выполняют работу по доработанному процессу. Снова собираются данные, руководитель анализирует результаты процесса и выясняет, привели ли проведенные управленческие решения к улучшению процесса и продолжает находить варианты улучшения процесса. Данный цикл также называют циклом непрерывных улучшений.

Управление процессами на основе цикла Шухарта- Деминга легли в основу стандартов ИСО 9000.

Одним из основных вопросов экономического обоснования наилучшего показателя надежности электроснабжения предприятия является объективная оценка количественного значения экономических потерь (ущерба). Внезапное пропадание электроэнергии в системе электроснабжения предприятия ведет к следующим негативным последствиям:

1. повреждение основного оборудования, порча, поломка инструмента
2. нарушение технологического процесса
3. выпуск брака, порча сырья и готовой продукции

4. простой оборудования и не загруженность рабочего персонала во время перерыва в электроснабжении
5. недовыпуск или несвоевременная выработка продукции
6. дополнительные экономические расходы, связанные с изменением режима работы предприятия из-за необходимости организации дополнительных рабочих смен для производства продукции
7. непроизводительные затраты различных видов энергии (газа, сжатого воздуха и т.п.)
8. снижение прибыли из-за уменьшения производства продукции
9. наложение штрафов крупными клиентами за срыв сроков поставки продукции

Для расчета ущерба от аварийного пропадания электроэнергии воспользуемся формулой [20]:

$$Y_{ав} = Y_{вн} + Z_{зп}, \quad (1.4)$$

где  $Y_{ав}$  – ущерб от аварийного пропадания электроэнергии

$Y_{вн}$  – ущерб от внезапности нарушения электроснабжения, приводящий к повреждению оборудования, инструмента, выпуску брака, потере сырья и т.п.

$Z_{зп}$  – затраты за простой производственного персонала, зависящий от величины ограничения нагрузки и его длительности, количества простаивающих работников, их квалификации

«Ущерб от внезапности нарушения электроснабжения предприятия зависит от количества аварий в течение года  $\lambda_{ав}$ , их длительности  $\tau_{ав}$  и глубины нарушения электроснабжения, характеризующейся степенью ограничения максимальной электрической нагрузки потребителей  $N_{max}$ » [20]:

$$Y_{вн} = \lambda_{ав} \cdot N_{max} \cdot \varepsilon \cdot Y_{вн}(\varepsilon, \tau_{ав}), \quad (1.5)$$

Где  $\varepsilon$  – степень ограничения максимальной нагрузки потребителя [20]:

$$\varepsilon = N_{огр} / N_{max} = 0,78 \quad (1.6)$$

$N_{огр} = \varepsilon \cdot N_{max}$  – ограничение максимальной нагрузки потребителя

$Y_{\text{вн}}(\varepsilon, \tau_{\text{ав}})$  – «удельный ущерб от внезапности нарушения электроснабжения, зависящий от степени ограничения нагрузки и длительности перерыва электроснабжения, руб/кВт отключаемой нагрузки» [20].

Затраты за простой зависят от количества и длительности перерывов электроснабжения  $\lambda_{\text{ав}}$  и  $\tau_{\text{ав}}$  согласно следующей формуле [20]:

$$Z_{\text{зп}} = C_{\text{уз}} \cdot b_1 \cdot b_2 \cdot \tau_{\text{ав}} \cdot N_{\text{max}} \cdot \varepsilon \cdot \lambda_{\text{ав}}, \quad (1.7)$$

где  $C_{\text{уз}}$  – «удельная часовая зарплата производственным рабочим, отнесенная к 1кВт максимальной нагрузки» [20]

$b_1 \approx 0,9$  – «коэффициент возможности частичного полезного использования вынужденно простаивающего персонала» [20]

$b_2 = 0,67$  – «коэффициент уменьшения оплаты производственным рабочим за время вынужденного простоя ( $\frac{2}{3}$  оплаты труда за вынужденный простой)» [20]

«Удельная часовая зарплата производственным рабочим, отнесенная к 1кВт максимальной нагрузки рассчитывается по формуле» [20]:

$$C_{\text{уз}} = O_{\text{прч}} \cdot K_{\text{пр}} / P_{\text{общ}}, \quad (1.8)$$

где  $O_{\text{прч}}$  – средняя почасовая оплата труда производственного рабочего

$K_{\text{пр}}$  – количество производственных рабочих

$P_{\text{общ}}$  – общая потребляемая предприятием мощность

Рассчитаем удельную часовую зарплату рабочих, исходя из численности рабочего персонала на кондитерской фабрике, равной 85 человек и средней почасовой оплате рабочих, равной 89руб/час.

$$C_{\text{уз}} = 89 \cdot 85 / 189 = 40 \text{ руб/кВтч} \quad (1.9)$$

Основываясь на статистике за 2017г согласно таблицы 1, произведем расчет затрат.

Затраты на простой оборудования равны

$$Z_{\text{зп}} = 40 \cdot 0,9 \cdot 0,67 \cdot 0,485 \cdot 189 \cdot 0,78 \cdot 6 = 10347,29 \text{ руб} \quad (1.10)$$

где  $\tau_{\text{ав}} = (0,33+0,33+0,25+0,5+1+0,5)/6 = 0,485$  час

Ущерб от внезапности отключения электроэнергии составил:

$$Y_{\text{вн}} = 6 \cdot 189 \cdot 0,78 \cdot 81,45 = 72044,15 \text{ руб}, \quad (1.11)$$

где  $Y_{\text{вн}}(\epsilon, \tau_{\text{ав}}) = 81,45 \text{руб/кВт}$  согласно статистическим данным для пищевой промышленности [20]

Таким образом, ущерб от аварийного отключения подачи электроэнергии без учета потери сырья до внедрения автоматического ввода резерва составил:

$$Y_{\text{ав1}} = 72044,15 + 10347,29 = 82391,44 \text{руб.} \quad (1.12)$$

Рассчитаем ущерб от аварийного отключения электроснабжения кондитерской фабрики после установки АВР со временем переключения на резервную линию, равное 0,8сек ( $2,22 \cdot 10^{-4}$  час) для АВР на автоматических выключателях.

Затраты на простой оборудования

$$З_{\text{зп}} = 40 \cdot 0,9 \cdot 0,67 \cdot 2,22 \cdot 10^{-4} \cdot 189 \cdot 0,78 \cdot 6 = 4,74 \text{руб} \quad (1.13)$$

Ущерб от внезапности отключения электроэнергии:

$$Y_{\text{вн}} = 6 \cdot 189 \cdot 0,78 \cdot 81,45 \cdot 2,22 \cdot 10^{-4} = 15,99 \text{руб,} \quad (1.14)$$

Суммарный ущерб от аварийного отключения электроснабжения кондитерской фабрики после установки АВР составит:

$$Y_{\text{ав2}} = 15,99 + 4,74 = 20,73 \text{руб.} \quad (1.15)$$

Таким образом, при внедрении в систему электроснабжения кондитерской фабрики автоматического ввода резерва ущерб от аварийного отключения электроэнергии сократится в 4034 раза:

$$X = Y_{\text{ав1}} / Y_{\text{ав2}} = 82391,44 / 20,73 = 3974,5 \quad (1.16)$$

Выводы к первой главе:

Основные направления повышения надежности применительно к кондитерской фабрике ООО «Услада» связаны со структурным резервированием и увеличением срока службы и межремонтного интервала электромеханического оборудования.

Исходя из проведенного анализа схемы электроснабжения выявлено, что на фабрике имеется резервная линия электропитания. Таким образом, решение проблемы повышения надежности электроснабжения кондитерской фабрики возможно за счет внедрения автоматического ввода резерва (АВР). Это



решение также позволит сократить ущерб от аварийного отключения электроэнергии с 82391,44 до 20,73 рублей, то есть в 3974,5 раз.

Во-вторых, повысить надежность работы электромеханического оборудования на фабрике возможно за счет изменения системы электропривода шнековым транспортером.

Для реализации указанных выше предположений и достижения цели работы необходимо решить следующие задачи:

1. Внедрить АВР на трансформаторной подстанции.
2. Модернизировать электропривод шнекового конвейера.
3. Оценить эффективность принятых технических решений.

## **2 Проработка внедрения АВР на трансформаторной подстанции**

### **2.1 Анализ видов АВР**

Один из основных путей решения проблемы обеспечения стабильной подачи электроэнергии состоит во внедрении автоматического ввода резерва(АВР) в схему электроснабжения предприятия.

Для выбора оптимального автоматического ввода резерва с учетом специфики ООО «Услава» необходимо провести анализ АВР, предлагаемых на рынке [3, 4, 5, 7, 17, 18,].

Все АВР по типу исполнения силовых коммутаторов делятся на два вида – электромеханические и электронные.

В электромеханических АВР роль силовых коммутаторов играют мощные контакторы, автоматические выключатели или рубильники, которые активируются (включаются) электродвигателем.

В электронных АВР коммутация токов осуществляется электронными ключами (тиристорами или транзисторами).

АВР на контакторах являются самыми распространенными из-за простоты конструкции и низкой стоимости комплектующих. В данных АВР обычно применяются два контактора с взаимной электрической блокировкой совместно с электромеханической. Чаще всего они оснащаются реле контроля фаз, которое устанавливается только на одну фазу. Такое решение удешевляет стоимость АВР, но не позволяет контролировать напряжение на всех трех фазах и соответственно является менее избирательным. Время переключения в контакторных АВР колеблется в пределах 0,1-0,8 сек.

Электромеханические АВР на автоматических выключателях с электроприводом практически полностью соответствуют АВР на контакторах по характеристикам и тоже позволяют реализовать блокировку (как электрическую, так и механическую) при схеме с двумя независимыми входами. Основным отличием их от контакторных, является увеличенное

количество рабочих переключений (от 3000 до 10000) по сравнению с контакторными (около 1000).

В электронном АВР, как указывалось ранее, силовым коммутирующим элементом являются мощные тиристоры или транзисторы. Благодаря высокому быстродействию тиристоров, данные АВР обеспечивают минимальное время переключения с основного ввода на резервный (не более 5мсек). Количество гарантированных переключений в электронных АВР практически неограниченно (более 1000000).

Для определения надежности различных типов АВР необходимо выявить и просчитать параметры, влияющие на надежность их работы.

## 2.2 Требования, предъявляемые к устройству и работе АВР

Прежде, чем провести выбор автоматического ввода резерва, необходимо обозначить основные требования, предъявляемые к ним.

1) «Устройства АВР системы электропитания должны срабатывать:

- максимально быстро после потери электроэнергии на основной линии;
- при любом пропадании напряжения на собственных шинах потребителя без анализа причин возникшей неисправности, если не предусмотрена блокировка запуска от определенного вида защит. Например, дуговая защита шин должна блокировать запуск АВР с целью предотвращения развития возникшей аварии;
- с необходимой задержкой при выполнении определенных технологических циклов. Например, во время включения под нагрузку мощных электродвигателей возможна «просадка» напряжения, которая быстро заканчивается;
- всегда только однократно, ибо иначе возможно многократное включение на не устраняемое короткое замыкание, способное полностью разрушить сбалансированную электрическую систему» [5].

2) «При использовании АВР должны быть приняты меры, исключающие возможность замыкания между собой двух независимых источников питания друг на друга, причем в дополнение к требованиям ПУЭ службы Энергонадзора, как правило, требуют наличия не только электрической, но и механической блокировки коммутирующих элементов» [5].

3) Задержка времени переключения с основного ввода на резервный должна быть минимальной и зависит от характеристик потребителей электроэнергии. Однако, если в энергосистеме имеются источники бесперебойного питания (ИБП), то время переключения не имеет существенного значения. Система АВР должна иметь возможность регулировки (увеличения) времени переключения на резервную линию в том случае, если работа электрооборудования не критична ко времени переключения. Это позволит избежать лишних переключений при кратковременном провале питающего напряжения.

4) Система АВР должна иметь возможность регулировки порогов срабатывания АВР в диапазоне контролируемого напряжения для основного и резервного вводов. Прежде, чем произвести переключение на резервную линию, необходимо убедиться, что на ней есть требуемое напряжение. При этом система не должна реагировать на кратковременную просадку напряжения на основном вводе.

5) «Наличие индикации состояния и возможность управления АВР в ручном режиме» [5].

### 2.3 Расчет параметров АВР

При проектировании системы гарантированного электроснабжения, предназначенной для обеспечения работы электрооборудования кондитерской фабрики, возникает задача выбора конкретного вида автоматического ввода резерва.

Для обеспечения бесперебойной подачи электроэнергии на фабрику ООО «Услава» и быстрого восстановлении электропитания потребителей требуется

разработать новую систему электроснабжения. Решение этой задачи обеспечивает АВР, который может подключить независимый источник электроэнергии (вторую линию подачи электроэнергии через трансформатор, аккумуляторную батарею, генератор и т.п.). В таком случае перерыв электроснабжения может составлять не более  $0,3 \div 0,8$  секунд.

### 2.3.1 Выбор напряжения срабатывания для переключения ввода системы электропитания

Все оборудование кондитерской фабрики Услава питается трехфазным напряжением 380В с глухо заземлённой нейтралью и частотой питающей сети 50Гц. Наиболее частой причиной пропадания напряжения в системе питания является авария на энергоснабжающей линии (Фидеры 32 и 58). Данные аварии происходят с частотой 5-7 отключений в год. Поэтому АВР обязан контролировать уровень напряжения в сети, и при его понижении до значения срабатывания [26]

$$U_{cp} = (0,25 \dots 0,4) U_{ном}, \quad (2.1)$$

то есть при напряжении, равным

$$U_{cp} = 95 \dots 150 \text{ В},$$

произвести переключение на резервное питание.

