

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

Институт химии и энергетики  
(наименование института полностью)

---

Кафедра «Электроснабжение и электротехника»  
(наименование)

13.04.02 Электроэнергетика и электротехника  
(код и наименование направления подготовки)

---

Техническое и информационное обеспечение интеллектуальных систем электроснабжения  
(направленность (профиль))

## **ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)**

на тему Применение энергосберегающих технологий на установках подачи и фильтрации смазывающей охлаждающей жидкости в механообрабатывающем производстве

Студент

Р. В. Спиридонов  
(И.О. Фамилия)

---

(личная подпись)

Научный  
руководитель

к.т.н., доцент Ю.В. Черненко  
(ученая степень, звание И.О. Фамилия)

---

Тольятти 2021

## Содержание

Введение.....	4
1 Анализ устройств и принципа действия насосных установок фильтрации СОЖ в механосборочных производствах.....	7
1.1 Принцип действия насосных установок фильтрации смазочно–охлаждающей жидкости.....	7
1.2 Насосные системы установок фильтрации и подачи СОЖ.....	21
1.3 Устройство центробежного насосного агрегата.....	25
1.4 Способы и методы снижения энергопотребления в насосных системах и ее оптимизация.....	27
2 Выбор оптимального способа управления насосными агрегатами для снижения энергопотребления технологического оборудования на действующем производстве.....	31
2.1 Энергетическая диаграмма работы насосных установок.....	33
2.2 Международные стандарты, регламентирующие энергоэффективность электрических машин.....	43
2.3 Внедрение частотно-регулируемого электропривода в насосных установках.....	46
2.4 Специализированные и стандартные преобразователи частоты для работы с насосными агрегатами.....	52
2.5 Снижение энергопотребления за счет частотного регулирования в насосных установках механообрабатывающих производств.....	55
2.6 Разработка структурной и электрической схемы частотного электропривода для действующих насосных агрегатов.....	58
3 Экономическая эффективность внедрения преобразователей частоты на системных насосах установок фильтрации охлаждающей жидкости.....	64

3.1 Методы оценки экономического эффекта от внедрения ЧПП и расчет эффективности.....	66
3.2 Расчет экономического эффекта от внедрения ЧПП на установках подачи СОЖ.....	67
3.3 Расчет экономического эффекта от внедрения ЧПП на установках подачи СОЖ.....	70
Заключение .....	75
Список используемых источников.....	76
Приложение А Схема обвязки цепей питания PLC Mitsubishi .....	80
Приложение Б Схема обвязки входов и выходов программируемого контроллера Mitsubishi .....	81
Приложение В Схема запуска «звезда – треугольник» для электродвигателя насоса подачи .....	82

## Введение

В 60х годах, когда в СССР массово стали строить новые автомобилестроительные заводы, было принято считать, что энергия и ресурсы практически неограниченны, а тарифы на электрическую энергию были низкими, но сейчас на фоне постоянно растущих цен на энергоносители рациональное использование энергоресурсов стало крайне актуально.

В связи с этим во всех сферах промышленного производства полным ходом идут доработки действующего оборудования, которое давало бы возможность достигать максимально возможного показателей КПД при минимальных затратах на его эксплуатацию.

В структуре общего потребления электроэнергии очень большую часть потребляют насосные установки и системы вентиляции и кондиционирования воздуха. На действующих механообрабатывающих производствах достаточно большое количество мощных насосных установок, которые качают масло для подачи в гидростанции оборудования, подают смазывающую и охлаждающую жидкости, применяемые в процессе механической обработки металла. Например, в бумагоделательных машинах энергопотребление насосов составляет порядка 25%, в отраслях водоснабжения – до 50%.

Таким образом, вопрос эффективности определенных отраслей будет напрямую зависеть от того, как будет эксплуатироваться насосное оборудование. Если объединить все потребление энергии насосным оборудованием, то это потребление составит около 40% от общих затрат энергии в промышленности в целом.

На автомобильных заводах применяется множество насосных установок, обслуживающих определенные технологические цепочки. На механообрабатывающих производствах достаточно большое количество мощных насосных установок, которые качают масло для подачи в

гидростанции оборудования, подают смазочно-охлаждающие жидкости (СОЖ), которые применяются в процессе механической обработки металла, которые потребляют значительное количество электроэнергии. Данные насосы могут быть как децентрализованными, так и централизованными. Такие централизованные насосные установки широко применялись во времена СССР.

Так как при существующем способе регулировании напора значительная часть энергии передаваемой двигателем, вращающимся на номинальных оборотах, фактически расходуется на преодоление сопротивления дросселирующих элементов, то энергопотребление данных установок является не оптимальным.

Так как подобных установок в механообрабатывающих производствах АО «АВТОВАЗ» установлено более 80 шт., а общее количество насосов смазочно-охлаждающих жидкостей мощностью от 30 до 55 кВт, работающих на них более 400, то тема снижения энергопотребления таких установок является крайне актуальной.

Целью диссертационной работы является: оптимизация энергопотребления работы насосных установок подачи смазочно-охлаждающей жидкости на технологическое оборудование механообрабатывающего производства с учетом всех имеющихся технологических ограничений.

Для этого необходимо решить следующие задачи:

1. Анализ устройств и принципа действия насосных установок фильтрации СОЖ в механосборочных производствах.
2. Выбор оптимального способа управления насосными агрегатами для снижения энергопотребления технологического оборудования на действующем производстве с учетом имеющихся технологических ограничений.

3. Оценка экономической эффективности внедрения преобразователей частоты на системных насосах установок фильтрации охлаждающей жидкости.

# **1 Анализ устройств и принципа действия насосных установок фильтрации СОЖ в механосборочных производствах**

## **1.1 Принцип действия насосных установок фильтрации смазочно–охлаждающей жидкости**

На данный момент на механообрабатывающих производствах АО «АВТОВАЗ» установлено (как уже говорилось) более 80 установок централизованной подачи и очистки смазочно – охлаждающей жидкости (СОЖ).

Насосные системы подачи СОЖ могут быть как децентрализованными, чаще всего не большой мощности, так и централизованными, т.е. насосные установки будут обслуживать группу технологического оборудования. Такие централизованные насосные установки применялись во времена СССР на практически всех автомобильных заводах страны, где они так и продолжают работать. Основная часть энергоемких процессов в технологическом оборудовании представляет из себя нестационарный процесс.

В зависимости от того как загружено оборудование в течение суток процессы в при которых работают насосные установки как правило, случайный представляют некий вероятностный характер, а текущие параметры технологического процесса (подача, давление), которые поддерживают такой процесс, в течение времени работы технологического оборудования значительно колеблется во времени [15].

И это все в значительной мере осложняет выбор насосных и вентиляторных систем, что в свою очередь усложняет процесс управления ими. Для механосборочных производств ОА «АВТОВАЗ» на данный момент характерно применение централизованных систем подачи охлаждающих жидкостей, как на основе СОЖ, так и на основе маслянно-керосиновое охлаждение (МР-8).



а)



б)

Рисунок 1 – Насосные установки подачи СОЖ

а) централизованная б) децентрализованная

Как таковая установка для фильтрации и подачи смазывающих охлаждающих жидкостей представляет собою площадку с установленными на ней насосными агрегатами общим количеством до 7 шт., приводимых во вращения асинхронными двигателями, которые включаются в сеть на прямую. Также в состав установки входят системы фильтрации и очистки СОЖ; аппаратуры регулирующей трубопроводы и шкафов управления, в которых смонтирована электроаппаратура управления [1]. Регулировка давления осуществляется вручную при помощи установленных на трубопроводах дросселирующих элементов, основываясь на показании манометров и в зависимости от потребностей технологического оборудования. Насосные агрегаты для данного оборудования монтируются на отметке - 9 (минус девять) метров в подвальных помещениях технологического корпуса, откуда напорные трубопроводы идут до отметки + (плюс) 9 метров и далее разводятся на каждое технологическое оборудование своими индивидуальными трубопроводами. Шкафы управления насосами находятся или на отметке 0 метров на полу корпуса или же на антресолях на высоте + (плюс) 6 метров. Органы управления насосами



монтируются на дверях шкафов управления, а также имеется возможность управления в ручном режиме непосредственно на месте установки насоса и двигателя от пультов местного управления, находящихся непосредственно рядом с двигателем насоса. Внешний вид шкафа управления установкой представлен на рисунке 2.

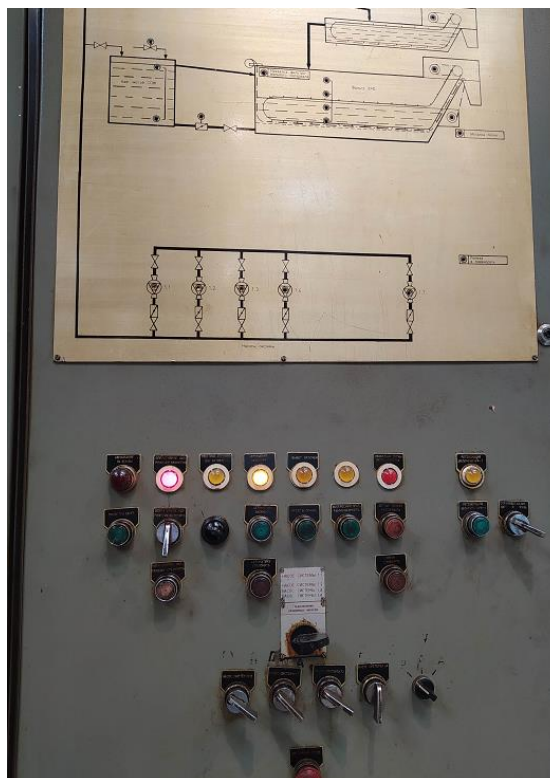


Рисунок 2 – Внешний вид шкафа управления установки ЗУФ

Такие установки фильтрации и подачи смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) состоят из нескольких центробежных насосов (основных и резервного), подключаемых к промышленной сети и управляемых пускателями (рисунок 3); системы фильтрации, аэрации и очистки жидкости от стружки и абразивных частиц и различных элементов запорной аппаратуры, изображенной на рисунке 4, на котором показана структурная схема установки СОЖ.

Емкость накопительных баков таких насосных систем составляет от 24 до 120 кубических метров, в зависимости от объема обслуживаемого технологического оборудования и того, какой это бак, грязевой или чистой.

Данные баки установлены в подвальных помещениях на отметке минус 6 метров под цехами с действующим технологическим оборудованием, куда по системам приемных лотков сливается загрязненная СОЖ и далее она по магистральному трубопроводу поднимается обратно в цех на отметку + 9 метров от уровня пола, где она разводится по отдельным трубопроводам к каждому конкретному технологическому оборудованию.

Регулирование давления в подобной рода системах поддерживается в ручном режиме дроссельными элементами ориентируясь на показания манометров, установленных на трубопроводах и будет зависеть от необходимости и потребностей оборудования.

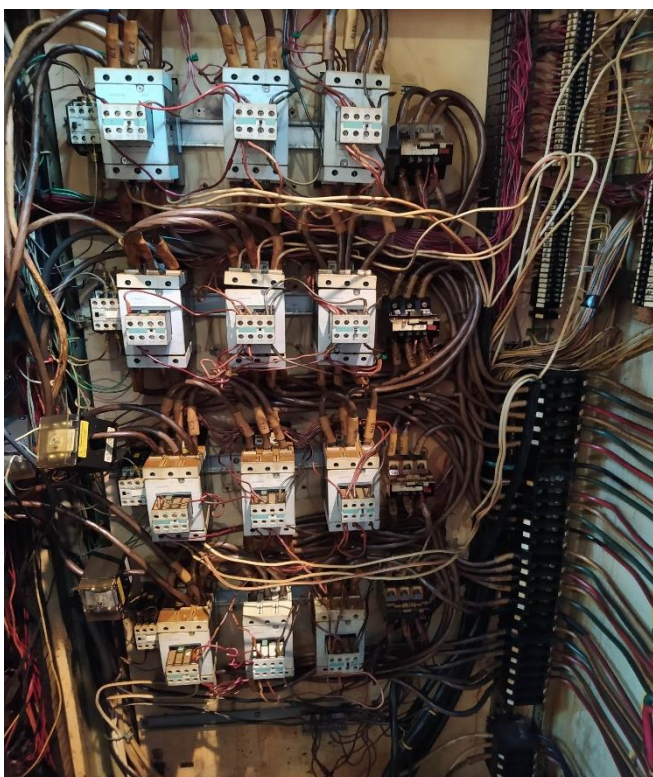


Рисунок 3 – Внешний вид шкафа управления насосами подачи СОЖ

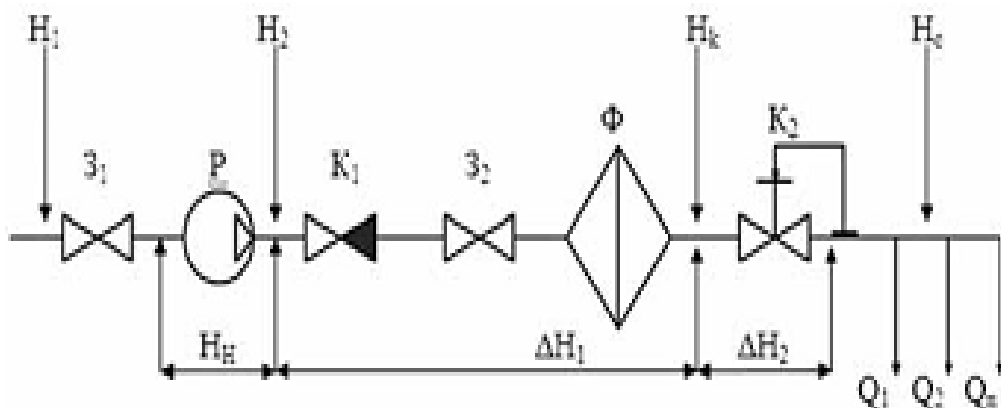


Рисунок 4 – Структурная схема установки подачи и очистки ОЖ технологического оборудования

Условные обозначения:  $Z_1, Z_2$  – задвижки;  $P$  – насос;  $K_1$  – обратный клапан;  $\Phi$  – фильтр;  $K_2$  – регулирующий клапан;  $H_1$  – напор, создаваемый источником подачи воды;  $Q_1 \dots Q_n$  – расходы СОЖ потребителями;  $H_1$  – потери напора на задвижке  $Z_2$  и фильтре;  $H_2$  – потери напора на регулирующем клапане.

Данные системы подачи и очистки СОЖ работают в 3х сменном режиме, а в выходные дни для предотвращения «застоя» СОЖ включается так называемый воскресный режим.

Система очистки СОЖ построена на базе скребковых конвейеров и систем аэрации СОЖ, так как СОЖ имеет органическую структуру. Крупная стружка, шлам, мусор и прочие отходы, появляющиеся в результате обработки металла осаждаются на дне грязевого бака и на фильтрующих сетках, установленных выше дна. Эти сетки задерживают крупный мусор (в зависимости от размера их ячейки), а оставшийся СОЖ перекачивается в чистовой бак [16].