### 2.3.2 Выбор силового оборудования для коммутации токов нагрузки АВР.

#### Расчет рабочего тока АВР

Для проектирования элементов, входящих в состав АВР нам необходимо определить максимальную величину тока, проходящего через АВР.

Используя техническую документацию на оборудование, установленное на кондитерской фабрике, находим общую мощность, переключаемую АВР, по формуле [2, 27]:

$$P_{общ} = P_{ц1} + P_{ц2} + P_{Маст}, \quad (2.2)$$

где  $P_{ц1} = 74$  кВт – мощность всего оборудования, установленного в Цехе 1;

$P_{ц2} = 93$  кВт – мощность всего оборудования, установленного в Цехе 2;

$P_{Маст} = 22$  кВт – мощность всего оборудования, установленного в мастерской.

Тогда  $P_{общ} = 74 + 93 + 22 = 189$  кВт.

Номинальный ток АВР находим по известному выражению:

$$I_{ном} = \frac{P_{общ}}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos \varphi}, \quad (2.3)$$

где  $U = 380$ В – линейное напряжение сети;

$\cos \varphi = 0,76$  – коэффициент мощности.

$$I_{ном} = \frac{189000}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,76} = 377,84 \text{ А}$$

Тогда

(2.4)

Для обеспечения гарантированной долговечной работы АВР рекомендуется брать коэффициент запаса [5]:

$$K_{зан} = 1,3$$

В итоге получаем:

$$I_{ABP} = K_{зан} \cdot I_{ном} = 1,3 \cdot 377,84 = 491,2 \approx 500 \text{ А} \quad (2.5)$$

Отметим также, что нагрузочная способность трансформатора КТП-26а тип ТМ-400 6/0,4кВ 400кВА рассчитывается по формуле:

$$I_H = P_H : U_H : \sqrt{3} = 400000 : 380 : 1,732 = 607,75 \text{ А} \quad (2.6)$$

Таким образом, для обеспечения гарантированной работы автоматический ввод резерва и коммутационная аппаратура кондитерской фабрики должны выбираться по току, равному или большему, чем 607,75А. Выбираем из стандартного ближайшего значения 630А. Именно на ток 630А мы будем проектировать силовую аппаратуру АВР.

## **2.4 Алгоритм выбора вида АВР**

Ранее в Главе 1 упоминалось, что существует несколько видов АВР [4, 5, 7, 17] . Проблема выбора оптимального варианта АВР решается каждым потребителем индивидуально, однако имеются общие критерии выбора, которые возможно систематизировать.

Первым делом потребителю необходимо определиться с напряжением на вводах. Если для электроснабжения потребителя используется напряжение не выше 10кВ, то возможно использовать АВР с любыми коммутирующими устройствами: на контакторах, автоматических выключателях и тиристорах. Естественнo, что на тиристорах АВР будет стоить существенно дороже.

Во-вторых, потребителю необходимо знать параметры нагрузки: какая потребляется мощность и максимальный ток нагрузки. Известно, что автоматические выключатели изготавливаются практически на любые токи, в то время, как использование контакторов и тиристоров на токах выше 1000А становится нежелательным, а свыше 5000А невозможным.

В-третьих, так как тиристорные АВР используют в своем составе логические программируемые контроллеры, которые критичны к температуре окружающей среды, то их использование возможно только в отапливаемых помещениях с температурой не ниже +5°C.

В-четвертых, если обеспечения бесперебойной работы оборудования на предприятии требуется обеспечить минимальное время переключения на резервное электроснабжение, то в данном случае необходимо использовать только тиристорные АВР.

Также немаловажным вопросом является количество вводов электроэнергии и характеристики альтернативных источников энергии. Обычно на предприятии имеются два источника электроэнергии, гораздо реже три.

В качестве источника электроэнергии на резервном вводе чаще всего используется либо вторая кабельная линия, либо дизельный или газовый

генератор. При использовании генератора потребуется усложнение схемы АВР для обеспечения его запуска.

Естественно, не последнюю роль в выборе типа АВР играет ценовой сегмент. К бюджетным можно отнести АВР на контакторах, а к средним - на автоматических выключателях. В тех же случаях, когда оборудование критично к скорости восстановления электроснабжения, целесообразно использовать дорогостоящие тиристорные АВР.

Для упрощения выбора вида АВР мной разработан алгоритм его выбора.

Алгоритм выбора вида АВР.

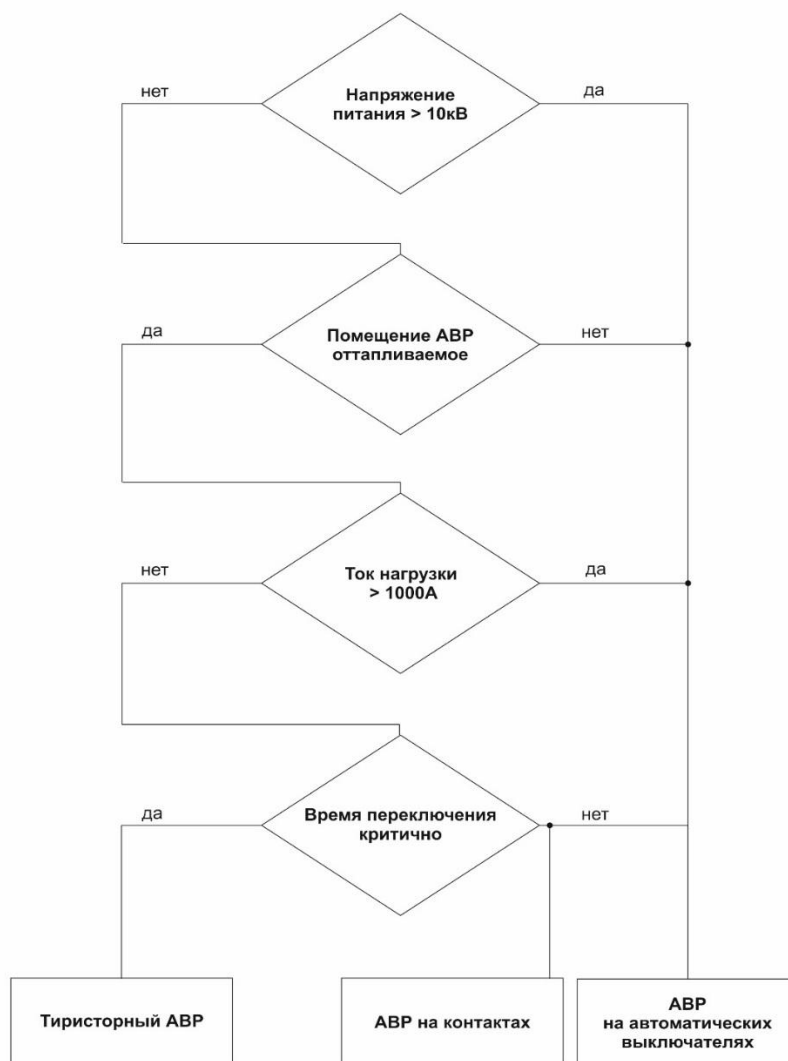


Рисунок 2.1 – Алгоритм выбора вида АВР



Исходя из алгоритма, представленного на рисунке 2.1, применительно к кондитерской фабрике ООО «Услада», получаем:

- напряжение питания 380В;
- помещение, трансформаторной подстанции, где будет установлен АВР, неотапливаемое;
- максимальный ток нагрузки 630А, что меньше 1000А;
- время переключения не критично.

Согласно разработанному алгоритму, учитывая, что АВР будет располагаться в неотапливаемом помещении, остается выбор из двух видов АВР: на контакторах и на автоматических выключателях. Основываясь на данных о количестве гарантированных переключений, выбор вида АВР останавливаем на АВР на автоматических выключателях.

Выводы к главе 2.

1. Для кондитерской фабрики ООО «Услада» целесообразно использовать АВР на автоматических выключателях, оснащенный программируемым контроллером, т.к. он позволяет работать в неотапливаемых помещениях.

2. Для ООО «Услада» приемлемым является АВР типа ТСМ 630/630А 3р (ats-tsm-630A-3p-pro) ЕКF PROxima, т.к. это устройство соответствует току 630А, оснащено программируемым многофункциональным контроллером с возможностью регулировки параметров защиты.

3. Алгоритм выбора АВР должен состоять из последовательных этапов:

- определение рабочего напряжения
- температурный режим работы АВР
- мощность нагрузки, потребляемый ток
- критичность времени переключения между вводами АВР

4. Применение Алгоритма позволяет ускорить процесс выбора АВР для конкретного потребителя.

### **3 Проработка решения повышения надежности работы шнекового конвейера подачи муки**

#### **3.1 Сравнительный анализ электроприводов винтовых конвейеров**

Особенности современных технологических процессов при производстве кондитерских изделий определяют выбор новых конструкций электроприводов и требования, предъявляемые к ним. Основные из этих особенностей следующие: необходимость подачи нескольких сортов муки в одну производственную точку, повышенная производительность оборудования, ограничение момента в элементах механизма, обеспечение точного дозирования продукта.

На основании особенностей технологических процессов формируются требования, предъявляемые к электроприводу винтового конвейера. Наиболее важными из требований являются:

- 1) Регулирование угловой скорости двигателя в относительно небольшом диапазоне, что необходимо для получения пониженных скоростей и более точной дозировки;
- 2) Наличие плавного пускового момента, для снижения вероятности поломок деталей привода;
- 3) Обеспечение необходимой жесткости механических характеристик привода, особенно регулировочных, с тем чтобы низкие скорости почти не зависели от момента на валу.

В настоящее время для реализации этих требований в качестве электропривода для винтового конвейера применяется нерегулируемый асинхронный электропривод.

К его достоинствам относят простоту устройства и несложность технического обслуживания.

Однако недостатков у данного привода гораздо больше:

- высокая вероятность образования заторов внутри желоба, ведущая к перегреву и поломке электропривода,

- повышенный износ винта и желоба конвейера,
- высокий удельный расход энергии, связанный с конструкцией шнекового конвейера,
- чрезмерное измельчение и истирание продукта.

Двигатель нерегулируемого асинхронного привода работает в номинальном режиме, что исключает возможность изменения частоты вращения винта конвейера, и не обеспечивает высокой производительности с относительно малыми потерями энергии.

Анализируя существующий винтовой конвейер, приходим к выводу, что целесообразно провести модернизацию не только привода конвейера, но и всей конструкции. Таким образом, руководствуясь разработками ведущих фирм и специалистов в области транспортирования сыпучих материалов, воспользуемся следующими разработками:

- 1) Электропривод конвейера выполним регулируемым.
- 2) Воспользуемся гибкой спиральной конструкцией конвейера.
- 3) Для привода конвейера применим мотор – редуктор.

Известны различные способы регулирования угловой скорости электроприводов переменного тока, наибольшее распространение из них получили следующие:

- 1) реостатное регулирование;
- 2) переключением числа пар полюсов;
- 3) изменением напряжения;
- 4) частотное регулирование.

Все эти способы подробно описаны в научно-технической литературе и в учебниках для вузов. Проанализируем их достоинства и недостатки.

«Введение резисторов в цепь ротора (реостатное регулирование) позволяет, как и для двигателя постоянного тока, регулировать угловую скорость двигателя. Плавность регулирования зависит от числа ступеней включаемых резисторов. Регулирование осуществляется вниз от основной

угловой скорости. Энергетические показатели регулируемого электропривода за цикл зависят от режима работы. При продолжительном режиме они существенно ниже, чем при повторно-кратковременном. В обоих случаях они тем выше, чем меньше диапазон регулирования и чем большую часть времени привод работает на повышенных скоростях. Реостатное регулирование применяется для двигателей с фазным ротором» [28].

«Недостатками такого способа являются:

1) необходимость дискретного изменения сопротивления в роторной цепи с помощью силовых аппаратов, управляемых дистанционно или вручную, что дает ступенчатое регулирование скорости и исключает возможность использования замкнутых систем автоматического управления;

2) невысокое быстродействие;

3) большие потери энергии» [28].

Применение такого способа для регулирования угловой скорости невозможно, так как его показатели не удовлетворяют требованиям, предъявляемым к электроприводам винтовых конвейеров.

«Существует другой способ регулирования угловой скорости путем переключения числа полюсов. Такой способ реализуется практически в асинхронных электродвигателях с короткозамкнутым ротором, где переключение полюсов производится в обмотке статора, обмотка ротора при этом автоматически приспособляется к избранному числу полюсов. Использование двигателя с фазным ротором нецелесообразно ввиду усложнения конструкции двигателя. Регулирование угловой скорости переключением числа полюсов является не плавным, а ступенчатым. Вместе с тем, рассматриваемый способ регулирования является весьма экономичным и отличается механическими характеристиками, обладающими большой жесткостью. Благодаря своим преимуществам двигатели с переключением полюсов находят применение там, где не требуется плавного регулирования скорости. С учетом особенностей работы винтового конвейера, можно сделать

вывод, что использовать такой способ регулирования в нашем случае нельзя» [28].

«Если регулировать напряжение, подводимое к трем фазам статора асинхронного двигателя, то можно изменять максимальный момент, не изменяя критического скольжения. Устройством для регулирования напряжения может быть, например, тиристорный регулятор напряжения (ТРН); при этом в каждой фазе статора двигателя находятся два встречно-параллельно включенных тиристора. Управляя углом включения тиристорov (фазовое управление), можно плавно менять действующее значение напряжения. Регулирование угловой скорости двигателя при этом способе происходит за счет уменьшения модуля жесткости механических характеристик и осуществляется вниз от номинальной угловой скорости. Плавность регулирования определяется плавностью изменения напряжения; при применении ТРН угловая скорость регулируется бесступенчато. Такой способ регулирования неэкономичен для двигателей с короткозамкнутым ротором, его можно использовать только при малой мощности и в кратковременном режиме работы. Применение такого способа нецелесообразно для привода винтового конвейера, так как уменьшаются пусковой момент и быстродействие электропривода, что не соответствует требованиям, предъявляемым к данному механизму» [28].

С развитием полупроводниковой техники все больше находит применение частотное регулирование угловой скорости. Частотное регулирование наилучше используется в асинхронном двигателе с короткозамкнутым ротором.

«Экономические выгоды частотного регулирования особенно существенны для приводов, работающих в повторно-кратковременном режиме.

Для осуществления частотного регулирования угловой скорости находят применение преобразователи частоты (ПЧ), на выходе которых по требуемому соотношению или независимо меняется как частота, так и амплитуда напряжения» [28].

«В последнее время в связи с разработкой более мощных транзисторов, рассчитанных на напряжение до 1000 В и на ток в несколько десятков и даже сотен ампер, стало возможным производство транзисторных преобразователей частоты. Транзисторный ПЧ более экономичен и надежен, чем тиристорный, из-за меньшего числа переключающих элементов. Эти преобразователи могут выполняться и с инверторами с ШИМ. В этом случае количество элементов сокращается еще более резко по сравнению с тиристорным АИН-ШИМ.

Транзисторные преобразователи частоты для регулируемых электроприводов малой и средней мощности являются более перспективными, чем тиристорные. Именно такой вид преобразователя применим для привода конвейера. Подводя итог, можно сказать, что частотное регулирование угловой скорости является наиболее экономичным» [28].

При выборе конкретной системы электропривода следует учитывать не только технические особенности функциональных элементов электропривода, но также и сложившиеся партнерские связи с конкретными поставщиками этих изделий. Например, ООО «Услава» давно сотрудничает с фирмой «Агро-3», занимающейся производством и продажей комплектующих для винтовых конвейеров, технические параметры которых вполне соответствуют характеристикам современного оборудования. Так, для гибких конвейеров наиболее важным показателем привода является компактность и лёгкость элементов привода. Мотор - редукторы фирмы «S.T.M.» имеют небольшую массу, что позволяет осуществить монтаж конвейера в подпотолочном пространстве и освободить производственные помещения. Для правильного выбора двигателя из каталога фирмы «S.T.M.» необходимо выполнить предварительный расчёт его параметров, чему будет посвящён соответствующий раздел. Однако параметры винтового конвейера должны соответствовать характеру технологического процесса ООО «Услава». Кроме того, устанавливаемое оборудование должно разместиться в существующих производственных площадях. Для того, чтобы электропривод спирального

конвейера работал в оптимальном режиме, необходимо правильно выбрать преобразователь частоты.

Для оценки технических характеристик привода на соответствие требованиям, предъявляемым к механизмам конвейера необходимо провести математическое моделирование спроектированного привода и проанализировать результаты моделирования.

В целом модернизация электропривода требует решения ряда типовых задач. Например, необходимо: выбрать мотор-редуктор, провести расчёт и выбор элементов силового канала; выбрать конструкцию винтового конвейера; выполнить математическое моделирование привода для проверки его работоспособности.

### 3.2 Расчёт мощности двигателя конвейера

Данный раздел выполнен в соответствии с расчетом шнековых механизмов [29].

#### 3.2.1 Исходные данные для расчета

1) Транспортируемый материал – мука пшеничная:

- коэффициент трения  $f = 0.25$

- насыпной вес  $\gamma_0 = 0.55 \frac{m}{m^3}.$

- коэффициент сопротивления движению  $W = 10.$

2) производительность  $Q_1 = 5 \frac{m^3}{ч};$

3) вариант исполнения – стационарный;

4) общая длина транспортирования  $L_{тр} = 10 м;$

5) схема трассы – горизонтальная с небольшим изгибом.

6) КПД привода  $\eta = 0.8$

#### 3.2.2 Выбор конструктивных параметров спирально-винтового конвейера [29]

«По результатам многочисленных экспериментальных исследований конструктивные параметры гибкого шнека рекомендуется выбирать в следующих пределах:

$$D_{cn} = (0,8 - 0,9)D_p;$$

$$\delta = (0,14 - 0,20)D_{cn};$$

$$s = (0,6 - 1,0)D_{cn}.$$

где:  $D_{cn}$  – диаметр спирали,

$D_p$  – диаметр рукава,

$\delta$  – диаметр проволоки спирали;

$s$  – шаг спирали» [29].



Принимаем:

Диаметр рукава -  $D_p = 0.119 \text{ м.}$

Диаметр спирали -  $D_{cn} = 0,8 \cdot 0.119 = 0.095 \text{ м.}$

Диаметр проволоки спирали -  $\delta = 0,15 \cdot 90 = 0.014 \text{ м.}$

Шаг спирали -  $s = 0.68 \cdot 0.095 = 0.065 \text{ м.}$

### 3.2.3 Определение частоты вращения спирали

$$n = \frac{Q \cdot D_p}{150 \cdot D_{cn}^2 \left( D_p^2 - \frac{\delta^2}{\sin \alpha} \right)} \cdot \frac{\cos \varphi_1}{\sin \alpha_p \cos (\alpha_p + \varphi_1)} \cdot \frac{1}{\gamma_0} =$$

$$= \frac{5 \cdot 0.119 \cdot \cos 14^\circ \cdot 1}{150 \cdot 0.095^2 \left( 0.119^2 - \frac{0.014^2}{\sin 15^\circ} \right) \cdot \sin 9.8^\circ \cdot \cos(9.8^\circ + 14^\circ) \cdot 0.55} = 371 \text{ об/мин.}$$
(3. 1)

где:  $\alpha = \arctg \frac{s}{\pi D_{cp}} = \arctg \frac{0.065}{3.14 \cdot 0.081} = 15^\circ$

$D_{cp}$  – «средний диаметр спирали» [29],  $D_{cp} = D_{cn} - \delta = 0.095 - 0.014 = 0.081 \text{ м.}$

$$\alpha_p = \arctg \frac{s}{\pi D_p} = \arctg \frac{0.065}{3.14 \cdot 0.119} = 9.8^\circ,$$

$$\varphi_1 = \arctg f = \arctg(0.25) = 14^\circ.$$

$f$  – «коэффициент трения скольжения между транспортируемым материалом и спиралью» [29].

Выбираем частоту вращения спирали из стандартного ряда:  $n=375 \text{ об/мин.}$

3.2.4 Расчет производительности спирально-винтового шнека  $Q$  (т/ч) для частоты вращения  $n=375 \text{ об/мин}$  [29]:

$$Q = 150 \frac{n D_{cn}^2}{D_p} \left( D_p^2 - \frac{\delta^2}{\sin \alpha} \right) \frac{\sin \alpha_p \cos (\alpha_p + \varphi_1)}{\cos \varphi_1} \gamma_0 =$$

$$= 150 \frac{375 \cdot 0.095^2}{0.119} \cdot \left( 0.119^2 - \frac{0.014^2}{\sin 15^\circ} \right) \cdot \frac{\sin 9.8^\circ \cdot \cos(9.8^\circ + 14^\circ)}{\cos 14^\circ} \cdot 0.55 = 5.054 \text{ м}^3/\text{ч}$$
(3. 2)

где: « $n$  – частота вращения спирали шнека, об/мин;

$\alpha$  – угол наклона винтовой линии оси проволоки спирали, град;

$\alpha_p$  – расчётный (рабочий) угол наклона винтовой линии оси проволоки спирали, град;

$\varphi_1$  – угол трения скольжения между транспортируемым материалом и спиралью, град;

$\gamma_0$  – объёмная (насыпная) масса транспортируемого материала» [29];

### 3.2.5 Определение мощности, необходимой для вращения цилиндрической спирали

«Мощность  $N$  (кВт), затрачиваемую на вращение цилиндрической спирали при транспортировании сыпучего материала, можно определить, вводя коэффициент сопротивления перемещению материала  $W$ , который учитывает все потери энергии в шнеке» [29]:

$$N = \frac{Q \cdot L \cdot W}{367} + \frac{Q \cdot h}{367} = \frac{5.054 \cdot 10 \cdot 10}{367} + \frac{5.054 \cdot 100}{367} = 1.377 \text{ кВт}. \quad (3.3)$$

где: « $L$  – длина трассы, м;

$h$  – высота подъёма/опускания транспортируемого продукта, м» [29].

### 3.2.6 Потребная мощность электродвигателя $N_{\text{дв}}$ :

$$N_{\text{дв}} = K_{\text{пер}} \frac{N}{\eta} = 1.3 \frac{1.377}{0.8} = 2.238 \text{ кВт}. \quad (3.4)$$

где: « $K_{\text{пер}} = 1,3 \div 1,5$  – коэффициент перегрузок.

$\eta$  – к.п.д. привода» [29].

### 3.2.7 Определение прочности винтовой спирали

Наибольший скручивающий и изгибающий момент на винтовую спираль будет действовать в месте её крепления к электроприводу.

#### 3.2.7.1 Расчет изгибающего момента $M_{\text{изг}}$ по формуле [29]:

$$M_{изг} = 9560 \frac{N}{n} = 9560 \cdot \frac{2.238 \cdot 10^3}{375} = 35.104 \text{ Нм.} \quad (3.5)$$

3.2.7.2 Расчет крутящего момента  $M_{кр}$ :

$$M_{кр} = \frac{P_z \cos \alpha}{2} = \frac{1.579 \cdot 10^4 \cdot \cos 15^\circ}{2} = 638.949 \text{ Нм.} \quad (3.6)$$

3.2.7.3 Определение осевого усилия  $P_z$ :

$$P_z = 19,62 \frac{M_{изг}}{D_{сп} \operatorname{tg}(\varphi + \varphi_1)} = 19,62 \frac{35,104}{0,081 \cdot \operatorname{tg}(15^\circ + 14^\circ)} = 1,579 \cdot 10^4 \text{ Н.} \quad (3.7)$$

3.2.7.4 Проверка условия прочности:

$$\sigma_{np} = \frac{\sqrt{M_{изг}^2 + M_{кр}^2}}{0,1\delta^2} = \frac{\sqrt{35,104^2 + 638,949^2}}{0,1 \cdot 0,014^2} = 3,138 \cdot 10^7 \text{ Па. } \sigma_{np} \leq \frac{\sigma_p}{n} \quad (3.8)$$

, что допустимо для незакаленной стальной пружинной проволоки диаметром  $\delta = 0,15 \cdot 90 = 0,014 \text{ м}$  3-го класса прочности.

Действительно, предел прочности  $\sigma$  для пружинной проволоки 3 – го класса прочности равен 820 МПа.

где: « $n_s$  – коэффициент запаса ( $n_s = 1,8 \div 2,2$ )» [29],

[ $\sigma_p$ ] – «допустимое напряжение материала спирали, Па» [29].

Индекс спирали:  $c = \frac{D_{сп}}{\delta} = \frac{0,095}{0,014} = 6,7$  что допустимо.

Принятый диаметр проволоки спирали проверяем на прочность по максимальному пусковому моменту, скручивающему спираль и, следовательно, изгибающему виток.

$$M_{изг. \max} = \kappa_{пуск} \cdot M_{изг} = 1,8 \cdot 35,104 = 63,19 \text{ Нм.} \quad (3.9)$$

Коэффициент пусковой перегрузки принимаем равным  $\kappa_{пуск} = 1,8$ , так как транспортирующий участок спирали для горизонтальных трасс можно отнести к средней длине.

Таким образом, имеем

$$\sigma_{np} = \frac{M_{изг, max}}{W} = \frac{1.8 \cdot M_{изг}}{0.1 \cdot \delta^3} = \frac{1.8 \cdot 35.104}{0.1 \cdot 1.4^3} = 230.02 \text{ Па.} \quad (3.10)$$

Поскольку полученные напряжения допустимы, ограничивать длину транспортирования не требуется.

### 3.2.8 Выбор двигателя

С учетом потребляемой электродвигателем мощности выбираем мотор-редуктор, параметры двигателя которого представлены в таблице 3.1, редуктора в таблице 3.2

Параметры асинхронного двигателя IMM90L2S4

Таблица 3.1

Типоразмер двигателя	Мощность, кВт	Ток $I_n$ , А	Момент $M_n$ , Н·м	КПД, %	Коэффициент мощности	Скольжение, %*	$\frac{M_{пуск}}{M_{ном}}$	$\frac{M_{max}}{M_{ном}}$	$\frac{I_{пуск}}{I_{ном}}$	J, Кг·м <sup>2</sup>	Масса, кг
Синхронная частота вращения 3000 об/мин											
IMM 90L2	2,20	4,4	7,4	83,5	0,87	5,0	1,8	3,0	7,0	0,0021	16,5

Для получения заданной частоты вращения спирали в электроприводе спирально – винтового конвейера применим соосный редуктор производства S.T.M. Италия марка AMF 40/2 с передаточным числом 1/7.6

Параметры соосного редуктора AMF 40/2

Таблица 3.2

Крутящий момент на выходном валу $M_n$		Передаточное отношение $i$		Мощность электродвигателя кВт		Скорость вращения выходного вала $n_1$ /мин		Типоразмер редуктора
$T_{min}$	$T_{max}$	$I_{min}$	$I_{max}$	$P_{min}$	$P_{max}$	Min	Max	
400	10000	3.48	2332.8	0.55	7.50	0.65	432	

### 3.3 Расчёт и выбор элементов силового канала электропривода

«Максимальный ток через ключи инвертора определяется из выражения» [28]:

$$I_{c \max} = \frac{P_{\text{ном}} \cdot k_1 \cdot \sqrt{2} \cdot k_2}{\eta_{\text{ном}} \cdot \cos \varphi \cdot \sqrt{3} \cdot U_{\text{л}}} = \frac{2200 \cdot 1.4 \cdot \sqrt{2} \cdot 1.1}{0.85 \cdot 0.87 \cdot \sqrt{3} \cdot 380} = 9.84 \text{ A} \quad (3.11)$$

где:  $P_{\text{ном}} = 2.2 \text{ кВт}$  – «номинальная мощность двигателя, Вт» [28];

« $K_1 = 1,2 - 1,5$  – коэффициент допустимой кратковременной перегрузки по току, необходимой для обеспечения динамики ЭП» [28];

« $K_2 = 1,1 - 1,2$  – коэффициент допустимой мгновенной пульсации тока» [28],

$\eta_{\text{ном}} = 0,85$  – «номинальный КПД двигателя» [28];

$U_{\text{н}} = 380$  – «линейное напряжение двигателя, В» [28].