На выходе со скребкового конвейера установлены системы сепарации отходов по фракциям. Отходы в зависимости от того, какой материал обрабатывается на данной группе оборудования (цветные или черные

металлы) и каким способом (резание шлифовка полировка и т.д.) сепарируются магнитным сепаратором и отводятся в разные конвейерные системы (рисунок 5), а затем сортируются для вывоза на переработку.



Рисунок 5 – Конвейерная система удаления стружки

Остатки от шлифовальных камней. Мелкая взвесь, грязь и т.д. очищаются с помощью фильтровальной бумаги, которая в зависимости от своей загрязненности протягивается по сигналу с поплавкового датчика уровня и далее бумага и шлам вывозятся на или же захоронение на полигонах бытовых отходов или на переработку. Внешний вид сменного фильтропалотна и систем замкнутой очистки, в которых происходит многократная очистка фильтрующего элемента представлен на рисунке 6.



Рисунок 6 – Система удаления фильтропалотна

При работе таких систем потребляется огромное количество электрической энергии и при этом общий КПД таких насосных систем при действующем способе регулирования подачи крайне низок, что указывает на необходимость внедрения иных способов управления в этих установках [17]-[18].

Технологическая схема (мнемосхема) работы установки ЗУФ показана на рисунке 7.

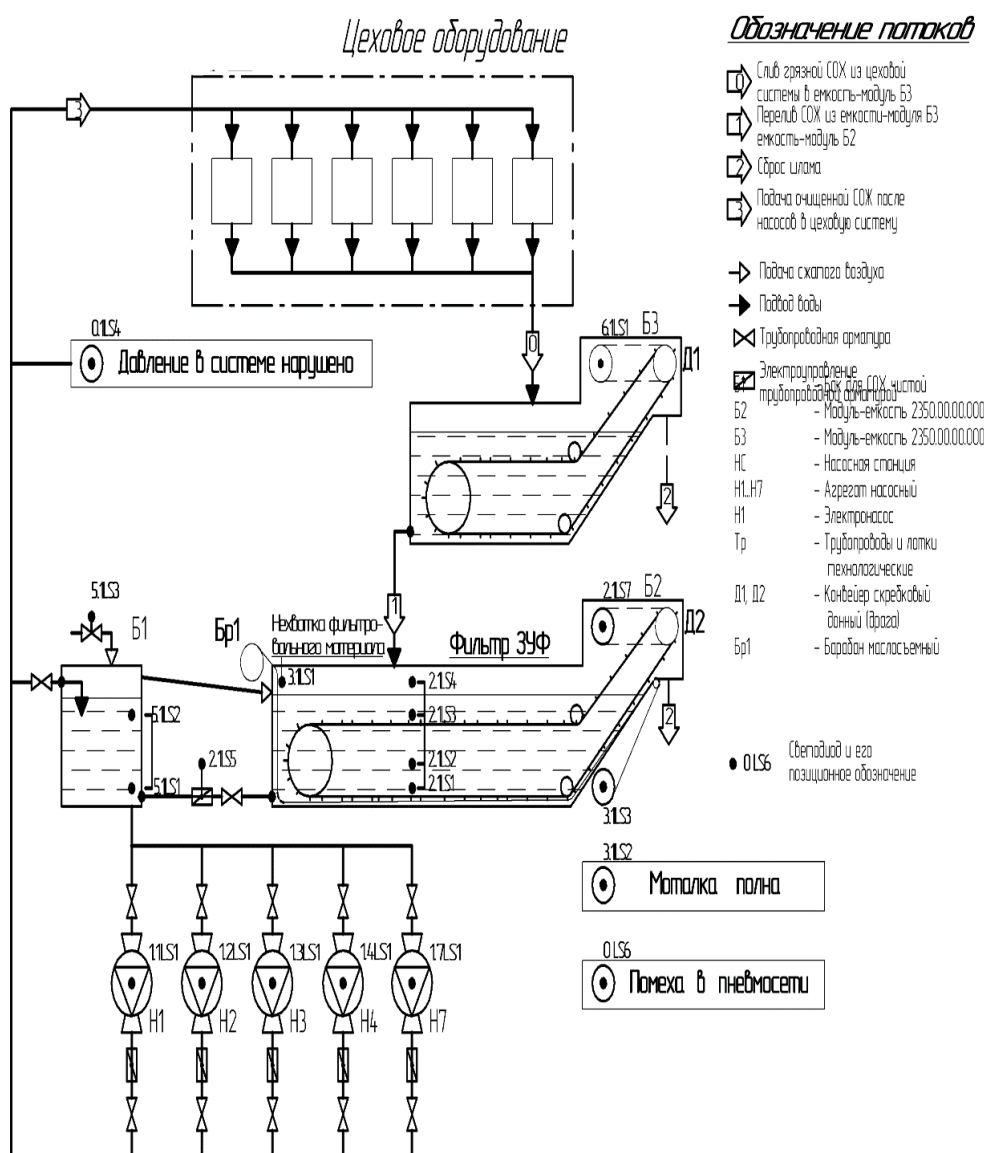


Рисунок 7 – Технологическая схема установки централизованной подачи и фильтрации СОЖ

Рассмотрим принципы функционирования отдельных систем установки фильтрации в соответствии с технологической схемой, представленной на рисунке 7.

Загрязненная СОЖ после использования в станке стекает в предварительный накопительный бак, так называемый грязный бак, в котором после осаждения находящихся в ней крупных загрязняющих веществ они удаляются скребковым конвейером, при этом на выходе эти частицы сепарируются на фракции. Привод самого скребкового конвейера защищается от перегрузки фрикционной муфтой, которая проскальзывает и конечный выключатель, установленный на приводном валу и отключит сам приводной электродвигатель [3].

Задняя часть грязевого бака отделена наклонным вынимаемым щелевым фильтром и образует камеру высасывания для фильтрационных насосов. Ширина ячеек щелевого фильтра составляет 2 мм, при этом сам фильтр непрерывно очищается от отложений грязи скребковым конвейером.

Основные насосы нагоняют предварительно очищенную СОЖ через расположенный выше пола полосовой фильтр в бак с чистой эмульсией (чистовой бак). Из него эмульсия накачивается насосами в систему подающих трубопроводов, откуда разводится по станкам. В случае выхода из строя любого основного насоса его работу должен выполнять резервный насос.

Перед переливным устройством на установке находится поплавок, предназначенный для сбора и удаления из эмульсии посторонних или выпавших из нее масел, таким образом собранное масло отделяется от СОЖ в маслоотделителе. При этом масло будет собираться в отдельный бачок, а эмульсия соответственно возвращаться в грязевой бак. Емкость бака для сбора масла составляет 500 литров. Устройства аэрации эмульсии в грязевом и чистовом баках служат для перемешивания СОЖ, что направлено на сохранение ее свойств и ее более длительному использованию, так как СОЖ

имеет в своем составе органические вещества, которые в случае отсутствия насыщения кислородом могут испортиться и в СОЖ начинают происходить процессы ее разложения и гниения с выделением сероводорода, что крайне негативно влияет на качество воздуха как в подвальном помещении, так и в и на отметках выше нулевого уровня в цеху.

Система аэрации питается от сети сжатого воздуха, при помощи редукторного вентиля с манометром снижается с давления системы т 4,5-6 кг/см<sup>2</sup> до 0,5 кг/см<sup>2</sup>. В случае необходимости ремонта баков СОЖ из чистового бака с помощью резервного насоса отводиться в специально предусмотренный для этого резервуар, при этом основные насосы могут продолжать подавать жидкость в грязный бак до тех пор, пока они не будут остановлены, по датчику «Бак пустой». Это касается также и резервного насоса, когда он будет выключен, то опорожнение остатков может осуществляться насосом маслоотделителя [2]-[6].

При включении в работу насоса подачи СОЖ на установке важно соблюдать последовательность действий. Для этого надо открыть клапан к трубопроводу для подачи жидкости гидравлического затвора и в случае необходимости для подвода охлаждающей жидкости и проверить проток, если требуется открыть также и главный клапан в трубопроводе для уравнивания вакуума и задвижку притока. Выключить двигатель при открытом приточном трубопроводе и закрытой пусковой задвижке. Как только электродвигатель достигает своей номинальной частоты, после запуска на пониженном напряжении и переходе на номинальное, необходимо регулирующей элемент, установленный на напорном трубопроводе открыть на столько, что бы насос смог достичь предписанную высоту напора. При этом высота, умноженная на плотность (удельный вес) рабочей жидкости показывается на манометре системы, который установлен на напорном патрубке.

При этом производительность насоса может быть определена по потреблению тока электродвигателя. Потребление электроэнергии

двигателем насоса будет увеличиваться по мере повышения производительности самого насоса при понижающем напоре насоса.

При этом насос разрешается запускать только из состояния покоя, чтобы избежать его поломки, в случае если обратный клапан не герметичен. Иначе после выключения насоса, стекающая обратно из напорного трубопровода может вызвать обратное вращение электродвигателя насоса, которое при подаче на двигатель напряжения может привести к избыточным пусковым токам, что может вызвать срабатывание защиты электродвигателя или даже срезание шпонки и деформацию его вала.

Для выключения насосной установки требуется также соблюдать определенную последовательность действий. Вначале необходимо закрыть задвижку в напорном трубопроводе, чтобы предупредить гидравлический удар от столба жидкости, который в случае отсутствия или не работоспособности обратного клапана. При наличии и работоспособности обратного клапана задвижка может оставаться открытой. В этом случае при отключении питания двигателя закрывается задвижка в приточном трубопроводе, а только затем прекращается подача жидкости, а в случае необходимости следует закрыть также еще и главный клапан в трубопроводе для уравнивания вакуума [7].

При работе установки ЗУФ необходимо строго контролировать следующие моменты:

1) Насосный агрегат должен работать спокойно и без рывков и посторонних шумов.

2) Уровень охлаждающей жидкости в резервуарах всегда должен быть на достаточном уровне, т.е. выше входного отверстия приточного или всасывающего трубопровода.

3) Приводной электродвигатель не должен работать с перегрузкой.

4) Категорически не рекомендуется работа насосного агрегата “на сухую” или же при закрытом напорном трубопроводе.



5) необходимо контролировать температурный режим, как насоса, так и приводного электродвигателя.

6) При наличии охлаждаемых сальников насос или при присоединении для подвода жидкости гидравлического затвора клапана в соответствующих трубопроводах во время эксплуатации никогда не должны быть полностью закрытыми.

В случае проведения ремонтных работ на установке возможность управления двигателя при помощи ключевого выключателя в шкафу управления, который изображен на рисунке 8.



Рисунок 8 – Пакетный выключатель двигателя насосного агрегата подачи СОЖ

При условии переключения индивидуальных выключателей приводов в позицию «Ручной режим» можно запускать двигатели насосов непосредственно с местных пультов управления, расположенных в подвальном помещении.

Установки фильтрации имеют несколько фиксированных режимов работы: «Автоматический режим», режим «Выбег», «Воскресный режим».

При автоматическом режиме ЗУФ включается кнопкой «Автоматический цикл». При этом происходит пуск насосов системы на пониженном напряжении, затем активируется регенерация ЗУФ через вакуумный контактный манометр. При этом автоматический цикл регенерации длится по времени в зависимости от требований технологии, при этом изначально он настроен на 5 часов и имеет возможность регулировки.

Режим работы «Выбег» включают при общем отключении установки, но при этом еще включается и регенерация фильтра для готовности к фильтрации при новом пуске. При нажатии кнопки «Выбег включить» включается режим по истечении установленного времени выбега (диапазон 1 час). При этом одновременно с включением выбега включается принудительная регенерация фильтра, управление насосами по давлению остается работоспособна.

Воскресная программа предназначена для отключения установки с целью продления срока службы СОЖ. Для этого установку ставят на циркуляцию через байпасный клапан между баком с очищенной СОЖ и фильтром. Для этого подключают насос системы. Циркуляция проводится в интервалах, то есть работа и простой оборудования чередуются. При этом оба этих временных параметра можно настраивать в пределах до 60 часов [8]-[10].

В момент действия программы регенерация фильтра остается в работе, а фильтр маслоотделитель не функционирует, также не работает и конвейер стружкоудаления.

Также на установке предусмотрено наличие звуковой и световой сигнализации о наличии неисправностей и помех в работе установки, которые можно сбросить соответствующими кнопками квитирования помех.

Основные насосы системы подают СОЖ из баков в следующих случаях:

- 1) нормальная работа (СОЖ подается из фильтра);
- 2) регенерация фильтра (СОЖ подается из бака с чистой СОЖ в подающую линию системы).

При этом насосы соответственно управляются в соответствии с выбранной автоматической программой: «Автоматический режим», режим «Выбег», «Воскресный режим». Для каждого насоса, за исключением резервного будет установлен пульт местного управления, расположенный в подвальном помещении непосредственно у насосного агрегата. При этом будут доступны два режима работы: Автоматический режим в составе установки или ручной долговременный режим работы.

Любой основной насос может быть заменен путем ввода в работу резервного агрегата. Одновременное включение всех насосов в работу заблокировано защитой от «сухого хода», как в автоматическом, так и в ручном режиме в случае минимального уровня СОЖ. Для резервного насоса есть переключатель для выбора замененного им насоса по номеру.

При включении регенерации открывается непосредственно байпасный клапан, что ведет к уменьшению вакуума в фильтре, после чего системные насосы подают СОЖ из чистового бака.

После открытия байпасного клапана и включения режима регенерации по сигналу реле времени по истечении времени сброса вакуума включается привод драги по очистке грязевого бака накопителя. У привода драги есть также наладочный режим обслуживания фильтра, который позволяет менять фильтровальный материал. При этом управлять движением драги можно в толчковом режиме, при помощи расположенного на пульте в подвале выключателя [11].

Сам фильтровальный материал в зависимости от типа установки и того, обслуживаемого оборудования и типа стружки. В основном применяют нетканый материал, установленный на двух моталках с возможностью

сигнализации о помехах в его передвижении и окончании рулона с фильтрами. Внешний вид агрегата подачи фильтровального полотна на установке СОЖ представлен на рисунке 9.



Рисунок 9 – Система подачи нетканого фильтровального полотна на установке подачи и очистки СОЖ

Предварительный стружкоотделитель конвейера может работать в режимах «Автомат», «Отключение», «Наладка». Включение предварительного стружкоотделения производится циклично с периодичностью раз в 10 минут. Для контроля хода цепи стружкоотделителя предусмотрен конечный выключатель, который подключен к реле контроля скорости вращения и в случае блокировки цепи выдает аварийное сообщение о помехе. При этом реле контроля имеет возможность настройки по следующим параметрам: контроль вращения, время разгона [12]-[13].

Внешний вид насосных агрегатов действующей технологической установки централизованной подачи СОЖ с двумя основными насосами и резервным насосом представлен на рисунке 10.

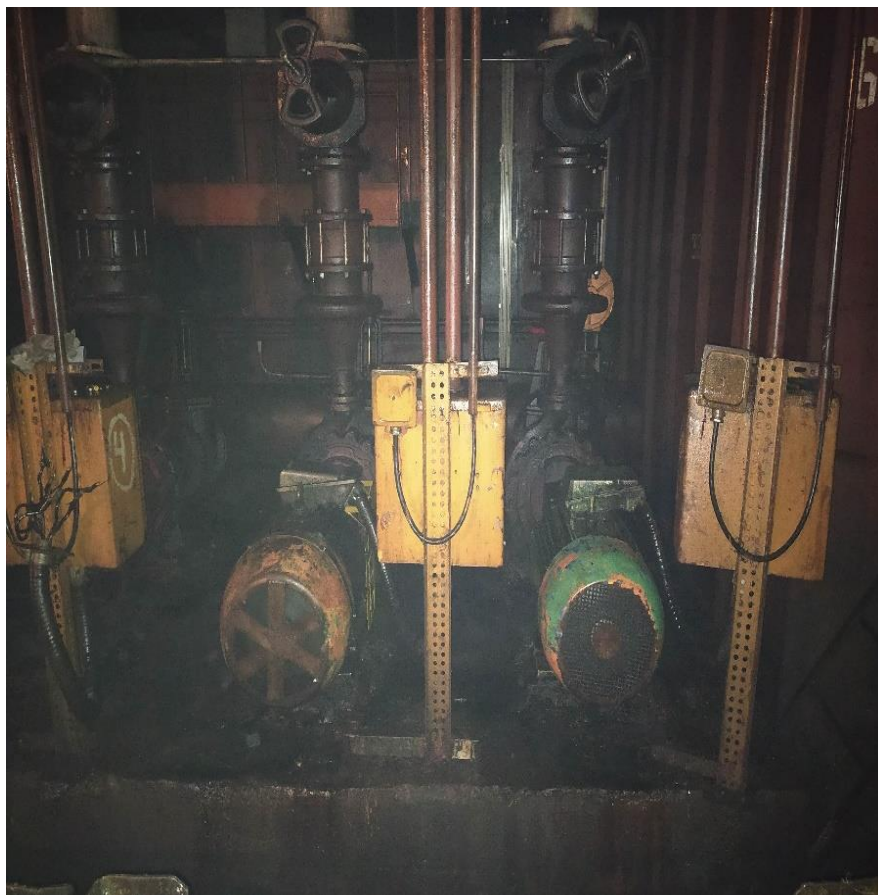


Рисунок 10 – Внешний вид системных насосов и бака с чистой СОЖ

## **1.2 Насосные системы установок фильтрации и подачи СОЖ**

В качестве насосных систем на установках фильтрации применяются комплектные агрегаты, состоящие из асинхронного общепромышленного электродвигателя, установленного на станине и центробежного насоса, установленного на его валу.

Сам насосный агрегат состоит из нескольких основных частей, приводного электродвигателя, насоса и станины (основания), на которых они

закреплены. Внешний вид насосного агрегата в сборе представлен на рисунке 11.



Рисунок 11 – Внешний вид насосных агрегата с электродвигателями (P= 55 кВт) подачи СОЖ с центробежными насосами

Электродвигатель в составе центробежного насоса играет роль приводного элемента, который может запитываться, как напрямую от промышленной сети, так и получать питание от любого устройства, позволяющего регулировать скорость вращения. Внутренней конструкции центробежного насоса, в которой находится приводной электродвигатель, всегда тщательно герметизируется [1]. Это необходимо для того, чтобы защитить его от контакта с перекачиваемой рабочей жидкостью. Электродвигатели, применяемые в насосных агрегатах, могут быть стандартными, так и специализированными, т.е. имеющими не стандартные удлиненные выходные валы и иные посадочные геометрические размеры.

Принцип работы самого центробежного насоса, работающего в паре с двигателем основан на действии центробежных сил, создаваемых рабочим колесом. Жидкость, подаваемая через патрубок всасывания в центр рабочего

колеса, под действием центробежных сил вращающегося колеса, выбрасывается на периферию колеса. При этом на входе в насос (центральная часть колеса) создается разрежение, а в корпусе насоса (улитке) создается повышенное давление. Жидкость под действием разрежения поступает через всасывающий патрубок в насос, и под действием повышенного давления поступает в напорный патрубок. За счет этого происходит перекачка жидкости центробежным насосом. Устройство и принцип работы центробежного насоса представлен на рисунке 12.

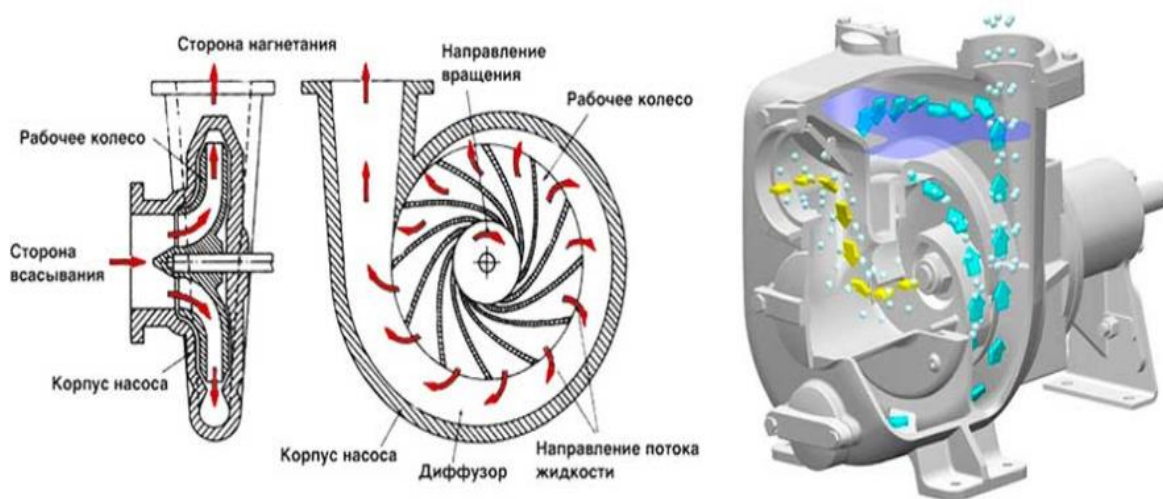


Рисунок 12 – Принцип действия центробежного насоса

Вал насоса непосредственно передает вращение от электродвигателя к рабочему колесу. Рабочее колесо представляет из себя два параллельных друг другу диска, между которыми расположены лопатки (лопасти), с наклоном в сторону противоположную вращению.

Рабочее колесо непосредственно перемещает перекачиваемую жидкую среду по внутренней камере устройства. Подшипниковые узлы насосного агрегата обеспечивают вращение вала с зафиксированным на нем рабочим колесом. При этом на подшипниковых узлах устанавливаются

уплотнительные элементы, которые защищают узлы внутренней конструкции насоса от контакта с перекачиваемой жидкой средой [14]-[16].

Корпусная часть насоса в основном выполняется в форме улитки с двумя патрубками: один из них предназначен для всасывания рабочей жидкости, а второй является напорным, из которого жидкость будет выходить.

В зависимости от условий и перекачиваемой жидкости, с которой работает насос, выбирают разные исполнения насосов по их материалу его основных рабочих частей.

Циркуляционный насос обычно имеет рабочее колесо и корпус, изготовленные из углеродистой стали. Если же насос будет перекачивать жидкости, содержащие некие абразивные среды, то тогда рабочие колеса для таких насосов в основном изготавливаются из различных сталей повышенной твердости.

Насосные системы для перекачивания растворов на основе водных соединений могут иметь различные устройства уплотнения на валу, но основные типы применяемых уплотнений — это сальниковое и торцевое уплотнение, а также они имеют различное исполнение по конструкции (консольные, моноблочные).

Если электродвигатель насоса работал бы таким образом, чтобы при изменении параметров техпроцесса (расхода или давления) менял бы частоту вращения таким образом так, что можно был бы поддерживать без затрат энергии сделать давление в сети конечного потребителя стабильным. Такой способ регулирования убирает потери напора (нет дроссельных элементов), а значит и будут отсутствовать потери в гидравлической системе установки, что значительно повысит КПД всей системы [5]-[6].

Наибольшее распространение, для перекачки жидких сред, различной плотности и состава получили центробежные насосы, так как они имеют простую конструкцию, высокую надежность и необходимые характеристики,



подходящие для перекачивания большинства жидких сред и фракций, а также позволяет создавать большую высоту напорного столба.

Для того чтобы центробежный насос демонстрировал высокую эффективность в работе и не давал во время эксплуатации сбоев, важно знать и понимать какими принципами следует руководствоваться, подбирать насосы для решения определенных задач, а также точно следовать рекомендациям по техническому обслуживанию, даваемыми производителями насосных систем.

Центробежные насосы применяются в основной массе технологических процессов, как в промышленности, так и в быту: таких как перекачивание жидкостей из емкостей, циркуляция рабочих жидкостей теплоносителя, в системах канализации и отопления, водоснабжения.

### **1.3 Устройство центробежного насосного агрегата**

Насосный агрегат состоит из нескольких основных частей, приводного электродвигателя, насоса и станины (основания), на которых они закреплены. Внешний вид насосного агрегата в сборе представлен на рисунке 13. Электродвигатель в составе центробежного насоса играет роль приводного элемента, который может быть запитан, как напрямую от промышленной сети, так и получать питание от любого устройства, позволяющего регулировать скорость вращения. Внутренней конструкции центробежного насоса, в которой находится приводной электродвигатель, всегда тщательно герметизируется

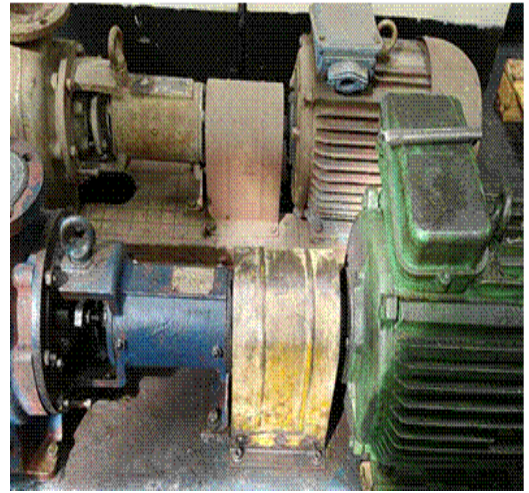
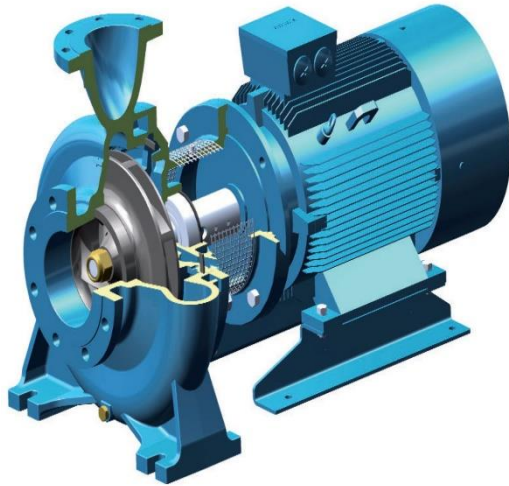


Рисунок 13 – Внешний вид насосного агрегата с центробежным насосом

Это необходимо для того, чтобы защитить его от контакта с перекачиваемой рабочей жидкостью. Электродвигатели, применяемые в насосных агрегатах, могут быть стандартными, так и специализированными, т.е. имеющими не стандартные удлиненные выходные валы и иные посадочные геометрические размеры [19].

Внешний вид специализированного электродвигателя для насосного агрегата представлен на рисунке 14.



Рисунок 14 – Внешний вид специализированного электродвигателя для насоса

Устройство насосного агрегата с центробежным насосом представлено на рисунке 15. Если электродвигатель насоса будет работать таким образом, чтобы при изменении параметров процесса (расхода или давления) насос самостоятельно бы смог изменять свои параметры за счет изменения частоты вращения, то возможно будет без значительных потерь и затрат энергии поддерживать давление у потребителя стабильным.

Такой вариант даст возможность избавиться от потери напора, что значительно повысит КПД всей насосной системы.

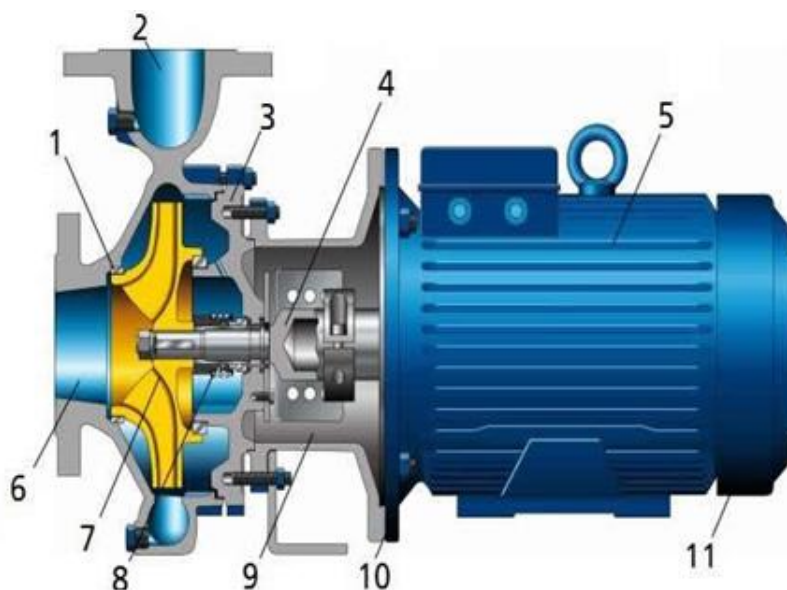


Рисунок 15 – Устройство центробежного консольного насоса

- 1 -Дросселирующая щель, 2 – Напорный патрубок, 3 – Крышка корпуса,  
4 – Вал, 5 – Рабочее колесо, 6 - Всасывающий патрубок, 7 – Рабочее колесо,  
8 – Уплотнение вала, 9 – Поддон привода, 10,11 – Подшипники

#### **1.4 Способы и методы снижения энергопотребления в насосных системах и ее оптимизация**

Принцип любой оптимизация работоспособности насосной системы – это комплексный и системный подход по оценке возможностей снижения энергопотребления для насосов мощность более 15 кВт.

По данным Европейской ассоциации производителей насосного оборудования к главным мероприятия, которые могут привести к снижению потребления энергии, а также их предполагаемые размеры приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Мероприятия по снижению энергопотребления

Методы снижения энергопотребления в насосных системах	Размер снижения энергопотребления
Замена регулирования подачи задвижкой на регулирование частотным преобразователем	10 – 60%
Снижение частоты вращения	5 – 40%
Замена электродвигателей на более эффективные	1 – 3%

Основными причинами работы насосного оборудования не в оптимальном режиме являются [11]:

а) Ошибки при проектировании, когда в систему закладывают сразу оборудование с запасом, на случай перспектив развития производства, что приводит впоследствии к снижению напора и необходимости проводить регулирование за счет дросселирования, а значит и к потере эффективности.

б) Изменение параметров гидравлической сети в течение срока эксплуатации системы (коррозия элементов сети, замена на трубы другого диаметра т. п.).

в) Изменение потребления жидкости в связи с ростом или сокращением количества оборудования и изменением технологии.

г) Замена и установка новых элементов в системе с иными характеристиками.

К методам снижения энергопотребления в насосных системах относят следующие действия, позволяющие значительно повысить КПД насосных установок в целом:

а) Замена насосов на более эффективные, что дает снижение от (2 до 3 %).