Таким образом, выбираем стандартный преобразователь частоты:

- ATV312HU30N4 (Schneider Electric)
- IP20
- $P = 3 \text{ кВт}$
- $U_1 = 380 \dots 500, \text{ В}$
- $I_1 = 10.9 \text{ А}, I_2 = 8.3 \text{ А}$
- $f_1 = 47.5 \dots 63 \text{ Гц}, f_2 = 0 \dots 500 \text{ Гц}$
- $U_2 = 0 \div U_1, \text{ В}$

Управление скоростью вращения электропривода будем производить выносным потенциометром  $10 \text{ кОм}$ , вынесенный на пульт управления оператора. Схема управления электропривода с частотным преобразователем представлена на рисунке 3.1

Для согласования работы электродвигателя с преобразователем частоты, необходимо произвести параметрирование последнего. Основные параметры электродвигателя необходимо списать с шильдика и внести в память преобразователя частоты ATV312HU30N4.

Программирование меню преобразователя частоты ATV312HU30N4 [drc-] сведены в таблицу 3.3.

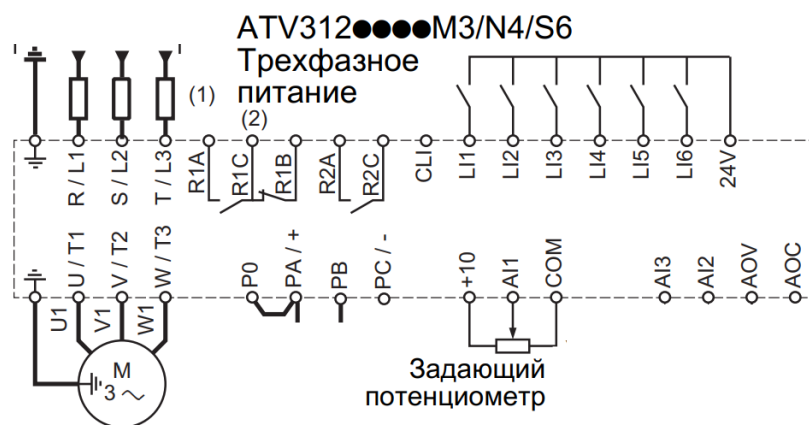


Рисунок 3.1 Схема управления электропривода с частотным преобразователем

Параметры меню [drc-] преобразователя частоты ATV312HU30N4

Код	Описание	Единица измерения	Величина
bFr	Частота стандартного двигателя	Гц	50
Uns	Номинальное напряжение двигателя	В	380
Frs	Номинальная частота двигателя	Гц	50
nCr	Номинальный ток двигателя	А	4,4
nSP	Номинальная скорость двигателя	Об/мин	2880
COS	Косинус $\phi$ двигателя		0,87
rSC	Номинальное сопротивление статорной обмотки		[Нет]

### 3.4 Выбор конструкции винтового конвейера

Вследствие большого разнообразия транспортирующих машин для решения одной и той же задачи можно использовать различные конструкции. Основным критерием выбора транспортирующей машины является её соответствие комплексу заданных технических требований и технико-экономическая эффективность её применения. Важнейшими условиями выбора машины являются обеспечение надёжности её работы в заданных условиях, а также удовлетворение требованиям экологии и безопасности труда. Эти условия в ряде случаев заставляют принимать менее затратные решения по экономической оценке.

Технические факторы выбора конструкции. Выбор рационального типа конструкции винтового конвейера определяют следующие факторы:

- характеристика транспортируемого груза;
- требуемая производительность машины;
- длина и конфигурация трассы транспортирования груза;
- способы загрузки и разгрузки;
- условия работы машины;
- надёжность машины.

Экономические факторы выбора машины. Отвечать всем рассмотренным техническим факторам могут несколько типов конструкций конвейеров. Окончательное решение принимают после проведения технико-экономического анализа выбранных вариантов конструкций.

При его проведении определяют:

- капитальные затраты на создание (приобретение) и установку конвейера;
- эксплуатационные расходы и себестоимость транспортировки 1 т груза;
- численность рабочих, занятых на погрузочно-разгрузочных работах;
- сроки окупаемости капитальных затрат.

Таким образом, в данном разделе будет проведено описание и сделан сравнительный анализ винтовых конвейеров исходной (используемой) и спирально - винтовой конструкций

#### 3.4.1 Устройство и основные параметры исходного винтового конвейера.

«Горизонтальный винтовой конвейер в соответствии с рисунком 3.2 состоит из желоба, в котором соосно на опорах установлен винт. Привод винта состоит из электродвигателя, соединительных муфт и редуктора. Насыпной груз подают через загрузочный патрубок сверху, а разгружают через разгрузочный или промежуточный патрубки, снабженные затворами. Смотровые люки служат для технического обслуживания опор винта» [31, с. 4].

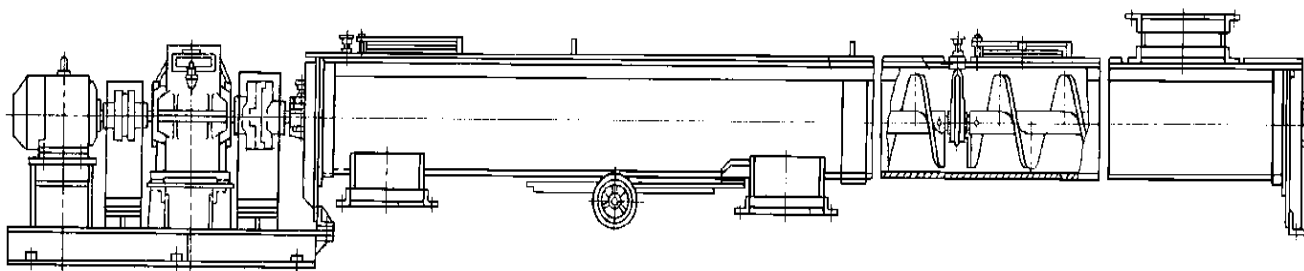


Рисунок 3.2 – Устройство винтового конвейера

«Винт конвейера выполняют с правым или левым направлением спирали. Поверхность винта может быть сплошной, ленточной или прерывистой в виде отдельных лопастей фасонной формы. Сплошные винты применяют для перемещения сухого мелкозернистого и порошкового насыпного груза, не склонного к слёживанию; ленточные – для перемещения слёживающихся и мелкокусковых грузов; фасонные винты используют для перемещения липких грузов» [31, с. 5].

«Витки сплошного и ленточного винтов изготавливают штамповкой из стального листа или полосы, а затем приваривают к валу. Спираль ленточного



винта укрепляют на стержнях, пропускаемых через просверленные в валу отверстия. Основные характеристики винтов выбираются по ГОСТ 2037 – 82.

Вал винта, состоящий для удобства сборки из отдельных секций длиной 2,5...3,5 м, может быть сплошным или трубчатым. Трубчатые валы имеют меньшую массу и их более удобно соединять между собой с помощью вставляемых по концам коротких соединительных валиков. Вал винта опирается на промежуточные и концевые опоры. Промежуточные опоры подвешивают сверху на поперечных планках, укрепленных на желобе. Они должны иметь по возможности малые диаметр и длину (так как витки винта на эту длину приходится прерывать), а также надёжное уплотнение во избежание загрязнения частицами груза. Нередко это подшипники скольжения, в которых вращаются соединительные валики. Смазку к подшипникам подводят по трубкам от пресс – маслёнок, расположенных сверху на планках. Концевые опоры укрепляют в торцевых стенках желоба или на выносных опорах. Одну из них, устанавливаемую со стороны, в которую перемещается груз, для восприятия действующей вдоль вала осевой растягивающей силы, оснащают радиально упорным подшипником» [31, с. 6].

«Недостатками такой конструкции являются высокий удельный расход энергии, значительное истирание и измельчение груза, повышенный износ винта и желоба, а также чувствительность к перегрузкам, ведущая к образованию внутри желоба (особенно у промежуточных подшипников) заторов» [31, с. 6].

#### 3.4.2 Устройство и основные параметры спирально - винтового конвейера

«Спирально–винтовой конвейер в соответствии с рисунком 3.3, состоит из загрузочного устройства, в котором установлен вал – питателя и трубы с продетой в неё гибкой бесстержневой спиралью. Один ее конец закреплен в подшипниковом узле разгрузочного узла, а другой соединен с валом – питателем. Привод конвейера состоит из мотора – редуктора. Насыпной груз подают через загрузочное устройство, а разгружают через разгрузочный узел.

Система не имеет на всем своем протяжении подшипников, шестерней, приводов, цепей и т.д. Диаметр условного прохода остается неизменным по всей длине, что исключает возникновение зон прессования продукта. Спираль конвейера выполняют из высокопрочной пружинной стали» [31].

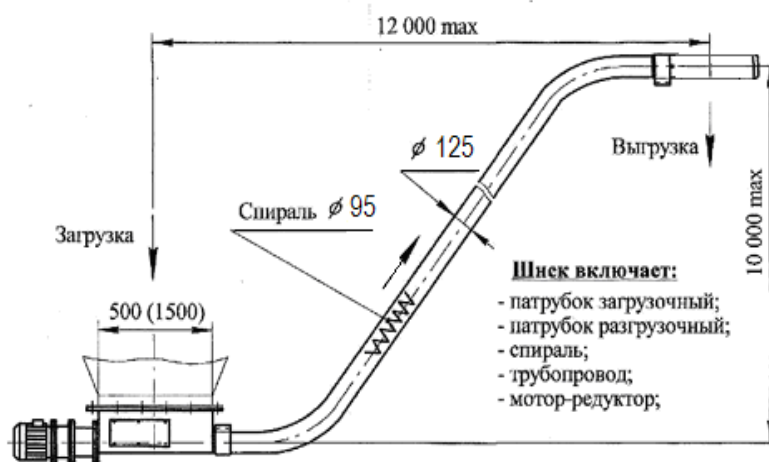


Рисунок 3.3 – Спирально–винтовой конвейер

К достоинствам такой конструкции можно отнести:

- «простоту конструкции и монтажа транспортной системы;
- возможность оптимального выбора трассы, в том числе криволинейной и в разных плоскостях;
- отсутствие потерь продукта и пыли;
- низкое энергопотребление и бесшумность в работе;
- низкую стоимость» [31].

Таким образом, новые конструктивные элементы предлагаемого конвейера приводят к более высокому техническому уровню: повышают надежность транспортирования хлебопекарной муки и других сыпучих материалов, снижают энергоемкость, снижают износ корпуса и самого рабочего органа винтового конвейера, а тем самым повышают срок службы предлагаемого устройства.

### 3.5 Расчёт характеристик электропривода спирально – винтового конвейера

Данный раздел выполнен в соответствии с рекомендациями В.А. Денисова изложенными в учебном пособии «Электропривод переменного тока с частотным управлением» [28].