б) Замена существующих электродвигателей на двигатели с большим классом энергоэффективности (снижение 3–5%).

в) Использование дополнительных баков (танков) для работы во время пиковых нагрузок – 10–20%.

г) Снижение частоты вращения двигателей насосов при неизменных параметрах сети – (до 30%).

д) Изменение принципа регулирования (вместо дросселирования задвижкой на регулирование частотным преобразователем до 50% энергопотребления).

С учетом того, что, например, только в одном производственном корпусе в производстве двигателей механообрабатывающего производства АО «АВТОВАЗ» в среднем установлено около 30 таких насосных установок, в состав каждой из которых входит от 2 до 7 насосов с приводными двигателями мощностью от 30 до 55 кВт, а технологический процесс работы оборудования непрерывен, то глобальные изменения в конструкции таких установок изменения конструкции не возможны из-за особенностей работы оборудования [17]-[18]. Но потребность в изменении таких установок в действующем производстве связи с их значительным энергопотреблением крайне важна.

### **Выводы по разделу 1**

1. С учетом непрерывного цикла работы установок и с учетом имеющихся технологических ограничений глобальная комплексная переделка существующих установок очистки СОЖ с целью оптимизации их энергопотребления не представляется возможной.

2. Для снижения энергопотребления возможно лишь локальное изменение отдельных систем, входящих в состав установок с возможностью тиражирования их на всю гамму такого технологического оборудования.

## **2 Выбор оптимального способа управления насосными агрегатами для снижения энергопотребления технологического оборудования на действующем производстве**

Принцип любой оптимизация работоспособности насосной системы – это комплексный и системный подход к оценке возможностей снижения энергопотребления для двигателей насосов.

Первое – это проведение досконального и качественного обследования, которое будет представлять из себя некий комплекс мероприятий: сбор и анализ информации о состоянии, рабочих характеристиках системы, объеме прокачиваемой жидкости и потребляемой энергии, условиях работы насосного оборудования. Вся выше сказанное направленно на повышение надежности оборудования, снижение энергопотребления и эксплуатационных затрат.

Также необходимо отметить, что в соответствии с ФЗ № 261 для всех предприятий, совокупные затраты которых на энергоносители составляют 50 млн. рублей в год и более, к которым естественно относится и АО «АВТОВАЗ», обязательным требованием является проведение энергетического обследования.

В основе корневых причин низкой эффективности применения насосов лежит в основном их неправильный выбор или регулирование технологического процесса и режима работы при помощи дросселирующих элементов, на которых теряется давление. Основной причиной этого является неверный подбор насосов под требования системы [20].

Так, по данным компаний-производителей оборудования более 50% проданных насосных систем эксплуатируют вне своей рабочей зоны и почти в 90% случаев, в этом виноваты непосредственно потребители, которые при проектировании предоставили не верные входные параметры.

Главными причинами, из-за которых насосное оборудования не эксплуатируется в оптимальном режиме являются:

а) Ошибки при проектировании, когда в систему закладывают сразу оборудование с запасом, на случай перспектив развития производства, что приводит впоследствии к снижению напора и необходимости проводить регулирование за счет дросселирования, а значит и к потере эффективности.

б) Изменение параметров гидравлической сети в течение срока эксплуатации системы (подверженность элементов сети корродированию, изменение существующих трубопроводов на иной диаметр т. п.).

в) Изменение потребления жидкости в связи с ростом или сокращением количества оборудования и изменением технологии.

г) Замена и установка новых элементов в системе с иными характеристиками.

К основным и самым результативным методам снижения энергопотребления в насосных системах относят следующие действия, позволяющие значительно повысить КПД насосных установок в целом [19]-[20]:

а) Замена существующих электродвигателей на двигатели с большим классом энергоэффективности (снижение 3–5%)

б) Снижение частоты вращения двигателей насосов при неизменных параметрах сети – (до 40%);

в) Изменение принципа регулирования (вместо применения дросселирующих элементов на трубопроводе включение в состав для регулировки частотного преобразователем, что дает экономию до 60% электроэнергии).

С учетом того что, только в одном производственном корпусе в Производстве Двигателей Механообрабатывающего производства АО «АВТОВАЗ» в среднем установлено около 20 таких насосных установок, а в состав любой из них входит от 2 до 7 насосов с приводными двигателями мощностью от 30 до 55 кВт и технологических процесс работы оборудования непрерывен, то глобальные изменения в конструкции таких установок изменения конструкции не возможны из-за особенностей работы



оборудования и требуется найти оптимальный вариант по себестоимости и результативности снижения энергопотребления на основе выше описанных способов.

## **2.1 Энергетическая диаграмма работы насосных установок**

Например, использование регулируемого электропривода в насосных установках и его работа с управлением его мощностью дает возможность уменьшить потребления энергии насосными установками и позволяет поддерживать частоту вращения оптимальной при необходимых технологических режимах работы установки.

Сам электрический привод с органами его регулирования, а также работа на пониженной частоте в течении достаточно продолжительного отрезка времени, будут способствовать резкому понижению процента износа всех регулирующих устройств и непосредственно механики самого насоса.

При всем этом плавное регулирование напора или давления в момент действия переходных режимов с необходимой для этого частотой позволит значительно снизить риски возникновения различных ударных нагрузок и как следствие аварий в трубопроводах технологических установок [21].

Исследование энергопотребления центробежных насосов логичнее проводить на примере энергетической диаграммы работы насосных агрегатов. Руководствуясь данной диаграммой в процессе перехода электроэнергии, в потенциальную и кинетическую энергии рабочей жидкости, достаточно легко обнаруживаются потери во всех четырёх основных элементах центробежной насосной установки, а именно: преобразователе частоты, самом электродвигателе, его насосе и во всех трубопроводных системах установки [28]. Внешний вид энергетической диаграммы и видов потерь показан на рисунке 16.



Рисунок 16 – Энергетическая диаграмма насосного агрегата

Как таковой КПД самой насосной установки всегда имеет тесную взаимосвязь с эффективностью каждого элемента системы входящего в его состав. При этом КПД всей системы учитывает любые виды потерь, которые завязаны на преобразование электроэнергии в как таковую механическую энергию воды, перемещаемой внутри рабочей полости насоса. Таким образом при определении общих потерь электроэнергии требуется полностью учесть потери любого узла, входящего в систему.

### 2.1.1 Оптимизация за счет использования существующих электродвигателей действующих установок фильтрации охлаждающей жидкости

На многих больших предприятиях, как например на АО «АВТОВАЗ», существуют значительные складские запасы электродвигателей, низкого класса энергоэффективности, а в купе с достаточно низким уровнем заинтересованности отдельных руководителей предприятий на внедрение двигателей большего класса энергоэффективности повышение КПД систем

за счет внедрения новых более эффективных электрических машин проходит достаточно медленно.

В условиях действующего производства необходимо учитывать, что на всех установках подачи СОЖ установлено более 600 двигателей и имеется значительный оборотный складской фонд таких двигателей в количестве более 100 штук. При этом все имеющиеся на данный момент на складах производства двигатели имеют низкий класс энергоэффективности, что на данный момент ограничивает возможность уменьшения потребления электроэнергии за счет замены электродвигателей насосов до тех пор, пока не будет израсходован имеющийся оборотный фонд [22]. Внешний вид электродвигателей для насосов установок подачи СОЖ, находящихся в обороте на складе представлен на рисунке 17.



Рисунок 17 – Внешний вид оборотного фонда электродвигателей для насоса

На рисунке 18 представлены сравнительный анализ по двигателям разных классов энергоэффективности одной мощности по разным техническим параметрам. Электродвигатели IE1 чаще всего применяются там, где основным показателем является цена, достаточно высокая

ремонтпригодность и возможность быстрой закупки таких двигателей для замены вышедшим из строя

Электродвигатели класса эффективности IE2 применяют там, где наиболее важна некая более качественная настройка оборудования для его работы максимально возможном оптимальном режиме. Данный класс электродвигателей гораздо более эффективен, по сравнению с предыдущим даже при его неполной нагрузке.

Так же, стоит отметить, что в них используются менее мощные т.е. намного менее шумные вентиляторы охлаждения. На представленной ниже диаграмме наглядно видны преимущества класса IE2 в сравнении его классом IE1 [27].



Рисунок 18 – Сравнительный анализ по двигателям одинаковой мощности, но разных классов энергоэффективности

Из описанного выше наглядно видно, что замена двигателей позволяет снизить энергопотребление не более чем на 3–5 %. Так как насосных систем, уже находящихся в эксплуатации, в механообрабатывающих производствах на автомобильных предприятиях значительно больше, по сравнению вновь вводимыми в эксплуатацию, то и проблема с неэффективным энергопотреблением, в том числе, связана и с подобными действующими системами [23].

Например, только для нужд насосных установок подачи СОЖ в механосборочных производствах АО АВТОВАЗ на данный момент расходуется более 140 электрических двигателей мощность 30 – 55 кВт в месяц. А в случае замены при ремонте насосной установки их на более энергоэффективные, с класса EFF1 на EFF2 уже может быть получена значимая экономия электрической энергии, а возможный срок окупаемости при замене таких двигателей составит в зависимости от мощности всего около 2 лет при условии трехсменной работы оборудования.

### **2.1.2 Стандарты энергоэффективности электродвигателей**

Так как электродвигатели в насосных установках являются основным потребителем электроэнергии и при этом они выходят из строя и меняются достаточно часто, то необходимо рассмотреть применение более энергоэффективных моторов в действующих насосных установках. В недавнем прошлом в разных странах мира действовали собственные стандарты энергоэффективности.

В Европе существуют нормы CEMEP, на которые Россия ориентировалась был создан ГОСТ Р 5167 2000. В целях улучшения энергоэффективности при работе электродвигателей в Международной энергетической комиссией (МЭК) и Международной организацией по стандартизации (ISO) был принят единый стандарт IEC 60034-30. Этот стандарт классифицирует все низковольтные АД и вводит требования к унификации и энергетической эффективности.

На рисунке 19 представлено сопоставление разработанного единого международного стандарта с различными нормами стран в мире.



Рисунок 19 – Соотношение единого международного стандарта с нормами различных стран мира

### 2.1.3 Методы определения энергоэффективности системы

Существует два основных метода определения КПД технических систем: прямой и косвенный. Прямой метод основан на экспериментальном измерении мощности, а в новых стандартах энергоэффективности предполагается использование косвенного метода [27].

Прямой метод основан на следующих параметрах:

- 1) начальная температура;
- 2) нагрузочные потери (получаемые с помощью измерений и математических расчетов).

При этом сравнение показателей КПД возможно лишь только при одинаковом методе определения их значений.

Косвенный же метод подразумевает:

1. Измерение потерь мощности, рассчитанных по результатам испытаний.

2. Оценка потерь подводимой мощности при номинальной нагрузке
3. Математический расчет: используется альтернативный косвенный метод с расчетом потерь  $P$  (мощности).

Более высокое значение КПД уменьшает потери и потребление электроэнергии электродвигателя и повышает его энергоэффективность. Действующий российский ГОСТ Р 54413-2011, вполне можно соотнести с имеющимися действующими международными стандартами. Например, соответствие существующих у нас ГОСТ с действующими международным стандартам представлено на рисунке 20.

Обозначение ссылочного национального, межгосударственного стандарта	Степень соответствия	Обозначение и наименование ссылочного международного стандарта
ГОСТ Р 52776-2007(МЭК 60034-1:2004)	MOD	МЭК 60034-1:2004 «Машины электрические вращающиеся. Часть 1. Номинальные значения параметров и эксплуатационные характеристики»
ГОСТ Р МЭК 60034-2-1-2009	IDT	МЭК 60034-2-1:2007 «Машины электрические вращающиеся. Часть 2-1. Стандартные методы определения потерь и коэффициента полезного действия по испытаниям (за исключением машин для подвижного состава)»
ГОСТ Р МЭК/ТС 60034-17-2009	IDT	МЭК/ТС 60034-17:2006 «Машины электрические вращающиеся. Часть 17. Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором при питании от преобразователей. Руководство по применению»
ГОСТ Р МЭК 60079-0-2007	IDT	МЭК 60079-0:2007 «Взрывоопасные среды. Часть 0. Оборудование. Общие требования»
ГОСТ 20459-87	NEQ	МЭК 60034-6:1991 «Машины электрические вращающиеся. Часть 6: Методы охлаждения (код! C)»

Рисунок 20 – Соответствие Российских ГОСТ международным стандартам

Отличия российских стандартов от существующих международных это:

- 1) особенности расчетов для определения параметров оборудования;
- 2) различиях в единицах измерения при экспериментах;
- 3) технологические процессы испытаний оборудования;

4) в настройках и параметрах действующего испытательного оборудования и в условиях проведения самих испытаний, а также особенностях эксплуатации.

В России приняты те же классы энергоэффективности, которые действуют и в Европе. Все данные о классе энергоэффективности содержится в паспортных данных, на маркировке и на шильдиках электрических машин.

В стандарт IEC 60034-30 входят двигатели мощностью от 0,75 до 375 кВт с частотами вращения от 1000 до 3000 об/мин, а нормы Eract охватывают двигатели мощности от 0,75 до 150 кВт с частотами вращения от 1000 до 3000 об/мин [7].

Рассмотрим пример замены электродвигателя насосного агрегата на двигатель с более высоким классом энергоэффективности.

На насосных агрегатах, используемых на оборудовании по обработке головки блока цилиндров (ГБЦ) и блока цилиндров (БЦ), установлены двигатели с классом энергоэффективности IE1 мощностью  $P_2 = 55$  кВт, ( $\eta=92,4\%$ ,  $\cos\varphi=0,91$ ).

В случае замены данного двигателя на двигатель с классом эффективности IE2 и иными  $\eta=93,9\%$  и  $\cos\varphi=0,88$  можно получить экономию до 7884 кВт в год.

Сравнительный анализ потребляемой мощности и потерь для таких двигателей, применяемых в насосных агрегатах представлен на рисунке 21. При замене только 5 таких электродвигателей экономия составит около 40 000 кВт/год. То есть более эффективное использование электроэнергии позволяет снизить себестоимость промышленной продукции, что позволит иметь преимущество на рынках сбыта [24].

При этом разница в применении электродвигателей с классами энергоэффективности IE1 и IE2, может окупить себя в производстве в сор от 1 до 2 х лет.



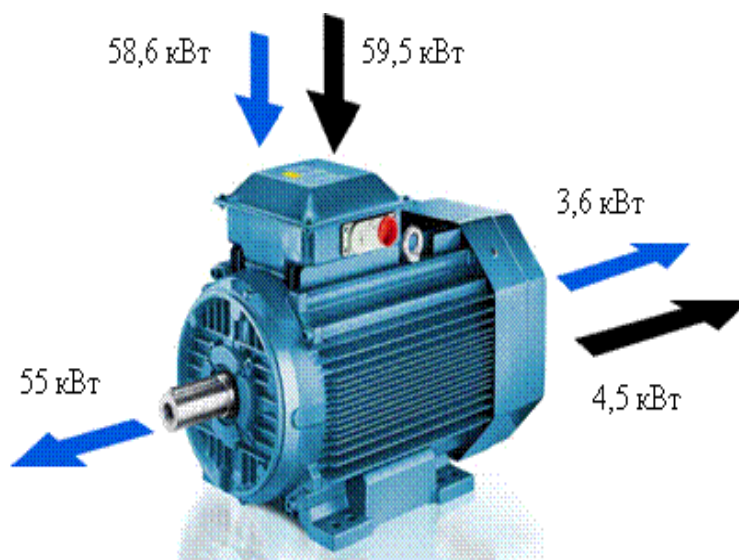


Рисунок 21 – Анализ потребляемой мощности и потерь для двигателей разных классов энергоэффективности

При этом рост класса энергоэффективности ведет к увеличению срока службы двигателя, так как уменьшаются источники нагрева двигателя за счет снижения потери.

Потери в двигателях подразделяются на основные (вызваны электромагнитными и механическими процессами) и добавочные, появляющимися от различных не основных явлений.

К основным потерям относятся:

- а) все механические потери (в подшипниках, потери на трение щеток)
- б) магнитные потери
- в) электрические потери.

Срок службы двигателя с повышенным классом эффективности значительно больше, в связи более низкими потерями. Также, при использовании таких двигателей совместно с частотнорегулируемым электроприводом, на частотах значительно ниже номинальных надо помнить, что будут иметь место проблемы с охлаждением двигателей, особенно с учетом того, что насосы работают в подвальных помещениях с высокой

влажностью и повышенным температурным режимом, что может привести к перегреву обмоток электродвигателя и выходу его из строя [25]-[26].

Поэтому возможно необходимо будет провести замеры на частотах 10 – 30 Гц в течение рабочей смены при разных нагрузках. Если результаты испытаний покажут, что температурный режим двигателей при данных частотах все температурные характеристики рабочих узлов электродвигателя и насоса остаются в пределах допустимых, то такое регулирование для данных систем также будет возможно.

Также очень важным параметром энергоэффективности электродвигателя, является коэффициент нагрузки, или как его называют -  $\cos \varphi$ , коэффициент нагрузки определяет отношение активной мощности к полной.

Так, как только активная мощность преобразуется в полезную мощность, а реактивная мощность расходуется на создание электромагнитного поля, а реактивная мощность поступает в двигатель и возвращается обратно в сеть с удвоенной частотой сети ( $2f$ ), тем самым она также создает в питающих линиях дополнительные потери [29].

Таким образом любая электромеханическая систем, включающая в себя двигатели с высоким значением КПД, но низкими значениями  $\cos \varphi$ , не являются энергоэффективными.

Но при внедрении энергоэффективных двигателей для систем электропривода насосных агрегатов, не смотря на высокую результативность энергоэффективных решений сегодня существует ряд проблем для распространения энергоэффективных приводных систем:

1. Установка производителями электродвигателей низкого класса эффективности в составе комплексных насосных систем, ради удешевления продукции.

2. На многих больших предприятиях, как например на АО «АВТОВАЗ», существуют значительные складские запасы электродвигателей, низкого класса энергоэффективности.

3. Низкий уровень восприятия необходимости со стороны высшего менеджмента предприятий о необходимости повышения энергоэффективности двигателей;

Также стоит отметить, что важным аспектом связанных с энергоэффективностью электрических машин, является приобретение оборудования на основе оценки суммарных эксплуатационных расходов за весь срок службы.

## **2.2 Международные стандарты, регламентирующие энергоэффективность электрических машин**

Еще в 2008-м году были введены стандарты энергоэффективности для электродвигателей: стандарт IEC/EN 60034-2-1, который устанавливает новые правила определения для КПД электрических машин и стандарт IEC 60034-30, характеризующих новые классы энергоэффективности двигателей [30].

В стандарте IEC 60034-30 выделяют три класса энергоэффективности трехфазных асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором в зависимости от их КПД. Внешний вид ряда мощностей и КПД для данных классов представлен на рисунке 22.

В настоящее время обозначение классов энергоэффективности принято обозначать в виде следующих комбинаций: EFF3, EFF2, EFF1.

В соответствии с требованиями этого стандарта изменения касаются использования практически всех трехфазных двигателей низкого напряжения (50/60 Гц) в диапазоне мощностей от 0,75 кВт до 375 кВт, так как именно такие двигатели потребляют около 70% из потребляемой в мире энергии [26].

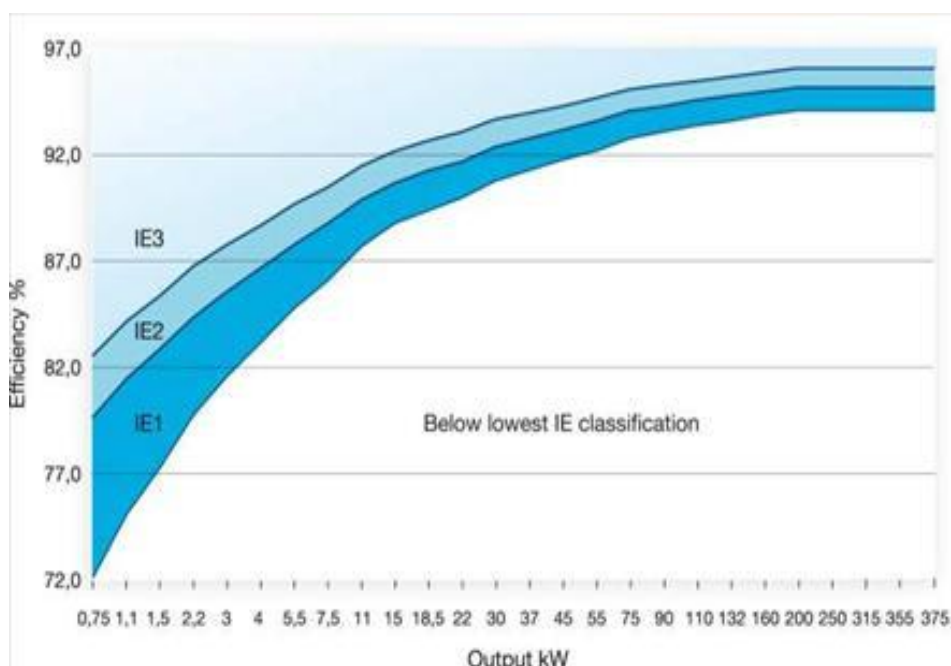


Рисунок 22 – Классы энергоэффективности по стандарту IEC 60034-30

При этом практически 75 % подобных двигателей используется в электроприводах промышленного оборудования: насосные агрегаты, вентиляционная техника и многое другое.

С 01.01.2017 года в Европейском союзе все применяемые и выпускаемые электродвигатели мощностью от 0,75 до 375 кВт должны быть не ниже класса IE3, но при использовании частотных приводов допускается двигатель класса IE2. Общее потребление электроэнергии ежегодно достигает более триллиона (1.000.000.000.000) кВт/ч, что приводит к выбросам CO<sub>2</sub> в объеме почти 400.000.000 тонн [10].

Наряду с экономией потребляемой энергии, переход на использование электродвигателей даже класса IE2 для регулируемых приводных систем позволяет добиться следующих положительных эффектов:

- 1) увеличить срок службы двигателя и работающего с ним насосного оборудования;
- 2) улучшить перегрузочную способность оборудования;

3) значительно уменьшить затраты на техобслуживание двигателей и сократить возможные простои;

4) повысить устойчивость двигателя к тепловым нагрузкам.

Для классификации электродвигателей была разработана классификация, утвержденная ИЕС стандартом ИЕС60034-30-1 [31]. В Европе выделяют следующие энергоэффективности электродвигателей: IE1 – стандартный тип; IE2 – высокая эффективность; IE3 – сверхвысокая эффективность; IE4 – премиум класс. На рисунке 23 представлены зависимость КПД электрических машин и ряда мощностей от класса энергоэффективности.

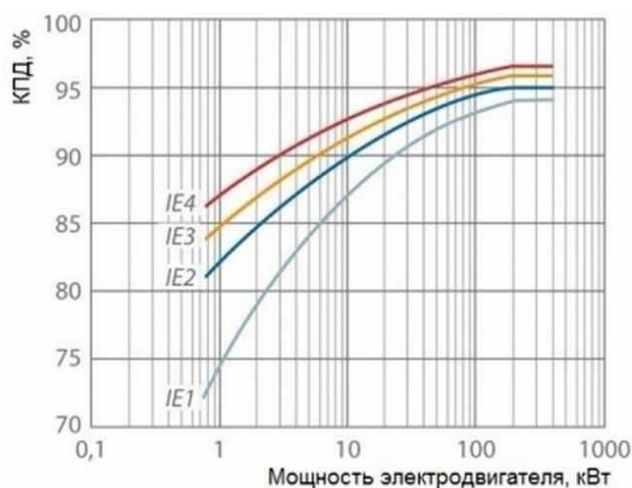


Рисунок 23 – Зависимость КПД электрических машин от класса энергоэффективности

Электродвигатели IE3 стали распространяться во второй половине 20х годов этого столетия. Так как в 2017 году вступил в силу Регламент ЕС гласящий, что двигатели мощностью от 0,75 до 375кВт должны соответствовать типу IE3 или же типу IE2 с применением их с преобразователя частоты. Так как такие двигатели допускают перегрузку в 15 %, то их стало возможно устанавливать на станках, где сложно заметить

перегрузку, в следствие того, что мощность на валу машины постоянно изменяется.

Электродвигатели IE4 – это на данный момент двигатели премиум сегмента. В них применяют новые системы аэродинамики и отвода тепла. Также в таких двигателях применяются достаточно большая доля активных материалов, минимизирован воздушный зазор, то есть внедрение двигателей такого класса (IE4) значительно позволит снизить энергозатраты в промышленном производстве [7].

Но так как на действующем технологическом оборудовании подачи и очистки СОЖ на территории бывшего МСП на данный момент установлено и функционирует более 600 насосов (включая резервные), едино моментная замена всех двигателей на более энергоэффективные не представляется возможной, учитывая также наличие достаточно большого оборотного фонда электрических двигателей на складах.

### **2.3 Внедрение частотно-регулируемого электропривода в насосных установках**

Для снижения расхода электроэнергии в насосах технологических установок важен процесс качественного прироста внедрения систем для регулировки числа оборотов в минуту приводных двигателей для насосов СОЖ. Частота напряжения в общепромышленных сетях нашей страны равна 50Гц и что позволяет им работать с их номинальной частотой [32].

Но для уменьшения расхода энергии в насосах необходимо регулировать частоту вращения насосов в функции расхода жидкости (СОЖ). Повышение уровня автоматизации применяемого в насосных системах электрического привода может позволить исключить многие потери. Так чтобы изменить частоту переменного напряжения, подводимого к электродвигателю насоса, нужно запитать его через ПЧ [3].

В зависимости от того как будет формироваться величина управляющего сигнала, например, с датчика давления, установленного на

трубопроводе (рисунок 24) на вход преобразователя частоты, будет приходить задающий сигнал, (0 - 10 В или 4 - 20 мА), в зависимости от которого и будет меняться частота переменного напряжения на выходе преобразователя, которая обычно меняется в диапазоне от 5 до 50 Гц. Это позволит обеспечить регулирование частоты вращения насосного агрегата.



Рисунок 24 – Аналоговый датчик абсолютного давления, установленный на напорном трубопроводе.

Наилучший выбор насоса считается в том случае, когда при минимальном удельном расходе электроэнергии на подачу воды достигается требуемая подача и напор насоса. Преобразователь частоты регулирует момент и скорость вращения асинхронного двигателя, используя один из двух основных методов частотного управления – скалярный или векторный [23]-[24].

Из всего описанного выше наглядно видно, что замена насосов и двигателей позволяет снизить энергопотребление приблизительно на 3–5 %.

в каждом случае. Так как насосных систем, уже находящихся в эксплуатации, в механообрабатывающих производствах на автомобильных предприятиях значительно больше, по сравнению вновь вводимыми в эксплуатацию, то и проблема с неэффективным энергопотреблением в основном связана именно с подобными действующими системами [4].

Признаками таких не эффективных насосных агрегатов и систем являются:

- 1) излишние дросселирование;
- 2) значительное отклонения расхода или давления в системе;
- 3) наличие большого количества потребителей с разным требуемым давлением, что характерно для централизованных систем подачи ОЖ;
- 4) кавитация в насосах;
- 5) высокие уровни вибраций и шумов и износ и повреждения рабочих органов насосов.

Например, только для нужд насосных установок подачи СОЖ в механосборочных производствах АО «АВТОВАЗ» на данный момент расходуются более 100 электрических двигателей мощность 30 – 55 кВт в месяц. В случае замены при ремонте насосной установки их на более энергоэффективные может быть получена значительная экономия электрической энергии, а возможный срок окупаемости при замене таких двигателей составит от 1 до 2 лет при условии трехсменной работы оборудования.

Замена и модернизация механических частей насосных установок: доработка улитки, модернизация геометрии рабочих колес и лопастей, и замена подшипников на другие типы и на более качественные также даст возможность повысить итоговый КПД самой насосной системы в целом, что также положительно скажется на снижении потребления оборудованием электрической энергии [4].

Внешний вид процесса доработки насосов с действующих установок подачи и фильтрации СОЖ представлен на рисунке 25. А внешний вид новых



насосных систем с энергоэффективными двигателями, установленных на действующем технологическом оборудовании представлен на рисунке 26.



Рисунок 25 – Процесс доработки насосных агрегатов установок фильтрации СОЖ

Оптимальным вариантом выбора насоса считается такой, чтобы при минимальном расходе электричества достигался бы необходимый для технологической установки напор с насоса. Преобразователь частоты в данном случае регулирует как момент, так и частоту вращения АД, при этом он применяет один из двух основных методов управления – скалярный или же векторный.



Рисунок 26 – Внешний вид новых насосных установок с электродвигателями класса энергоэффективности IE3

### **2.3.1 Линейная скалярная рабочая характеристика преобразователя частоты**

Во время работы асинхронного двигателя (АД) при помощи скалярного метода управления напряжение на двигателе понижается линейно в соответствии с понижением частоты питания. Это происходит из-за того, что применяется широтно-импульсная модуляция (ШИМ). При работе с ШИМ отношение действующего напряжения к частоте является постоянной величиной и не изменяется на всем диапазоне регулирования.

При этом рабочая характеристика преобразователя частоты (ПЧ) будет оставаться линейной, до тех пор, пока напряжение не возрастет до максимально возможного уровня, лимитированного в основном непосредственно входным напряжением питания самого ПЧ. Также скалярное управление не дает возможность двигателю развить свою номинальную мощность на низких частотах всего вращения, так как мощность будет зависеть от напряжения. Также и момент на валу при низких оборотах будет значительно меньше номинального.

У линейной зависимости, при её кажущейся простоте присутствует огромный минус – это значительное ослабление мощности на выходном валу двигателя, а значит и неизбежное падение момента при пониженной частоте вращения двигателя. При этом будет наблюдаться явление скольжения, характеризуемая тем, что частота вращения ротора будет отставать от частоты вращения поля [8].

Что бы минимизировать воздействие этого эффекта требуется применить компенсацию скольжения. Она позволяет корректировать обороты двигателя при возрастании нагрузки на его валу. В случае корректно выбранного значения компенсации, реальная скорость вращения даже при

достаточно большой при большой нагрузке будет близка к скорости вращения ХХ.