#### 3.5.1 Расчёт параметров асинхронного двигателя

Справочные данные асинхронного двигателя IMM90L2

Синхронная частота вращения  $n = 3000$   
об/мин

Номинальная мощность  $P_H = 2.2 \text{ кВт}$

КПД  $\eta = 0,835$

Коэффициент мощности двигателя  $\cos \phi_n = 0,87$

Номинальное фазное напряжение  $U_{\phi H} = 220 \text{ В}$

Число фаз обмотки статора  $m_1 = 3$

Параметры Г – образной схемы замещения в относительных единицах:

Главное индуктивное сопротивление  $x'_{\mu} = 2.7$

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора  $x'_1 = 0,050$

Активное сопротивление рассеяния обмотки статора  $r'_1 = 0.076$

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора  $x''_2 = 0,087$

Активное сопротивление рассеяния обмотки ротора  $r''_2 = 0.049$

##### 3.5.1.1 Расчет номинального фазного тока статора:

$$I_{\phi H} = \frac{P_2}{m_1 \cdot U_{\phi H} \cdot \cos \varphi \cdot \eta} = \frac{2200}{3 \cdot 220 \cdot 0,87 \cdot 0,835} = 4,58 \text{ A} \quad (3.12)$$

#### 3.5.1.2 Расчет индуктивного сопротивления рассеяния

$$x_1 \cong \frac{2x'_1 \cdot x_\mu}{x_\mu + \sqrt{x_\mu^2 + 4x'_1 x_\mu}} = \frac{2 \cdot 0,050 \cdot 2,7}{2,7 + \sqrt{2,7^2 + 4 \cdot 0,050 \cdot 2,7}} = 0,04. \quad (3.13)$$

#### 3.5.1.3 Расчет активного сопротивления рассеяния

$$r_1 = r'_1 \cdot x_1 / x'_1 = 0,076 \cdot 0,04 / 0,05 = 0,06. \quad (3.14)$$

3.5.1.4 Определение коэффициента перевода относительных единиц в физические согласно формуле [28]:

$$c = \frac{U_{\phi H}}{I_{\phi H}} = \frac{220}{4,58} = 48 \quad (3.15)$$

#### 3.5.1.5 Расчет активного сопротивления обмотки статора

$$R_s = r_1 \cdot c = 0,06 \cdot 48 = 2,8 \text{ Ом}. \quad (3.16)$$

#### 3.5.1.6 Расчет взаимной индуктивности фаз ротора и статора

$$L_m = \frac{x_\mu \cdot c}{2\pi f} = \frac{2,7 \cdot 48}{314} = 0,4127 \text{ Гн}. \quad (3.17)$$

#### 3.5.1.7 Определение полной индуктивности фазы статора

$$L_s = \frac{(x_\mu + x_1) \cdot c}{2\pi f} = \frac{(2,7 + 0,04) \cdot 48}{314} = 0,4188 \text{ Гн} \quad (3.18)$$

#### 3.5.1.8 Определение активного сопротивления обмотки ротора

$$R_r = \frac{r_2'' \cdot c}{c_1^2} = \frac{0,049 \cdot 48}{1,25^2} = 1,505 \text{ Ом} \quad (3.19)$$

$$\text{где: } c_1 = \frac{x'_1}{x_1} = \frac{0,05}{0,04} = 1,25$$

#### 3.5.1.9 Определение полной индуктивности фаз ротора

$$L_r = \frac{(x_\mu + \frac{x_2''}{c_1^2}) \cdot c}{2\pi f} = \frac{(2.7 + \frac{0.087}{1.25^2}) \cdot 48}{314} = 0.421 \text{ Гн} \quad (3.20)$$

3.5.1.10 Расчет коэффициента электромагнитной связи ротора и статора

$$k_s = \frac{L_m}{L_s} = \frac{0.4127}{0.4188} = 0.985, \quad k_r = \frac{L_m}{L_r} = \frac{0.4127}{0.421} = 0.980 \quad (3.21)$$

3.5.1.11 Расчет коэффициент рассеяния обмоток

$$\sigma = (1 - k_s \cdot k_r) = (1 - 0.985 \cdot 0.980) = 0.034 \quad (3.22)$$

3.5.1.12 Расчет переходной индуктивности статора

$$L'_s = L_s \cdot \sigma = 0.4188 \cdot 0.034 = 0.014 \text{ Гн} \quad (3.23)$$

3.5.1.13 Расчет переходного активного сопротивления статора

$$R'_s = R_s + k_r^2 \cdot R_r = 2.8 + 0.98^2 \cdot 1.505 = 2.245 \text{ Ом} \quad (3.24)$$

3.5.1.14 Расчет индуктивного сопротивления намагничивающего контура

$$x_\mu = 2\pi f \cdot L_m = 314 \cdot 0.4127 = 129.58 \text{ Ом} \quad (3.25)$$

3.5.1.15 «Расчет индуктивного сопротивления рассеяния статора

$$x_{s\sigma} = 2\pi \cdot f (L_s - L_m) = 314 \cdot 0.0061 = 1.915 \text{ Ом} \quad (3.26)$$

3.5.1.16 Определение индуктивного сопротивления рассеяния ротора, приведенного к статору

$$x'_{r\sigma} = 2\pi \cdot f (L_r - L_m) = 314 \cdot 0.008 = 2.6 \text{ Ом} \quad (3.27)$$

3.5.2 Определение механических характеристик асинхронного двигателя при частотном скалярном управлении

3.5.2.1 Расчет критического момента механических характеристик

$$M_{KX} = \frac{3h^2 \cdot U_{SH}^2}{2 \cdot f_s^* \cdot \omega_{SH} \cdot \left[ R_s \pm \sqrt{R_s^2 + \left( \frac{1}{f_s^*} \cdot x_k \right)^2} \right]} =$$

$$\frac{3 \cdot 220^2}{2 \cdot 314 \cdot 1.8 + \sqrt{2.8^2 + 4.7^2}} = 27.95 \text{ Нм} \quad (3.28)$$

$$f_s^* = 1;$$

$$h = 1.$$

### 3.5.2.2 Вращающий момент двигателя

$$M_x = \frac{3 \cdot 220^2 \cdot 1.505 \cdot h^2 \cdot S_x}{314 \cdot \left[ 2.8 \cdot S_x + 1.505 \right] + \left[ 4.7 \cdot f_s^* \cdot S_x \right] \cdot f_s^*} =$$

$$= \frac{695.94 \cdot h^2 \cdot S_x}{2.8 \cdot S_x + 1.505 + 4.7 \cdot f_s^* \cdot S_x \cdot f_s^*}. \quad (3.29)$$

На рисунке 3.4 представлен скрипт для расчета и построения семейства механических характеристик в программе MATLAB, в соответствии с рисунком 3.5.

Из анализа полученных характеристик можно сделать вывод, 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 критического момента двигателя спирально-винтового конвейера необходимо величину питающего напряжения на статоре в процессе регулирования уменьшать в меньшей степени, чем частоту» [28].

```

%Задание величины скольжения, относительно частоты и напряжения:
s=[0.001:0.005:0.5];f=1;h=1;
%вычисление угловой скорости вращения ротора, принимаем Wsh= 314 рад/сек,
%обозначаем угловую скорость вращения ротора w=y:
[y1]=314*f*(1-s);
%Вычисление момента двигателя, обозначаем момент M=x:
[x1]=695.94*h.^2*s./(((2.8*s+1.505).^2+(4.7*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]=314*f*(1-s);
[x2]=695.94*h.^2*s./(((2.8*s+1.505).^2+(4.7*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]=314*f*(1-s);
[x3]=695.94*h.^2*s./(((2.8*s+1.505).^2+(4.7*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]=314*f*(1-s);
[x4]=695.94*h.^2*s./(((2.8*s+1.505).^2+(4.7*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]=314*f*(1-s);
[x5]=695.94*h.^2*s./(((2.8*s+1.505).^2+(4.7*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 3.4 – Расчет механических характеристик

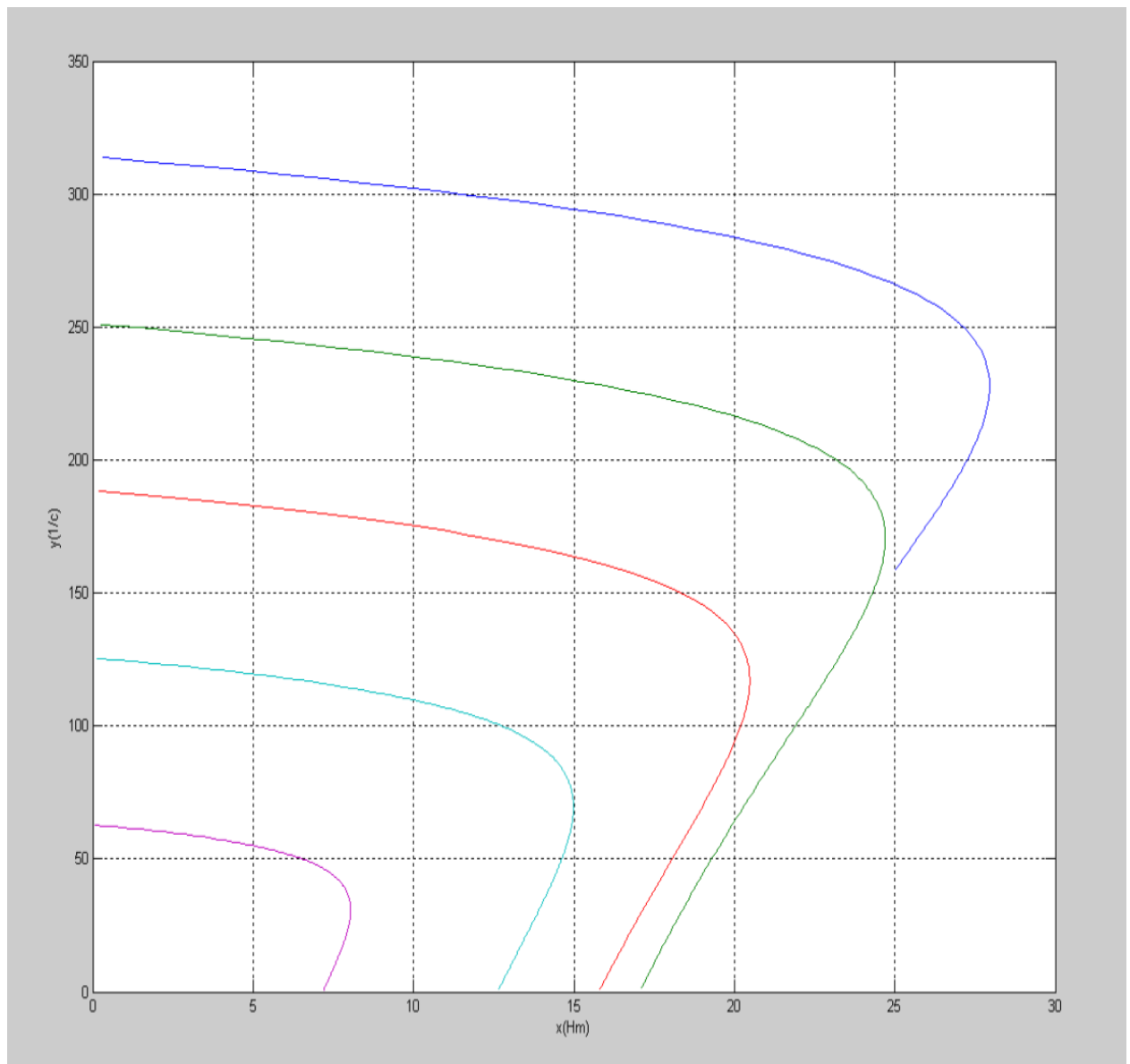


Рисунок 3.5 - Механические характеристики асинхронного двигателя

при частотном регулировании  $U_s / f_s = const$

«Для построения механических характеристик при  $M_k = const$  необходимо вычислить относительные величины напряжения на статоре двигателя при изменении частоты, используя следующее выражение» [28]:

$$27.95 = \frac{3 \cdot h^2 \cdot 220^2}{2 \cdot 314 \cdot f_s^* \cdot \left[ 2.8 + \sqrt{2.8^2 + \left( f_s^* \cdot 4.7 \right)^2} \right]} \quad (3.30)$$

В ходе расчета получаем:



- 1) при  $f_s^* = 0.2$  величина  $h = 0.372$ ;
- 2) при  $f_s^* = 0.4$  величина  $h = 0.546$ ;
- 3) при  $f_s^* = 0.6$  величина  $h = 0.700$ ;
- 4) при  $f_s^* = 0.8$  величина  $h = 0.850$ .

На основе полученных результатов расчета построена функциональная зависимость  $h = \varphi(f_s^*)$ , график которой представлен на рисунке 3.6.

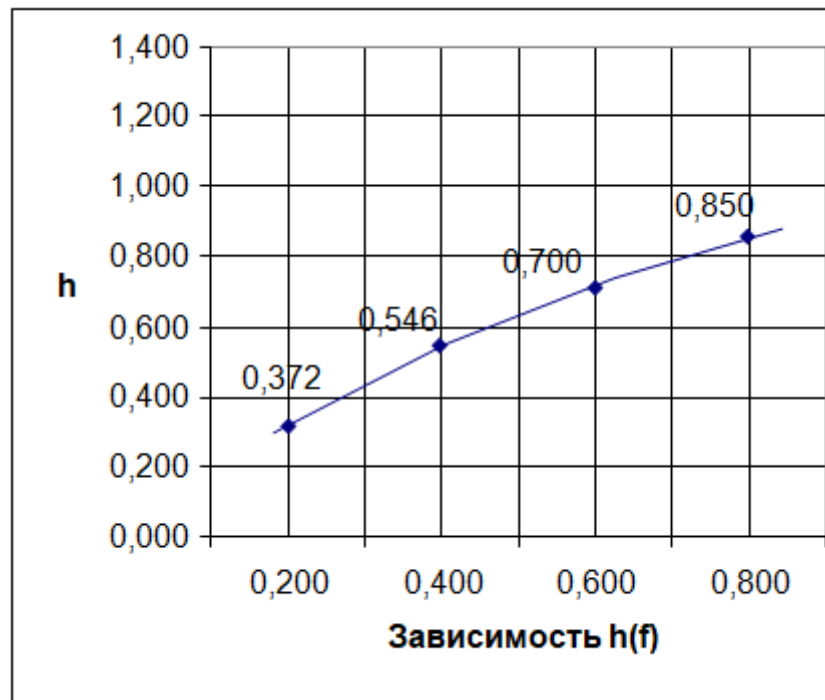


Рисунок 3.6 - Зависимость

Для обеспечения регулировки скорости вращения ротора электродвигателя с постоянным моментом требуется реализовать пропорциональное частотное регулирования с  $I \cdot r$  компенсацией.

Далее, для расчета и построения семейства механических характеристик с  $I \cdot r$  компенсацией в программе MATLAB, составлен скрипт в соответствии с рисунком 3.7. Семейства механических характеристик с  $I \cdot r$  компенсацией представлены на рисунке 3.8.