Кроме этого, в большинстве ПЧ с линейной характеристикой реализована функция компенсации момента на низких скоростях, так как момент при этом будет значительно снижен. Её реализуют за счет повышения напряжения при низких частотах вращения двигателя, но в случае неправильной ее настройки это может привести к перегреву двигателя и возможному выходу его из строя.

### **2.3.2 Режим векторного управления**

Во многих технологических процессах требуется обеспечить конкретно взятую частоту вращения и описанные выше проблемы и недостатки скалярного закона управления становятся крайне нежелательными. В таких случаях принято использовать так называемое векторное частотное управление, при котором непосредственно процессор в преобразователя частоты занимается расчетом напряжения, необходимого для поддержания момента и стабильной частоты вращения. В отличие от скалярного режима, здесь главным является математическое обеспечение процесса расчета управление магнитным потоком ротора, за счет разработанной производителем математики и алгоритмов управления, которые чаще всего являются ноу-хау производителей и составляют значительную стоимость в таком конечном продукте как преобразователь частоты [31].

Векторное управление АД актуально в случае достаточно большого диапазона регулирования и при низких оборотах вращения двигателя, когда рабочий момент двигателя достаточно сильно падает, также этот метод дает возможность поддержки стабильной скорости, что достигается за счет получения высокого пускового момента на валу приводного двигателя [20].

Стоит отметить, что при векторном управлении происходит значительное снижение потребления электроэнергии, поскольку основную часть времени двигатель получают от ПЧ столько энергии, сколько необходимо для поддержания требуемой скорости. Различают два вида

векторного управления – без датчика скорости (бессенсорное) или с обратной связью (применяется энкодер или резольвер).

При векторном управлении (без ОС) ПЧ вычисляет скорость вращения по математической модели на основе введенных данных и параметров двигателя и данных о мгновенных значениях тока и напряжения.

Для векторного бездатчикового варианта управления для расчета необходимы номинальные параметры применяемого двигателя: напряжение, ток, частоту, скорость (обороты), мощность, количество полюсов, а также сопротивление обмоток и индуктивные параметры. В случае если что –то из параметров не известно, то в основном производители рекомендуют провести автонастройку ПЧ для вычисления требуемых параметров [11]-[12].

Например, в преобразователях фирмы Сименс в ПЧ устанавливают параметры по умолчанию для каждого стандартного двигателя в зависимости от типа двигателя, и при этом необходимо задавать лимиты временных и токовых параметров векторного управления.

Векторное управление с датчиками ОС характеризуется высокой точностью управления, а саму обратную связь обеспечивает сигнал с энкодера или же резольвера. Энкодер принято устанавливать на валу электродвигателя. При этом он дает ПЧ сигнал о актуальной скорости и в некоторых случаях данные о пройденном расстоянии (в случае наличия системы ЧПУ). На основании этих данных непосредственно ПЧ уже изменяет величины момента и напряжения соответственно. Стоит добавить, что при работе на пониженных скоростях рекомендуется применение систем принудительного охлаждения двигателя.

#### **2.4 Специализированные и стандартные преобразователи частоты для работы с насосными агрегатами**

Основная часть общепромышленных моделей ПЧ вполне можно подходят для управления насосными агрегатами. Но в этом случае

потребуется их настройка и программирование для конкретно взятой задачи и с учетом особенности работы действующего оборудования.

Надо понимать, что все ПЧ, предназначенные непосредственной работы с насосными агрегатами, являются адаптированными под эти задачи и дают более хорошие результаты при работе с ними по сравнению с общепромышленными. Они более экономичны и функциональны для применения в своей сфере. Такие преобразователи выпускают значительное количество фирм производителей, как российских, так и основных “игроков” на рынке производства ПЧ [33].

К таким преобразователям можно отнести преобразователи фирм Delta Electronics (Китай), Шнайдер Электрик (Франция), Сименс (Германия), Ленце (Германия), Омрон и Митсубиши (Япония) [13]. Все эти производители предлагают в своих продуктовых линейках преобразователи частоты исключительно предназначенные для работы в насосных системах с дополнительным функционалом в том числе, с контролем утечки жидкости, защитой от «сухого хода», режимом заполнения пустой трубы (защита от гидроудара), попеременная работа двумя насосами и т.д. Данные системы имеют избыточный функционал для применения на существующем оборудовании, они значительно дороже по сравнению со стандартными, а также отсутствует статистика их ремонтпригодности и не специалистов для их обслуживания. Также эти насосные преобразователи не эксплуатируются в Механообрабатывающих производствах АВТОВАЗа, а связи с тем, что на предприятии существует список рекомендованных систем по электрике и электронике, куда данные преобразователи не входят. Но зато в производствах давно и успешно работают стандартные преобразователи частоты с функционалом, достаточным для их использования в качестве электроприводных систем для насосных установок.

К таким преобразователям, например, относятся успешно эксплуатируемые преобразователи частоты фирмы Шнайдер Электрик и

Сименс [15] различных серий, которые входят в перечень одобренных для применения систем управления.

К таким преобразователям можно отнести ПЧ Альтивар (серия 21 и 61) производства Schneider Electric и серии Sinamics G120, изготовленной фирмой Siemens. Внешний вид данных ПЧ представлен на рисунке 27.

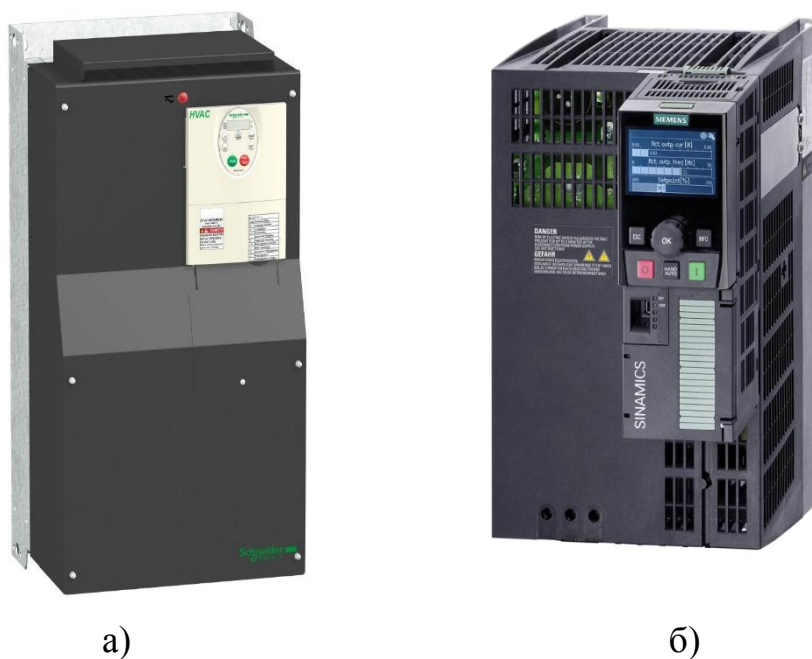


Рисунок 27 – Внешний вид преобразователей частоты  
а) Альтивар 21 б) Sinamics G120

Данные серии преобразователей позволяют управлять ими по средствам сетевых подключений, объединять их в сети, поддерживают различные законы регулирования частоты вращения двигателя и достаточно легко могут быть интегрированы в системы управления существующего технологического оборудования. Для программирования данных преобразователей частоты возможно применять как панель управления, поставляемую как опция, так и промышленный компьютер или иной ноутбук с предустановленным на нем специализированным программным управлением. При этом панели позволяет переносить и хранить базовые

настройки для целого комплекса одинаковых единиц технологического оборудования, что значительно упрощает их ввод в эксплуатацию [14].

Программное обеспечение этих преобразователей возможно можно бесплатно скачать с сайтов фирм производителей, что позволит оперативно изменять настройки систем в случае необходимости и создать архив параметров для всех используемых преобразователей.

## **2.5 Снижение энергопотребления за счет частотного регулирования в насосных установках механообрабатывающих производств**

Так как насосных систем, уже находящихся в эксплуатации, в механообрабатывающих производствах на автомобильных предприятиях значительно больше, по сравнению вновь вводимыми в эксплуатацию, то и проблема, с неэффективны энергопотреблением, в основном связана именно с подобными системами [32].

Признаками таких неэффективных насосных агрегатов и систем являются:

- 1) излишние дросселирование;
- 2) значительное отклонения расхода или давления в трубопроводной системе установки;
- 3) наличие большого количества технологических потребителей с различными требованиями по давлению, что характерно для централизованных систем подачи ОЖ;
- 4) высокие уровни вибраций и шумов, износ и повреждения рабочих колес и камер самих насосов.

В целях сокращения расхода электроэнергии в технологических установках, оснащенных насосными агрегатами рекомендовано внедрение регулирования частоты вращения и внедрение плавного запуска насосных агрегатов, чтобы избежать возможных бросков тока и гидроударов. Это

достигается или применением блок плавного пуска или же преобразователей частоты.

Чтобы изменить частоту напряжения, подаваемого непосредственно на двигатель, надо запитать его от ПЧ. И в зависимости от уровня управляющего сигнала, от датчика давления на вход ПЧ будет приходить задающий сигнал в зависимости от которого и будет меняться частота напряжения на выходе преобразователя, что позволит обеспечить регулирования частоты вращения [29].

Современные насосные установки, на которых применено частотное регулирование, на данный момент устанавливаются только в производствах с новым технологическим оборудованием.

На них для управления электродвигателями применены как системы плавного пуска, построенные на тиристорных сборках, которые принято называть блоками мягкого пуска, так и непосредственно преобразователи частоты.

Они получают данные с датчиков давления, установленных на трубопроводах и в зависимости от их показаний, изменяют частоту вращения двигателей для поддержания необходимого давления и расхода в трубопроводах. Оптимальным считается, когда двигатель насоса при потребляет минимально возможно количество электроэнергии для поддержания необходимого уровня расхода жидкости [34].

Подача и напор зависят от характеристик системы водоснабжения, где установлен насос, поэтому паспортные данные выбранного насоса должны максимально совпадать с сопротивлением системы водоснабжения. Внешний вид блоков мягкого пуска частотных преобразователей представлен на рисунке 28.

Баки с СОЖ в таких установках обычно устанавливаются на одном уровне с технологическим оборудованием, они выполнены в виде закрытых изолированных от внешней среды емкостей, что значительно снижает возможность попадания паров СОЖ во внешнюю среду. Такие насосные



установки в основном оборудованы системами визуализации технологического процесс

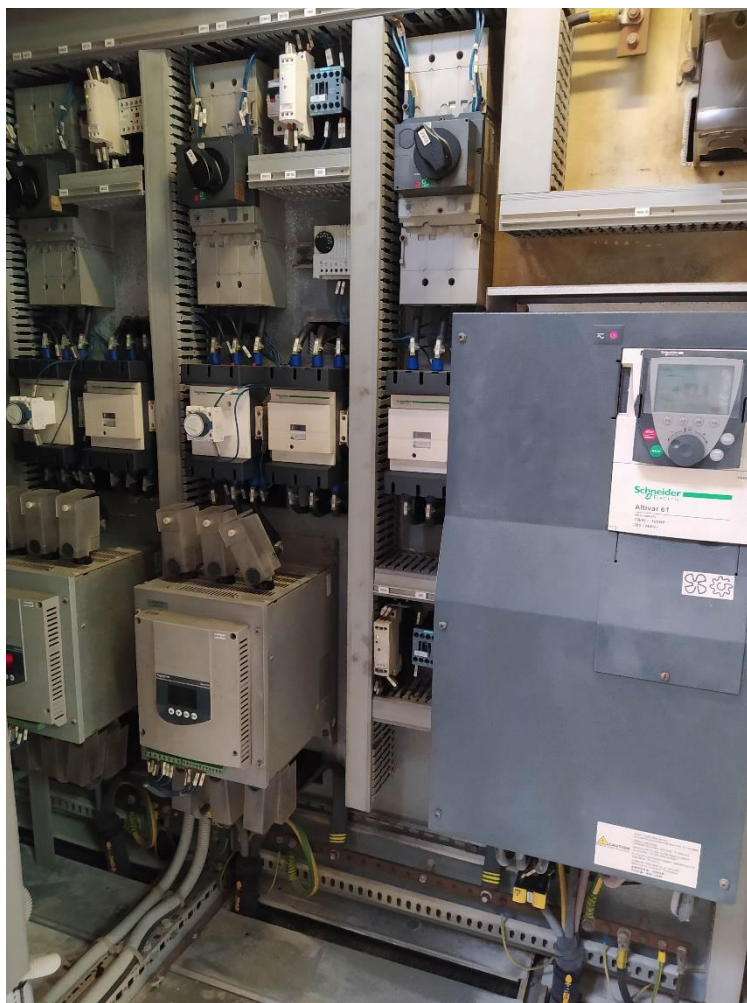


Рисунок 28 – Система управления насосными установками с блоками мягкого пуска и частотным преобразователем серии ALTIVAR

При этом вновь вводимые в эксплуатацию насосные централизованные установки управляются при помощи PLC (программируемый логический контроллер), который связан с системой визуализации, предназначенной для оператора, так называемой НМІ (человеко-машинный интерфейс). Алгоритм управления двигателями насосных агрегатов будет определяться программой, записанной в PLC установки.

Внешний вид системы визуализации насосных установок представлен на рисунке 29.

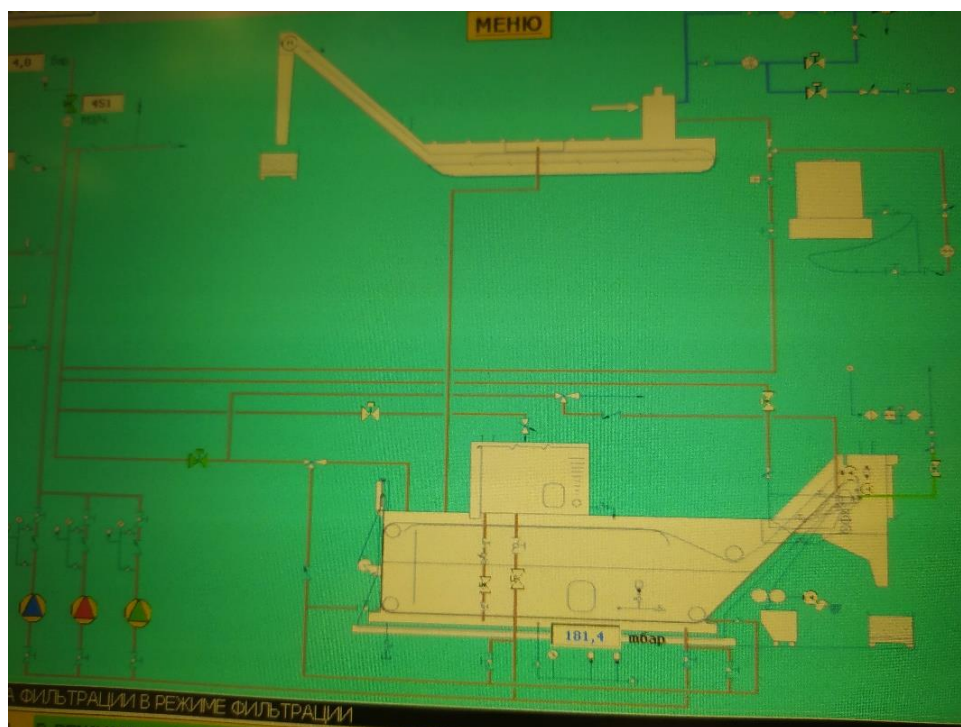


Рисунок 29 – Панель управления и визуализации системы управления насосными установками.