```

%Задание величины скольжения, относительно частоты и напряжения:
s=[0.001:0.005:0.5];f=1;h=1;
%вычисление угловой скорости вращения ротора, принимаем Wsh= 314 рад/сек,
%обозначаем угловую скорость вращения ротора w=y:
[y1]=314*f*(1-s);
%Вычисление момента двигателя, обозначаем момент M=x:
[x1]=695.94*h.^2*s./(((2.8*s+1.505).^2+(4.7*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=0.85;[y2]=314*f*(1-s);
[x2]=695.94*h.^2*s./(((2.8*s+1.505).^2+(4.7*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=0.7;[y3]=314*f*(1-s);
[x3]=695.94*h.^2*s./(((2.8*s+1.505).^2+(4.7*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=0.546;[y4]=314*f*(1-s);
[x4]=695.94*h.^2*s./(((2.8*s+1.505).^2+(4.7*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=0.372;[y5]=314*f*(1-s);
[x5]=695.94*h.^2*s./(((2.8*s+1.505).^2+(4.7*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 3.7 – Скрипт вычисления механических характеристик с  $I \cdot r$  компенсацией

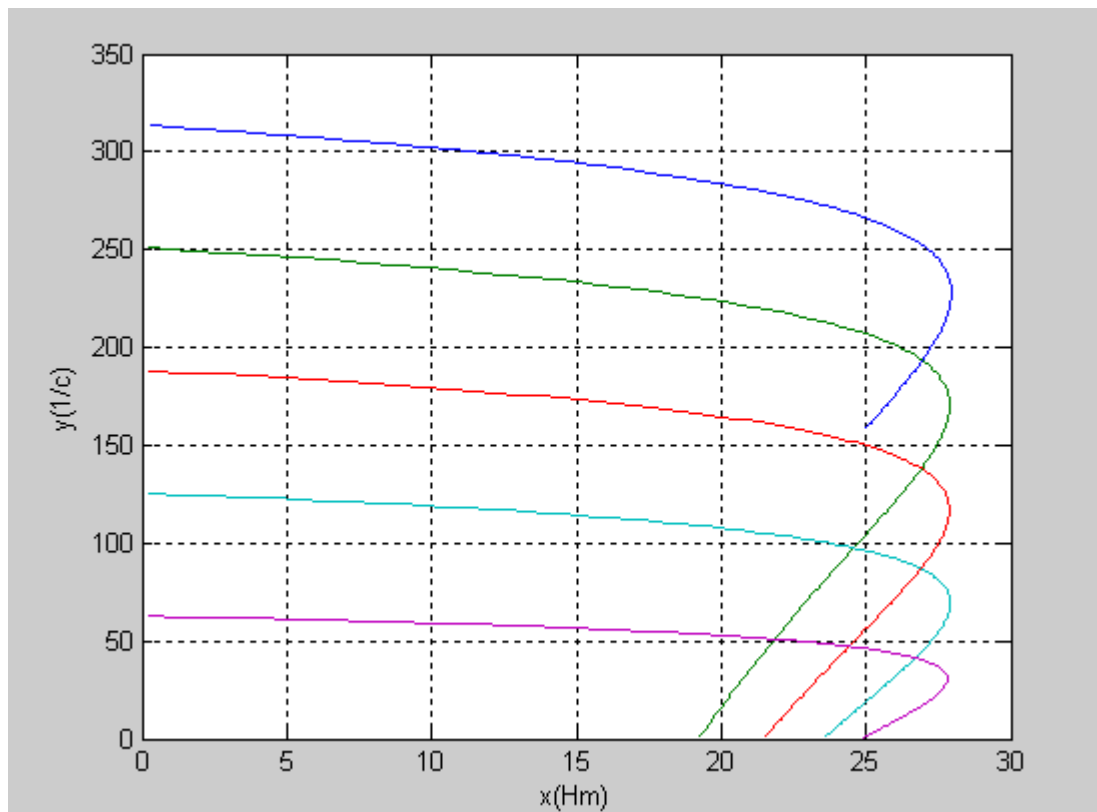


Рисунок 3.8 – Механические характеристики при пропорциональном частотном регулировании с  $I \cdot r$  компенсацией

3.5.3 «Математическое моделирование режимов работы электропривода с частотным управлением» [28].

«Для математического описания и моделирования асинхронного электропривода с частотным управлением обобщенные векторы величин асинхронного двигателя записываются в ортогональной системе координат  $\alpha, \beta$ , неподвижной относительно статора» [28]:

$$U_s = U_{s\alpha} + j \cdot U_{s\beta}; i_s = i_{s\alpha} + j \cdot i_{s\beta}; \psi_s = \psi_{s\alpha} + j \cdot \psi_{s\beta}; \psi_r = \psi_{r\alpha} + j \cdot \psi_{r\beta}. \quad (3.31)$$

«Система координат  $\alpha, \beta$  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  $\alpha$  совпадает с магнитной осью

фазы  $a$  реальной асинхронной машины. Отсюда проекция тока  $i_{s\alpha}$  будет равна реальному току двигателя» [28].

Составим уравнения асинхронного двигателя при  $\omega_K = 0$  и  $U_r = 0$ .

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\psi_{s\alpha}}{d\alpha} &= U_{s\alpha} - R_s \cdot i_{s\alpha}; \quad \frac{d\psi_{r\alpha}}{d\alpha} = -R_r \cdot i_{r\alpha} - p_{II} \cdot \omega \cdot \psi_{r\beta}; \\ \frac{d\psi_{s\beta}}{d\alpha} &= U_{s\beta} - R_s \cdot i_{s\beta}; \quad \frac{d\psi_{r\beta}}{d\alpha} = -R_r \cdot i_{r\beta} + p_{II} \cdot \omega \cdot \psi_{r\alpha}. \end{aligned} \right\} \quad (3.32)$$

$$\left. \begin{aligned} \psi_{s\alpha} &= L_s \cdot i_{s\alpha} + L_m \cdot i_{r\alpha}; \quad \psi_{r\alpha} = L_m \cdot i_{s\alpha} + L_r \cdot i_{r\alpha}; \\ \psi_{s\beta} &= L_s \cdot i_{s\beta} + L_m \cdot i_{r\beta}; \quad \psi_{r\beta} = L_m \cdot i_{s\beta} + L_r \cdot i_{r\beta}. \end{aligned} \right\} \quad (3.33)$$

Определение токов из уравнения (3.5.22):

$$\left. \begin{aligned} i_{s\alpha} &= \frac{1}{L'_s} \cdot \psi_{s\alpha} - \frac{k_r}{L'_s} \cdot \psi_{r\alpha}; \quad i_{r\alpha} = -\frac{k_s}{L'_r} \cdot \psi_{s\alpha} + \frac{1}{L'_r} \cdot \psi_{r\alpha}; \\ i_{s\beta} &= \frac{1}{L'_s} \cdot \psi_{s\beta} - \frac{k_r}{L'_s} \cdot \psi_{r\beta}; \quad i_{r\beta} = -\frac{k_s}{L'_r} \cdot \psi_{s\beta} + \frac{1}{L'_r} \cdot \psi_{r\beta}, \end{aligned} \right\} \quad (3.34)$$

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;

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

$$\left. \begin{aligned} i_{s\alpha} &= 62,5 \cdot (\psi_{s\alpha} - 0,980 \cdot \psi_{r\alpha}); \quad i_{r\alpha} = 62,5 \cdot (\psi_{r\alpha} - 0,985 \cdot \psi_{s\alpha}); \\ i_{s\beta} &= 62,5 \cdot (\psi_{s\beta} - 0,980 \cdot \psi_{r\beta}); \quad i_{r\beta} = 62,5 \cdot (\psi_{r\beta} - 0,985 \cdot \psi_{s\beta}), \end{aligned} \right\} \quad (3.35)$$

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» [28, с.57].

$$M_{\vartheta} = \frac{3}{2} \cdot p_{\Pi} \cdot \psi_{s\alpha} \cdot i_{s\beta} - \psi_{s\beta} \cdot i_{s\alpha} \approx 1,5 \psi_{s\alpha} \cdot i_{s\beta} - \psi_{s\beta} \cdot i_{s\alpha} \quad (3.36)$$

«Уравнение движения двигателя в одномассовой системе, имеет вид» [28]:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J_{\Sigma}} \cdot (M_{\vartheta} - M_c) \approx 1/0,003 (M_{\vartheta} - M_c) \quad (3.37)$$

где « $J_{\Sigma}$  - приведенный суммарный момент инерции ротора и механизма;

$M_c$  - статический момент нагрузки» [28].

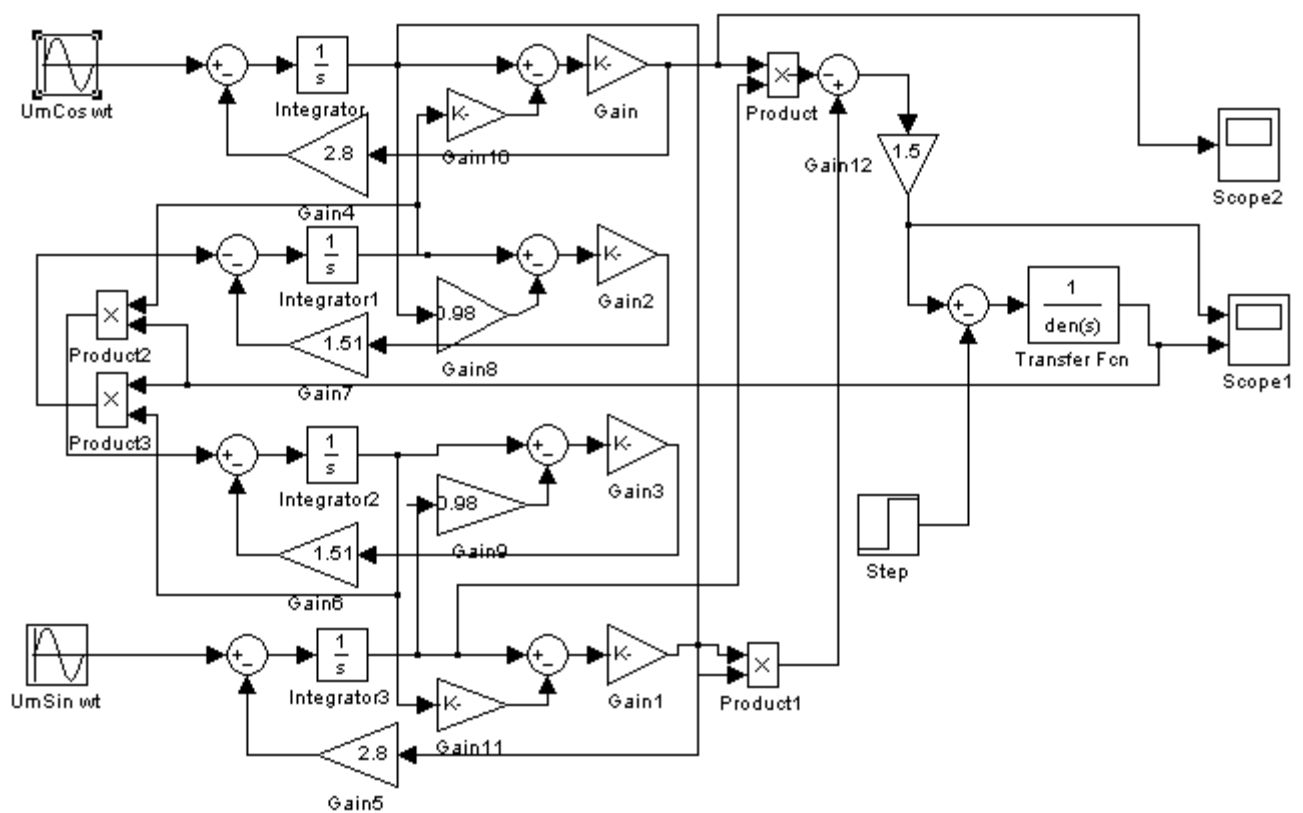


Рисунок 3.9 – Математическая модель асинхронного двигателя

с короткозамкнутым ротором в неподвижной системе координат  $(\alpha, \beta)$

Математическая модель асинхронного двигателя построена по уравнениям (3.5.21 – 3.5.25) в системе координат  $\psi, \beta$  и приведена на рисунке 3.9

«В качестве входных напряжений  $U_{s\alpha}$  и  $U_{s\beta}$  подаются сигналы от источников SineWave» [28, с. 69]:

$$U_{s\alpha} = U_m \cdot \sin\left(\omega_0 t + \frac{\pi}{2}\right) = U_m \cdot \cos \cdot \omega_0 t; \quad (3.38)$$

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

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 – 314 rad/sec и фазу колебаний – 1,57 rad, а в окне настройки блока SineWave 1 задать амплитуду - 310, круговую частоту – 314 rad/sec и 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» [28, с. 69].

«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» [28, с. 69].

Схема модели приведена на рисунке 3.10. В указанной схеме изменение  $\omega_0$  и  $U_m$  во времени, т. е. интенсивность частотного пуска, задается задатчиком интенсивности, в который входят блоки Gain, Integrator и Saturation.

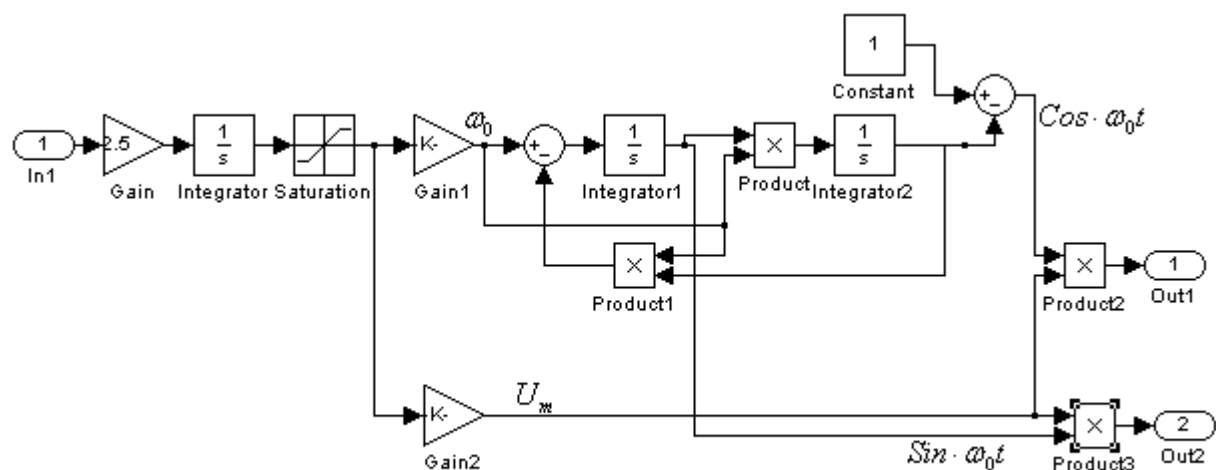


Рисунок 3.10 – Схема модели IGBT – Inverter

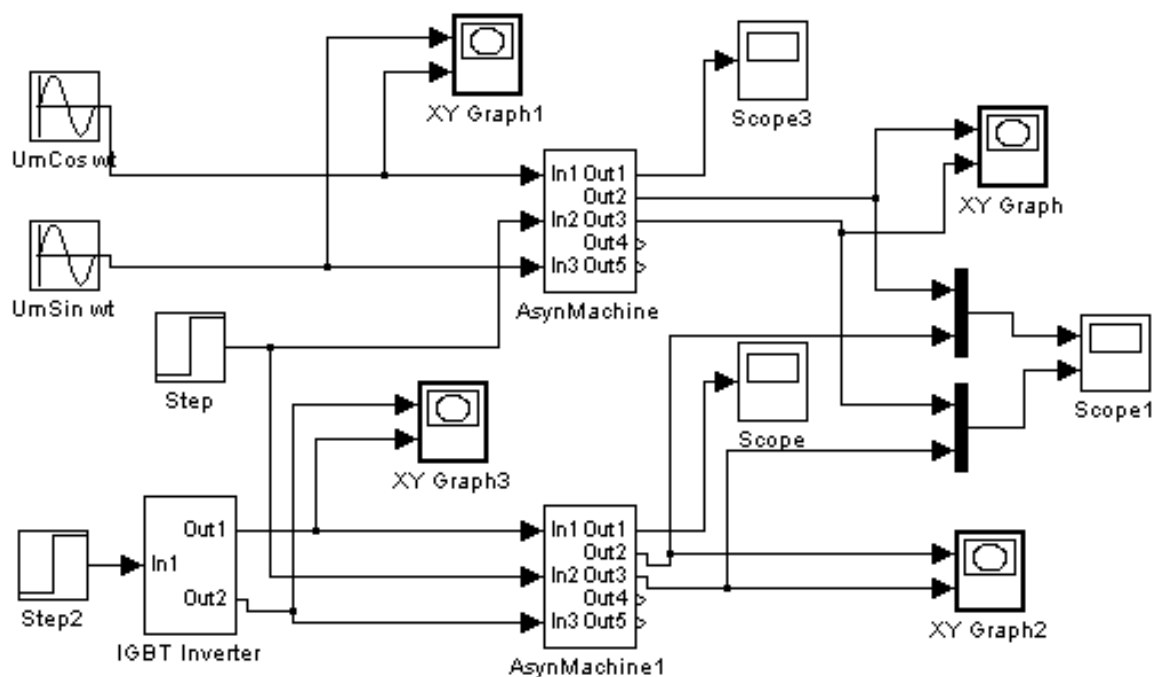


Рисунок 3.11 - Схема математического моделирования прямого и частотного пусков асинхронного электропривода

Схема математического моделирования в соответствии с рисунком 3.11 состоит из двух частей, что позволяет проводить сравнительные исследования и анализ электромеханических процессов двух электроприводов.

Верхняя часть схемы рисунка 3.11 моделирования содержит свернутую (subsystem) модель асинхронного двигателя AsynMachine, идеальные источники питания  $U_m \cos \omega_0 t$  и  $U_m \sin \omega_0 t$ , графопостроители  $x_u$  Graph1,  $x_u$  Graph и осциллограф Scope3. Эта часть схемы модели позволяет исследовать электромеханические процессы прямого пуска асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

Нижняя часть схемы рисунка 3.11 модели представляет собой систему идеальный преобразователь частоты (IGBT-Inverter) – асинхронный двигатель (AsynMachine 1), графопостроители  $x_u$  Graph2,  $x_u$  Graph3 и осциллограф Scope. Эта часть модели позволяет проводить исследования электромеханических процессов асинхронного электропривода с пропорциональным законом скалярного частотного управления.

Управляющий сигнал в виде единичного ступенчатого воздействия подается от блока Step2 на вход In1 блока IGBT-Inverter. Для получения сравнительных осциллограмм используется общий осциллограф Scope1. На входы In1 и In3 модели AsynMachine подаются сигналы вида  $U_{s\alpha}$  и  $U_{s\beta}$ , на вход In2 – сигнал момента сопротивления нагрузки. С выхода Out1 снимается ток  $I_{s\alpha}$ , равный току фазы А, с выхода Out2 – электромагнитный момент  $M_\Delta$  и с выхода Out3 – угловая скорость ротора  $\omega$ .

На рис. 3.12,а приведены сравнительные осциллограммы электромагнитного момента  $M_\Delta$  и угловой скорости ротора  $\omega$  асинхронного двигателя при прямом пуске (кривые 1) и частотном пуске (кривые 2). При частотном пуске использовался пропорциональный закон частотного управления  $U_s / f_s = const$ . Как видно из осциллограмм, электромагнитный момент  $M_\Delta$  двигателя при частотном пуске поддерживается в среднем на одном уровне, что позволяет обеспечить постоянный динамический момент и плавный



разгон двигателя. При этом отсутствует ударный вращающий момент, и движение ротора двигателя начинается мягко.

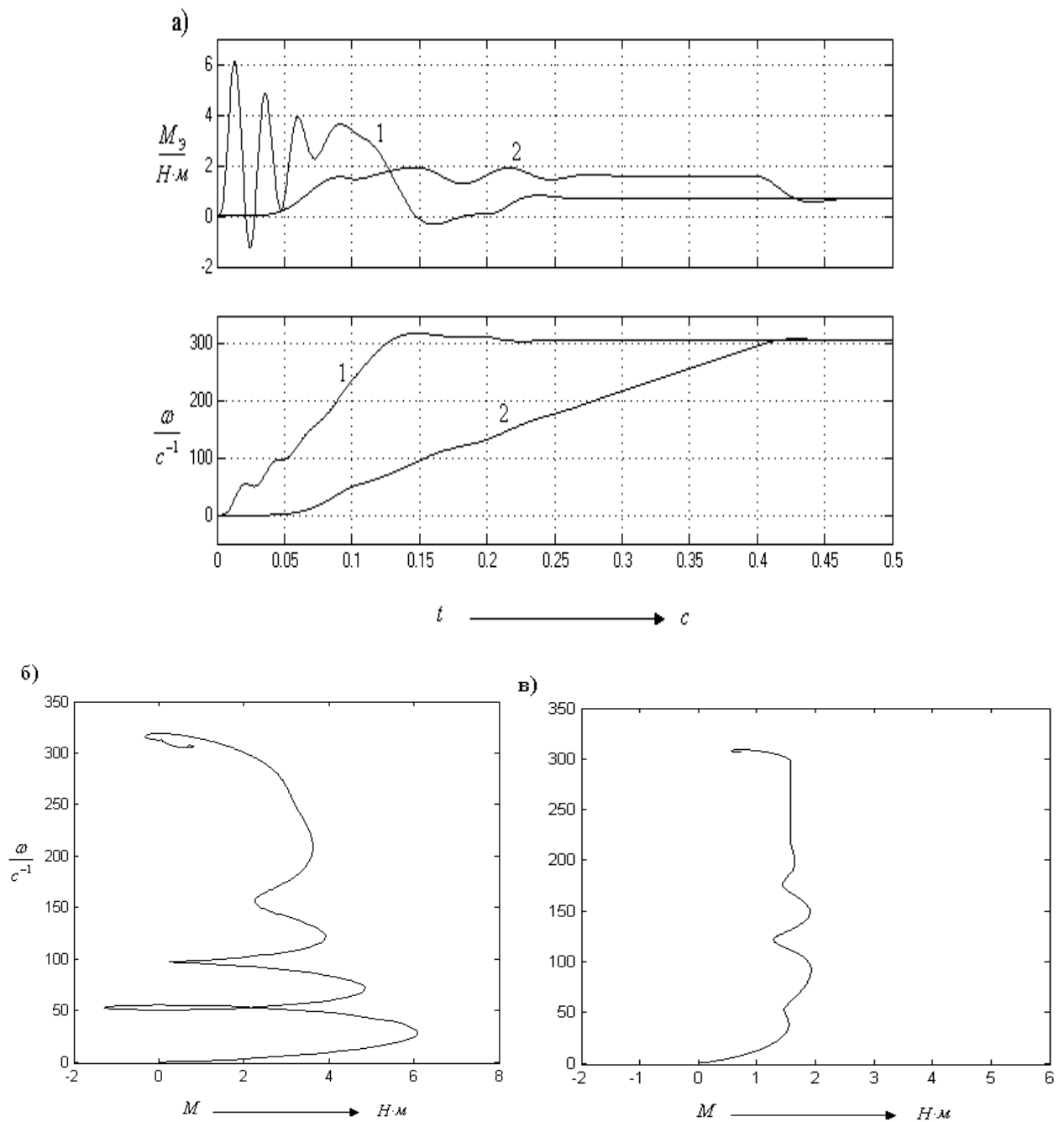


Рисунок 3.12 - Результаты моделирования процессов пуска асинхронного двигателя

Сравнение динамических характеристик  $\omega = f(M)$  показывает, что частотное управление пуском позволяет приблизить характеристику (рис. 3.12,в) к кривой, обеспечивающей пуск двигателя с более постоянным

моментом по сравнению с характеристикой (рис. 3.12,б) прямого пуска асинхронного двигателя.

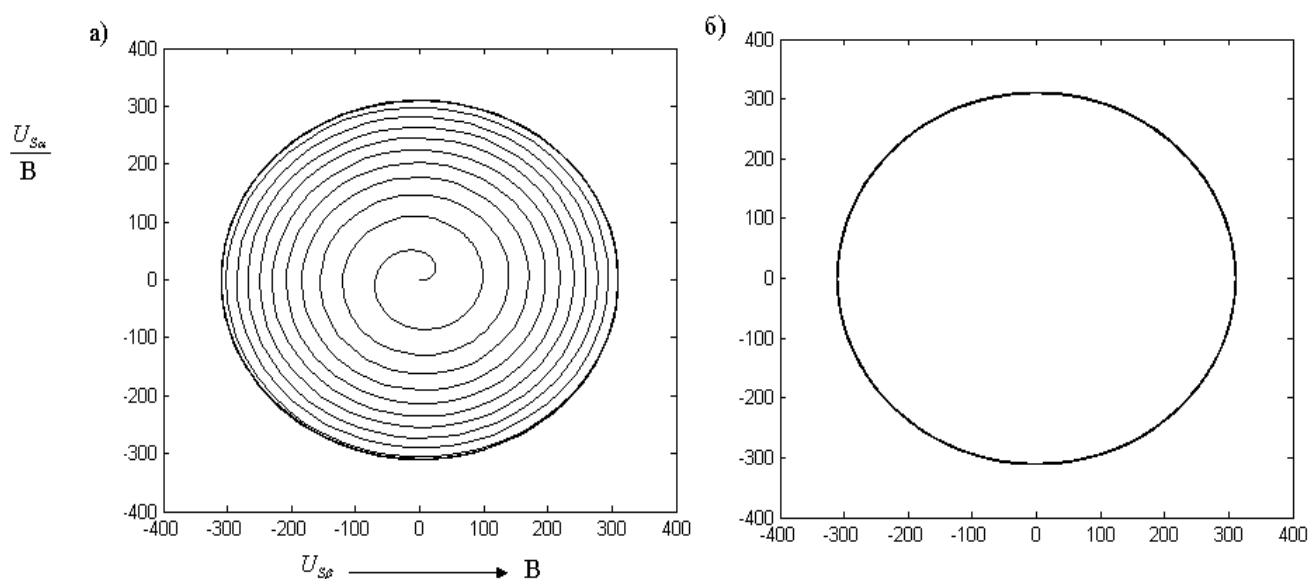


Рис. 3.13 - Годографы вектора статорного напряжения:

*a* – при пропорциональном частотном пуске; *б* – при прямом пуске

При сравнении годографов вектора статорного напряжения можно отметить, что годограф (рис.3.13,*a*) 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 *xу Graph*, 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.

### Выводы к главе 3

В главе 3 доказана целесообразность применения винтового конвейера спирально – винтовой конструкции с частотно регулируемым электроприводом,

позволяющим снизить эксплуатационные затраты. Для получения заданной производительности конвейера рассчитана необходимая мощность электродвигателя, в соответствии с которой выбран мотор-редуктор S.T.MIMM90L2S4 мощностью 2.2 кВт, 375 об/мин.