На данных НМІ (человеко-машинный интерфейс) отображается фактическое состояние работы насосов их скорость, давление в подводящих и отводящих трубопроводах, информационные и аварийные сообщения, также данные с панель оператора могут быть использованы для построения глобальной информационной системы управления производством.

## **2.6 Разработка структурной и электрической схемы частотного электропривода для действующих насосных агрегатов**

Для установок СОЖ характерно то, что в основном большая часть насосных агрегатов работает на номинальном режиме и от 1 до 2 в зависимости от количества насосов на оборудовании работают в

дросселирующем режиме постоянно. Исходя из этого наиболее актуальным вариантом построения системы регулирования оборотов с применением частотно регулируемого преобразователя будет являться установка одного частотного преобразователя для управления конкретным насосным агрегатом [13]. В случае его выхода из строя или вывода на профилактику электропривод может быть принудительно скоммутирован с любым из установленных насосов.

Структурная схема для насосной установки с 2мя насосами представлена на рисунке 30.

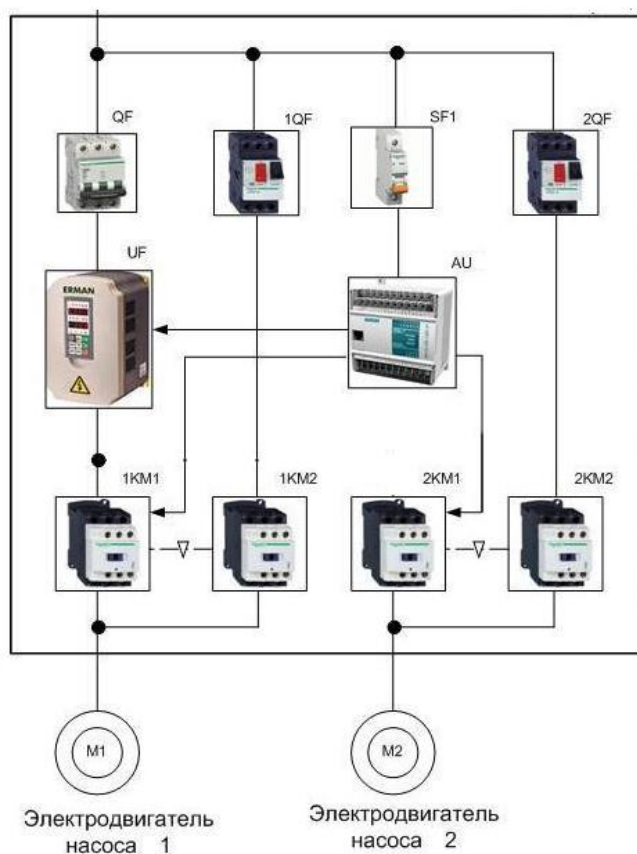


Рисунок 30 – Структурная схема управления насосами для установки ЗУФ с использованием асинхронного двигателя и частотного преобразователя

Также для автоматизации процесса поддержания давления и напора в системе на подающем трубопроводе необходимо будет смонтировать датчик давления и его сигнал завести в систему управления электроприводом и двигателями.

Так как в действующих установках подачи СОЖ отсутствует свободное место для установки преобразователя потребуется смонтировать его в отдельном ШУ, установив его рядом с уже имеющимися и интегрировать сигнала управления электроприводом и сигнал с датчика в существующую электросхему технологической установки подачи СОЖ.

Действующая схема управления существующими насосными агрегатами представлена в приложении А.

Для управления электроприводом и с целью формирования сигналов обмена новой части электросхемы с уже действующей, необходимо установить промышленный контроллер с наличием модуля аналоговых входов ил же использовать аналоговых вход на самом преобразователе частоты [20].

Так как на новых установках, недавно введенных в эксплуатацию, используется оборудование фирма Шнайдер Электрик (Франция) серии ALTIVAR 61, а в производстве также в достаточном количестве применяются преобразователи этой серии, то решено для использования в качестве ПЧ выбрать именно эту серию.

Достоинством этой серии является ее универсальность, а также возможность широкого выбора дополнительных опций, в том числе и специализированной карты для управления насосными агрегатами, что даст возможность использовать более дешевую серию промышленного программируемого логического контроллера (PLC).

Для установок ЗУФ, обеспечивающих один из корпусов ПД, выбранных в качестве пилотных проектов, были закуплены преобразователи частоты серии ALTIVAR 61 мощностью 37 кВт [14], характеристики данных преобразователей представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Технические данные преобразователя

Двигатель	Технические данные преобразователя					Тип преобразователя
	$I_{\text{макс лин.}}$ , А	$I_{\text{макс лин. кз}}$ , кА	$P_{\text{полн}}$ , кВА	$I_{\text{ном.}}$ , А	$I_{\text{макс. перех}}$ (за 60 с.), А	
Р, кВт	84	22	55.7	79	94.8	ATV61 HD37N4

В качестве PLC также решено применить контроллер фирмы Mitsubishi, так как сама фирма производитель предлагает уже готовые решения, в том числе и программные для определенных стандартизованных задач. В таком случае доработка программной части для управления электроприводом будет занимать менее длительный срок [8].

Связь между преобразователем и PLC выполнена на основе протокола Modbus. Схема обвязки преобразователя частоты представлена на рисунке 31.

Внешний вид установок со смонтированными дополнительными шкафами управления, с установленными в них преобразователями частоты фирмы Schneider Electric [14] представлены на рисунке 32 (а), а внешний вид самого преобразователя и его «обвязки» для работы в составе действующей насосной установке представлен на рисунке 32 (б).

Электросхема обвязки цепей питания PLC фирмы Mitsubishi приведена в приложении Б, а схема обвязки входов и выходов PLC фирмы Mitsubishi для интеграции в действующую электросхему управления насосами на технологической установке представлена в приложении Б.

Схема обвязки питания PLC и его входных и выходных сигналов с интеграцией их в действующую электросхему, а также схема работы второго насоса по схеме звезда - треугольник представлена в приложении В.

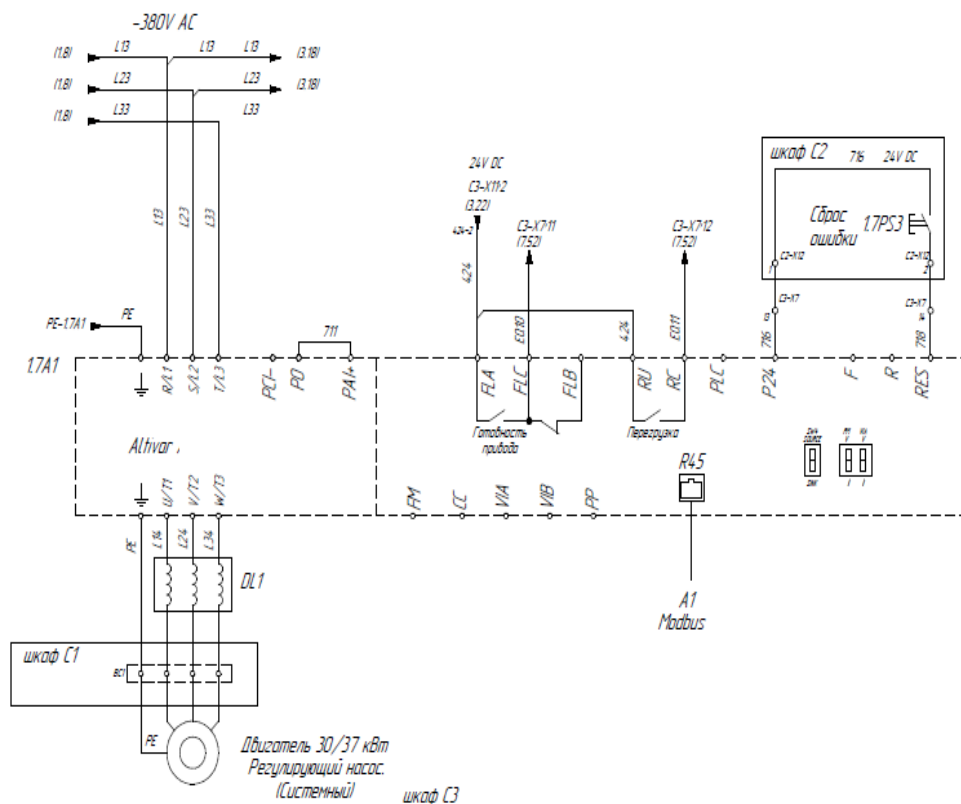


Рисунок 31 – Схема обвязки преобразователя частоты ALTIVAR



а)



б)

## Рисунок 32 – Преобразователь частоты

- а) Внешний вид установок со смонтированными дополнительными шкафами управления ПЧ б) Вид ШУ с установленным в нем ПЧ

### **Выводы по разделу 2**

1. Повышение энергоэффективности технологических установок подачи СОЖ в соответствии с энергодиаграммой напрямую зависит от эффективности всех входящих в нее устройств. Для повышения энергоэффективности в действующих установках вывода их ремонта возможно доработка лопаток насосных агрегатов и замена приводных электродвигателей на более энергоэффективные. Данные мероприятия могут обеспечить повышение энергоэффективности на 3 – 5процентов, что не значительно по сравнению с другими методами. А с учетом дороговизны и большого оборотного фонда электродвигателей в производстве массовое внедрение таких двигателей пока невозможно по экономическим причинам.

2. Внедрение регулирования числа оборотов для действующих насосных агрегатов является более энергоэффективным методом. С учетом того, что все действующие установки построены по одной схеме и установка преобразователей частоты для управления насосами может быть масштабировано в рамках как одного Производства Двигателей, так и в рамках всех механообрабатывающих производств, создав один единый электрических проект для интеграции и внедрения этого решения в действующую электрическую схему. При этом с учетом загрузки оборудования достаточно будет установить преобразователь частоты только на один из насосов и автоматизировать его работу установив датчик абсолютного давления на напорном трубопроводе каждой установки.

### **3 Экономическая эффективность внедрения преобразователей частоты на системных насосах установок фильтрации охлаждающей жидкости**

Определение экономической эффективности, которую можно получить от внедрения частотно регулируемых преобразователей (ЧПР), является актуальной проблемой и общие утверждения о том, что экономия электроэнергии составит 30–80%, всегда необходимо подтверждать.

На данный момент не существует универсальной методики применения ЧРП и экономический эффект от его внедрения напрямую зависит от многих факторов, характерных для конкретной установки.

Однако существует большое количество определенных типовых решений. Например, сотрудниками МЭИ разработана методика оценки экономической эффективности применения частотного электропривода в системах водоснабжения и инструкция по расчету экономической эффективности применения ЧРЭ. Теоретические аспекты экономии отражены в литературе [31]-[32].

Наиболее точные расчёты производительности насоса, давления на выходе и потребляемую мощность, находят используя паспортные характеристики насоса. Но они не всегда приводятся для различных диапазонов скоростей.

В основном они даются для номинального числа оборотов, реже еще двух – трех значений частоты вращения. Но при наличии таких графиков можно пересчитать их для других скоростей вращения.

Для этого надо по известной производительности насоса и давлению на выходе определить по графикам насколько удалена рабочая точка от точки максимального КПД, а если же входные параметры меняются во времени, нужно сделать несколько подобных оценок [9].

При расчётах центробежных насосов принято принимать следующие допущения и зависимости:



- 1) производительность (расход) пропорциональна скорости вращения ротора;
- 2) давление пропорционально квадрату скорости вращения ротора;
- 3) потребляемая мощность пропорциональна скорости вращения в кубе.

При дросселировании расход будет уменьшаться, но давление на выходе насоса при этом будет расти, в связи с чем потребляемая мощность будет мало снижаться при уменьшении расхода.

В любом случае для более точной оценки экономической эффективности от применения преобразователей частоты требуется организовать установку приборов учета электрической энергии и произвести замеры электропотребления до установки ПЧ и после его установки.

Кроме установки ПЧ нужно провести все необходимые регулировки и настройки в работе системы.

Наибольший экономический эффект от внедрения частотно-регулируемого привода с точки зрения энергосберегающих мероприятий достигается на квадратичных нагрузках (центробежные насосы, вентиляторы) в случае замены дросселирования частотным регулированием.

Также при внедрении частотного регулирования в связи с уменьшением рабочей частоты снижается и износ насоса, уменьшаются гидравлические и механические нагрузки на трубопроводы, запорную и регуливающую арматуру [34]-[35].

Все перечисленное обуславливает увеличение сроков службы и межремонтного ресурса насосов и их электродвигателей. Также стоит учитывать и то, что будет снижена нагрузка на питающую сеть в связи с исключением пусковых токов при прямых пусках электродвигателей насосов.

Для получения максимального эффекта экономии от применения ПЧ необходимо предварительно провести обследование и изучение сети.

### 3.1 Методы оценки экономического эффекта от внедрения ЧПР и расчет эффективности

#### 3.1.1 Методы оценки экономического эффекта от внедрения ЧПР

При оценке экономического эффекта от внедрения автоматизированных систем частотно-регулируемого привода необходимо использовать следующие данные: стоимость электроэнергии; затраты на сервисное обслуживание оборудования составляют ~3% стоимости, срок службы оборудования -10 лет [22].

Экономический эффект от внедрения преобразователей частоты рассмотрим на примере использования насосной установки, оснащенной 5 насосными агрегатами, производительностью 180 м<sup>3</sup>, оснащенные электрическими двигателями мощность 37 кВт. Оптимальное рабочее давление в системе 3,0 бар, оптимальный проток 6500 л/мин. (0,108 м<sup>3</sup>/с), высота водяного столба 6 + 14 метров, диаметр напорного трубопровода 440 мм. Исходные данные по расходу СОЖ для расчета представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Данные по расходу СОЖ на технологическом оборудовании

Количество включенных насосных агрегатов	Потребляемая мощность, кВт	Cos Ψ	P <sub>сист.</sub> бар	Проток литр/мин	Проток м <sup>3</sup> /сек
4	104	0,78	3,9	8100	0,135
4	56,3	0,69	-	1040	0,017
3	48,5	0,69	-	1000	0,017
2	94,4	0,82	3,8	8000	0,133
2	72,1	0,83	2,5	6200	0,103

При проведении замеров на действующем технологическом оборудовании механообрабатывающего производства был использован прибор протока жидкости ф. Panametrics (PT868), а мощность и cosΨ

замерялись многофункциональными клещами ф. Актаком (тип АТК -2200), напор на выходе насоса измерялся при помощи штатного манометра, установленного на технологической установке.

Для проверки полученных результатов экономии проведем расчет по двум методам:

- 1) при предполагаемом неизменном среднем расходе жидкости;
- 2) с учетом неравномерного потребления жидкости.