Плавный пуск конвейера возможен при использовании частотного преобразователя, для выбора которого проведен расчет силового канала.

При расчёте силового канала был определён максимальный ток, проходящий через ключи инвертора, который составил 9.1 А.

По этим данным был выбран преобразователь частоты Schneider Electric ATV312HU30N4, мощностью 3 кВт и выходным током 10.9 А.

Оценить технические характеристики спроектированного электропривода позволило математическое моделирование электромеханической системы привода конвейера.

Работа привода с постоянным моментом нагрузки на валу во всём диапазоне регулирования возможна лишь при использовании  $I \cdot r$  компенсации напряжения статора. Результаты моделирования переходных процессов подтвердили целесообразность модернизации привода, динамические нагрузки не превышают 15 Нм, что исключает поломки спирали и других механизмов конвейера.

#### 4 Оценка эффективности технических решений

На основании линейной схемы электроснабжения кондитерской фабрики «Услада» в соответствии с рисунком 1 было доказано, что имеется структурное резервирование линии электропитания. Оно заключается в наличии двух независимых трансформаторных подстанций, каждая из которых может осуществлять электроснабжение кондитерской фабрики. Известно [21], что при параллельном соединении двух резервируемых цепей результирующая надежность системы повышается.

Одним из показателей надежности системы является коэффициент вынужденного простоя, который определяется по формуле [21, с. 38]:

$$K_B = \frac{\omega * T_B}{8760}, \quad (4.1)$$

где  $\omega$  – количество отказов в год;

$T_B$  – среднее время одного отказа

Известно [21], что чем меньше данный коэффициент, тем выше надежность системы. Исходя из данных об отказах за 2017 год, указанных в таблице 1, среднее время восстановления электроснабжения на кондитерской фабрике:

$$T_{B1} = \frac{T_{\text{сумм}}}{\omega} = \frac{2,91}{6} = 0,485 \text{ час} \quad (4.2)$$

Определим коэффициент вынужденного простоя:

$$K_{B1} = \frac{6 * 0,485}{8760} = 3,32 * 10^{-4} \quad (4.3)$$

При внедрении АВР в систему электроснабжения кондитерской фабрики среднее время вынужденного простоя оборудования:

$$T_{B2} = 0,8 \text{ сек} = 2,22 * 10^{-4} \text{ час} \quad (4.4)$$

Тогда коэффициент вынужденного простоя при внедрении АВР составит:

$$K_{B2} = \frac{6 * 2,22 * 10^{-4}}{8760} = 1,52 * 10^{-7} \quad (4.5)$$

Как видно из полученных результатов, при внедрении в систему электроснабжения автоматического ввода резерва, коэффициент вынужденного

простоя многократно уменьшается, а, следовательно, надежность системы повышается.

В результате замены асинхронного привода шнека подачи муки на привод с преобразователем частоты возросла его ремонтпригодность, уменьшилось количество аварийных поломок оборудования, возрос интервал между плановым ремонтнообслуживанием, сократилось время восстановления работоспособного состояния оборудования. Все эти параметры входят в показатель надежности, а, следовательно, надежность работы электромеханического оборудования повысилась.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе разработан алгоритм выбора вида АВР для системы электроснабжения предприятия, проведен выбор типа АВР, доказана целесообразность применения винтового конвейера спирально – винтовой конструкции с частотно регулируемым электроприводом, позволяющим снизить эксплуатационные затраты. Для получения заданной производительности конвейера рассчитана необходимая мощность электродвигателя, в соответствии с которой выбран мотор-редуктор S.T.MIMM90L2S4 мощностью 2.2 кВт, 375 об/мин.

Плавный пуск конвейера возможен при использовании частотного преобразователя, для выбора которого проведен расчет силового канала.

При расчёте силового канала был определён максимальный ток, проходящий через ключи инвертора, который составил 9.1 А.

По этим данным был выбран преобразователь частоты Schneider Electric ATV312HU30N4, мощностью 3 кВт и выходным током 10.9 А.

Оценить технические характеристики спроектированного электропривода позволило математическое моделирование электромеханической системы привода конвейера.

Работа привода с постоянным моментом нагрузки на валу во всём диапазоне регулирования возможна лишь при использовании  $I \cdot r$  компенсации напряжения статора. Результаты моделирования переходных процессов подтвердили целесообразность модернизации привода, динамические нагрузки не превышают 15Нм, что исключает поломки спирали и других механизмов конвейера.

Таким образом, поставленная цель повышения надежности электромеханического оборудования кондитерской фабрики достигнута и все поставленные задачи решены.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Правила устройства электроустановок: Издание шестое и седьмое (все действующие разделы) [Электронный ресурс] : утверждены Приказом Минэнерго России от 08.07.2002 № 204 URL: <http://electrica.pro/sites/default/files/ПУЭ.pdf/> (дата обращения: 02.03.2018)
2. Кривоногов, Н.А. Общая электротехника [Электронный ресурс] : учебное пособие / Н.А. Кривоногов и др.; под ред. Л.А. Потапова. - Ростов н/Д : Феникс, 2016. - (Высшее образование). - URL: <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785222257203.html> (дата обращения: 03.04.2018)
3. Шабанов В. А., Юсупов Р. З. Автоматический ввод резерва на НПС и направления его совершенствования/ В.А. Шабанов, Р.З. Юсупов //Инновационные направления развития электропривода, электротехнологии и электрооборудования: межвузовский сборник научных трудов (по материалам научно-технического семинара с международным участием). – 2012. – С. 118.
4. Техническая информация: сайт научно-производственной компании «Промир» [Электронный ресурс] : URL: [http://www.npkpromir.com/index.php/production/1-bavr/3-bavr\\_\\_](http://www.npkpromir.com/index.php/production/1-bavr/3-bavr__) (дата обращения: 03.04.2018)
5. Автоматическое включение резерва [Электронный ресурс] :Книги для электрика и энергетика – Электрон. журн. – Режим доступа: URL: <http://www.energy-book.ru/2013/09/blog-post.html> (дата обращения: 03.04.2018)
6. Обеспечение бесперебойного электроснабжения [Электронный ресурс] : Электротехнический интернет-портал – Статьи и обзоры – Режим доступа: URL: <http://www.elec.ru/articles/obespechenie-besperebojnogo-elektrosnabzheniya/> (дата обращения: 03.04.2018)
7. Бесконтактная коммутационная аппаратура в сетях 10/6/0,4 кВ. Разработка и опыт эксплуатации. [Электронный ресурс] : 2012. – 27с URL: <http://ipe.ru/download/bkavs.pdf> (дата обращения: 03.04.2018)

8. ГОСТ 27.002- 2015 Надежность в технике. Термины и определения. [Текст]. – Введ. 2017-03-01. – 23 с.
9. ГОСТ 27.310- 95 Надежность в технике. Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения. [Текст]. – Введ. 1997-01-01. – 14 с.
10. ГОСТ 27.301- 95 Надежность в технике. Расчет надежности. Основные понятия.[Текст]. – Введ. 1997-01-01. – 19 с.
11. Amuzuvi, C. K. and Addo, E. (2015), “A Microcontroller-Based Automatic Transfer Switching System for a Standby Electric Generator”, *Ghana Mining Journal*, Vol. 15, No. 1, pp. 85 - 92.
12. Girish Hunswadkar, N.R. Viju Easun Reyrolle Ltd. Considerations and Methods for an Effective Fast Bus Transfer System / conference «Power system Protection and Automation», December 2010, New Delhi, India [Электронный ресурс] : URL: [http://www.erlphase.com/downloads/papers/CBIP2010\\_Considerations\\_And\\_Methods\\_For\\_Effective\\_FBT.pdf](http://www.erlphase.com/downloads/papers/CBIP2010_Considerations_And_Methods_For_Effective_FBT.pdf) (дата обращения: 02.03.2018)
13. Tony Zhao, Powell Industries Inc. LubomirSevov and Craig Wester, GE Digital Energy Multilin. Advanced Bus Transfer and Load Shedding Applications with IEC61850 [Электронный ресурс] : URL: <https://www.1-3.com/wp-content/uploads/2011/04/Advanced-Bus-Transfer-and-Load-Shedding-Applications-with-IEC61850.pdf> (дата обращения: 02.03.2018)
14. Assis LS, Gonza' lez JFV, Usberti FL, Lyra C, Cavellucc C, Zuben FJV. Switch allocation problems in power distribution systems. IEEE Trans. Power Syst. 2015; 30(1): 246–53
15. Pfitscher LL, Bernardon DP, Canha LN, Montagner VF, Garcia VJ, Abaide AR. Intelligent system for automatic reconfiguration of distribution network in real time. Electr Power Syst Res 2013;97:84–92
16. Ray S et al., Optimal allocation of remote control switches in radial distribution network for reliability improvement, Ain Shams Eng J (2016),



[Электронный ресурс] : URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.asej.2016.01.001> (дата обращения: 02.03.2018)

17. Гайдукевич, Я.В. Решение по автоматическому переключению резерва на базе АВР HAGER в электроустановках до 1600А и его преимущества. / Я.В. Гайдукевич// Промышленный электрообогрев и электроотопление, [Электронный ресурс] : 2011. - №3 – С.32-37 URL: [http://www.hagersystems.ru/public/pdf/hager\\_N3\\_2011.pdf.pdf](http://www.hagersystems.ru/public/pdf/hager_N3_2011.pdf.pdf) (дата обращения: 02.03.2018)

18. Устройства автоматического ввода резерва тиристорные быстродействующие ТАВР-0,4, статические переключатели нагрузки [Электронный ресурс] : – Статьи и обзоры – Режим доступа: URL: [http://www.roselco.ru/catalog/bespereboynoe\\_energосnabzhenie/ustroystva\\_avtomaticheskogo\\_vvoda\\_rezerva\\_tiristornye\\_bystrodeystvuyushchie\\_tavr-0-4\\_staticheskie\\_pe/](http://www.roselco.ru/catalog/bespereboynoe_energосnabzhenie/ustroystva_avtomaticheskogo_vvoda_rezerva_tiristornye_bystrodeystvuyushchie_tavr-0-4_staticheskie_pe/) (дата обращения: 02.03.2018)

19. Кокушин, Н.Н. Надежность машин и оборудования : учебное пособие / Н.Н. Кокушин, А.А. Тихонов, С.Г. Петров, В.Е. Головкин, И.В. Ключкин; СПбГТУРП. – СПб., 2013. -67с.: ил. 12.

20. Юлдашева, А.И. Учет показателей надежности при планировании режима промышленной системы электроснабжения с собственными электростанциями / А.И. Юлдашева, А.В. Малафеев // Электроэнергетика ЭСик. №3(28) – 2015. – С.36-40

21. Сафонов, В.И. Надежность систем электроснабжения: Учебное пособие/ В.И. Сафонов, П.В. Лонзингер – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2014. – 90 с.

22. Алферова, Т. В. Надежность электроснабжения потребителей агропромышленного комплекса : учеб. пособие / Т. В. Алферова, О. Ю. Пухальская, А. А. Алферов ; М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2017. – 112 с.

23. Дьяков, А.Ф. Надежность систем энергетики: Проблемы, модели и методы их решения / А.Ф. Дьяков, В.А. Стенников, С.М. Сендеров и др.; отв. ред. Н.И.Воропай. – Новосибирск: Наука, 2014. – 284 с., [0,4]л. вкл.
24. Закирова, А.Р. Управление процессами/ А.Р. Закирова. – Казань: Казан. Ун-т, 2015. – 86 с.
25. Татарьянц М.С., Завинский С.И., Трошин А.Г. Разработка методики расчёта нагрузок на шнек и энергозатрат шнековых прессов // Международный научный журнал «ScienceRise» №6/2(11) 2015. – С. 80 - 84
26. Орлов Д.А., Третьякова М.Н. Повышение надежности системы электроснабжения кондитерской фабрики // Развитие инструментов управления научной деятельностью: сборник статей Международной научно - практической конференции (18 мая 2017 г., г. Уфа). В 4 ч. Ч.2 / - Уфа: – С. 113-116.
27. Дмитрий Алексеевич Орлов Повышение надежности работы технологического оборудования кондитерской фабрики // Физико - математические и технические науки как постиндустриальный фундамент эволюции информационного общества: сборник статей Международной научно - практической конференции (25 марта 2018 г, г. Самара). - Уфа: ОМЕГА САЙНС, 2018. – 371с. – С. 60-62.
28. Денисов, В. А. Электроприводы переменного тока с частотным управлением : учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению "Электроэнергетика и электротехника" / В. А. Денисов. - Старый Оскол : ТНТ, 2015. -163 с.
29. Сариллов, М.Ю. Расчет шнековых механизмов : методические указания к практическим работам по дисциплинам «Конструирование и расчет элементов оборудования отрасли» и «Конструирование и расчет машин и аппаратов отрасли» / сост. : М.Ю. Сариллов, В.И. Шатохин. – Комсомольск-на –Амуре : ФГБОУ ВПО «КНАГТУ», 2015. – 12с.

30. Отводы - гибкие транспортеры из ПВХ с одним раструбом [Электронный ресурс] : URL: <https://kondhp.tiu.ru/p275907233-otvody-gibkie-transportery.html> (дата обращения: 02.03.2018)
31. Сурашов, Н. Т. Расчет винтовых конвейеров. Методические указания к курсовому проекту по дисциплине «Подъемно-транспортные машины» для специальности 5В071300 «Транспорт, транспортная техника и технологии». / сост. Н. Т. Сурашов, М. И. Гудович, Л. Д. Мукиева – Алматы: КазНТУ им. К. И. Сатпаева, 2014. – С. 1–32.