### **3.2 Расчет экономического эффекта от внедрения ЧРП на установках подачи СОЖ**

#### **3.2.1 Расчет необходимого напора при стандартной схеме работы**

При неизменном среднем расходе жидкости экономический эффект от снижения расхода потребляемой электроэнергии при внедрении преобразователей частоты можно оценить следующим образом: электрическая мощность, потребляемая насосной установкой от сети, определяется по формуле 1.

$$P = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H}{102 \cdot \eta_{уст}}, \quad (1)$$

где:

$\eta_{уст}$  – КПД установки

$\gamma$  – (1000 кг/м<sup>3</sup>) - плотность СОЖ,

$Q$  – подача СОЖ, м<sup>3</sup>/час

$H$  – напор на выходе насоса (метры водяного столба)

Рассчитаем общий КПД системы с насосной установкой с управлением дросселированием.

$$\eta_{уст} = \eta_{двиг} \cdot \eta_{нас} = 0,93 \cdot 0,72 = 0,66, \quad (2)$$

где:

$\eta_{\text{двиг}}$  – КПД двигателя

$\eta_{\text{нас}}$  – КПД насоса

$$\eta_{\text{уст}} = \eta_{\text{двиг}} \cdot \eta_{\text{нас}} = 0,93 \cdot 0,72 = 0,66$$

Рассчитаем общий КПД системы с насосной установкой с управлением от преобразователя частоты.

$$\eta_{\text{уст пч}} = \eta_{\text{двиг}} \cdot \eta_{\text{нас}} \cdot \eta_{\text{пч}} = 0,93 \cdot 0,72 \cdot 0,97 = 0,65 \quad (3)$$

где:

$\eta_{\text{двиг}}$  – КПД двигателя

$\eta_{\text{нас}}$  – КПД насоса

$\eta_{\text{пч}}$  – КПД ПЧ

Рассчитаем напор на выходе насоса в нерегулируемом режиме  $H_{\text{баз}}$ .

Высота нагнетания для установки составляет 20 метров, при всех потерях напор в напорном трубопроводе будут определяться общей длиной отдельных частей трубопровода, входящих в систему. Рассчитаем эквивалентную длину трубопровода

$$L_{\text{экв}} = L_{\text{труб}} + n \cdot L_{\text{кл}} + n \cdot L_{\text{задв}} + n \cdot L_{\text{отв}} = 52 + 24 + 32 + 3,6 = 111,6 \text{ м} \quad (4)$$

где:

$L_{\text{труб}}$  – длина трубопровода

$L_{\text{задв}}$  – длина трубопровода обратных клапанов

$L_{\text{кол}}$  – длина трубопровода для задвижек

$L_{\text{кл}}$  – длина трубопровода отводов 90 градусов

Исходя из этого, узнаем каковы потери напора в метрах водяного столба при подаче 8100 л/мин через трубу диаметром 440мм, что будет соответствовать 7,2 м на 100м.

Таким образом, потеря напора для  $L_{\text{ЭКВ}}$  системы с дросселированием:

$$\Delta H = \frac{(L_{\text{ЭКВ}} \cdot \Delta H_{\text{тр}})}{100} = \frac{(111,6 \cdot 7,2)}{100} = 8,03 \text{ м} \quad (5)$$

где  $\Delta H_{\text{тр}}$  - потери на трубопроводе для существующей трубы.

При конечном давлении в системе 2,2 бар, насос, согласно своей характеристике, должен создавать напор  $H_{\text{нас}} = 24,5$  метра.

Тогда общий напор системы  $H_{\text{баз}}$  при дросселировании составит:

$$H_{\text{баз}} = H_{\text{нагн}} + H_{\text{труб}} + H_{\text{нас}} = 20 + 8,03 + 24,5 = 52,53 \text{ м} \quad (6)$$

Высота нагнетания составляет 20 метров также, как и в базовом случае. Потере напора в напорном трубопроводе будут определяться общей длиной отдельных частей трубопровода входящих в систему.

Рассчитаем эквивалентную длину трубопровода

$$L_{\text{ЭКВ}} = L_{\text{труб}} + n \cdot L_{\text{кл}} + n \cdot L_{\text{отв}} = 52 + 24 + 3,6 = 79,6 \text{ м}, \quad (7)$$

где:

$L_{\text{труб}}$  – длина трубопровода

$L_{\text{задв}}$  – длина трубопровода обратных клапанов

$L_{\text{кл}}$  – длина трубопровода отводов 90 градусов.

Исходя из данных, найдем потери напора в метрах водяного столба при подаче 6800 л/мин через трубу диаметром 440мм, что будет соответствовать 5,9 м на 100м.

Таким образом, потеря напора для  $L_{\text{экв}}$  системы с преобразователем частоты

$$\Delta H = \frac{(L_{\text{экв}} \cdot \Delta H_{\text{тр}})}{100} = \frac{(79,6 \cdot 5,9)}{100} = 4,6 \text{ м}, \quad (8)$$

где  $\Delta H_{\text{тр}}$  - потери на трубопроводе для существующей трубы.

При конечном давлении в системе 2,0 бар, насос, согласно своей характеристике, должен создавать напор  $H_{\text{нас}} = 20,4$  метра.

Рассчитаем напор на выходе насоса в регулируемом режиме  $H_{\text{рег}}$ .

$$H_{\text{баз}} = H_{\text{нагн}} + H_{\text{труб}} + H_{\text{нас}} = 20 + 4,6 + 20,4 = 45,3 \text{ м} \quad (9)$$

### **3.3 Расчет экономического эффекта от внедрения ЧРП на установках подачи СОЖ**

Среднесуточная экономия электроэнергии  $N_{\text{сут}}$  при неизменном водопотреблении в базовом (нерегулируемом) и регулируемом преобразователем частоты режимах с оптимальным расходом и давлением.

$$N_{\text{сут}} = N_{\text{э}} \cdot T_{\text{см}} = 33,5 \cdot 16 = 536 \text{ кВт} \cdot \text{ч} \quad (10)$$

где  $T_{\text{см}}$  - продолжительность 2 смен = 16ч.

При этом годовой экономический эффект от снижения потребляемой электроэнергии можно рассчитать следующим образом:

$$\text{Э}_1 = \Delta \text{Э}_{\text{ц}} \cdot N_{\text{сут}} \cdot 248 = 7,32 \cdot 536 \cdot 248 = 973032 \text{ руб}, \quad (11)$$

где:

$T$  - тариф на электроэнергию (руб./кВт·ч) принимаем 7,3 рубля за кВт;

248 - количество рабочих дней в году.

Для сравнения адекватности расчета экономического эффекта при внедрении ЧРП на установках подачи СОЖ проведем расчет в соответствии

инструкцией ведущих электротехнических ВУЗов страны (ВНИИЭ и МЭИ), по программе работ в рамках создания и внедрение частотно-регулируемого электропривода (ЧРП) в ТЭК, утвержденной министерством энергетики РФ [26].

Данная инструкция включает в себя все основные аспекты по энергосбережению и дает возможность определить предварительные масштабы ресурсосбережения в насосных и установках.

Данная инструкция подходит для применения на установках, находящиеся в эксплуатации, т.е. при том не будет изменена их технологическая схема работы. Сами способы оценки эффективности внедрения ЧРП, изложенные в инструкции предназначены для персонала, занятого в производстве энергосбережением, а также эксплуатантов подобных насосных промышленных агрегатов.

Целесообразность применения частотного регулирования взамен дросселирования будет оцениваться по заданным диаграммам требуемого для установки расхода при расчетном цикле работы механизмов в следующей последовательности:

1. Регистрируют номинальные данные насоса  $Q_{\text{НОМ}}$  (м<sup>3</sup>/час),  $H_{\text{НОМ}}$  (м в.ст.),  $\eta_{\text{НАС}}$   $P_{\text{ДВ} \cdot \text{НОМ}}$  (кВт),  $n_{\text{НОМ}}$  (об/мин),  $\eta_{\text{ДВИГ} \text{НОМ}}$ ;

2. На действующей установке измеряют или устанавливают расчетным путем мощность  $P$ , потребляемую двигателем, и соответствующую производительность установки  $Q$ , при полностью открытой задвижке ( $P_{\text{МАКС}}$  и  $Q_{\text{МАКС}}$ ) и в ряде промежуточных точек и строят зависимость мощности относительного расхода (график на рисунке 34), при этом  $Q_{\text{МАКС}}^* = 1$

$$Q^* = \frac{Q}{Q_{\text{МАКС}}} \quad (12)$$

и минимального расхода

$$Q_{\text{МИН}}^* = \frac{Q}{Q_{\text{МИН}}} \quad (13)$$

$$Q_{\text{мин}}^* = \frac{0,017}{0,135} = 0,125.$$

3. Строим зависимость потребляемой мощности  $P$ , кВт, от относительного расхода  $Q^*$  при базовом варианте регулирования за счет дросселирования и при частотном регулировании скорости в соответствии с зависимостью  $P = P_{\text{max}}(Q^*)^3$  и получаем график показанные на рисунке 33.

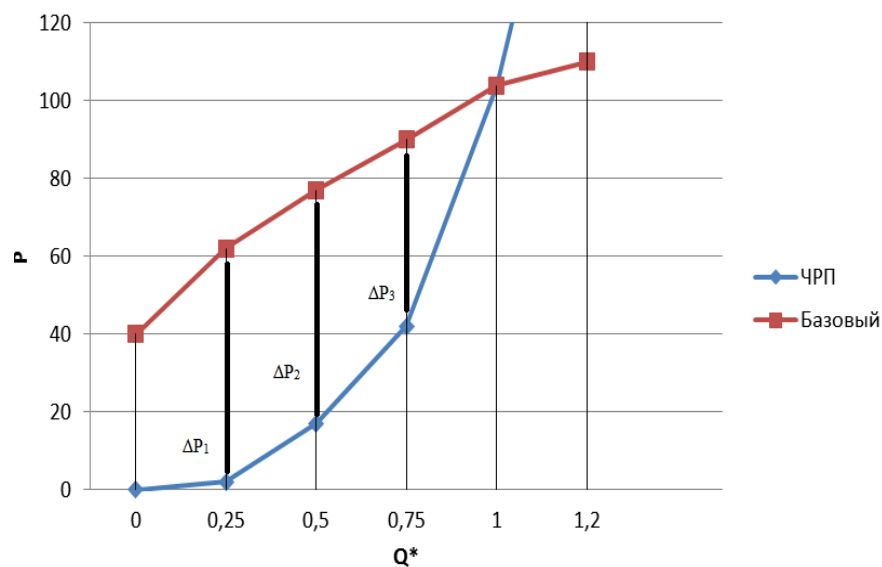


Рисунок 33 – Зависимость потребления электроэнергии при разных способах регулирования

Разница  $\Delta P$  между графиками базовой системы и ЧРП и будет являться экономией мощности при частотном регулировании скорости насосной установки.

Построим диаграмму зависимости относительного расхода  $Q^*$  от времени, представленную на рисунке 34. За цикл примем число часов работы насосов в течение смены в различных режимах.



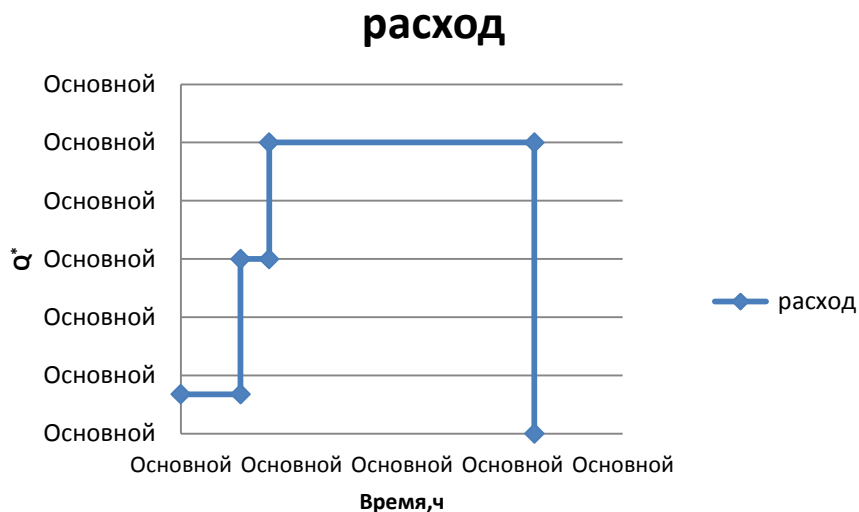


Рисунок 34 – Зависимость расхода СОЖ от времени цикла работы  
установки подачи СОЖ

По диаграмме  $Q^*(t)$  на рисунке 34 и кривым на рисунке 33 определяют  $\Delta P_1$   $\Delta P_2$   $\Delta P_3$  - энергию, сэкономленную за цикл (2 смены):

$$\Delta \mathcal{E}_{\text{ц}} = \Delta P_1 t_1 + \Delta P_2 t_2 + \Delta P_3 t_3 = 49 \cdot 3 + 61 \cdot 1 + 31 \cdot 12 = 580 \text{ кВт} \cdot \text{ч} \quad (14)$$

Энергия, сэкономленная за год:

$$\Delta \mathcal{E}_{\text{год}} = \Delta \mathcal{E}_{\text{ц}} \cdot 248 = 580 \cdot 248 = 143840 \text{ кВт} \cdot \text{ч} \quad (15)$$

где: 248 - число рабочих дней для установки в году.

Определяем при заданном тарифе  $\text{Ц}_{\text{эл.эн}}$  (руб./кВт·ч) стоимость сэкономленной электроэнергии за год (руб./год):

$$\text{С}_{\text{эл.эн.}} = \Delta \mathcal{E}_{\text{ц}} \cdot \text{Ц}_{\text{эл.эн.}} = 143840 \cdot 7.32 = 1052909 \text{ руб.} \quad (16)$$

При регулировании задвижкой с уменьшением расхода воды КПД насоса уменьшается, а значение напора растет. Следовательно, с уменьшением расхода воды удельный расход электроэнергии быстро

возрастает. Удельный расход электроэнергии при частотном регулировании электродвигателя снижается, при этом в системах с преобразованием эффективность возрастает при переменном расходе.

### **Выводы по разделу 3**

1. На сегодня момент не существует универсальной методики оценки применения ЧРП и экономический эффект от его внедрения напрямую зависит от многих факторов, характерных для конкретной установки, но существует большое количество определенных типовых решений.

2. Для проверки полученных результатов экономии был проведен расчет по двум методам:

- а) при предполагаемом неизменном среднем расходе жидкости
- б) с учетом неравномерного потребления жидкости

Результаты расчетов показали сходимость расчетных данных и данных с приборов учета и контроля расхода электроэнергии и протока СОЖ.

## Заключение

1. При работе действующих технологических установок подачи СОЖ выявлены недостатки, которые необходимо устранить для повышения их энергоэффективности. Изменении режимов работы насосов за счет регулирования скорости приводного двигателя является перспективным методом, а регулирование скорости вращения насосных агрегатов дает возможность значительной экономии электроэнергии: 30 - 50% от номинальной мощности приводного двигателя насоса. Но при этом надо учитывать возможные проблемы с ухудшением охлаждения штатным вентилятором на частотах вращения отличающихся от номинальных.

2. Замена электродвигателей на более энергоэффективные целесообразно в случае наличия достаточно большого количества однотипных электрических машин на оборудовании и при условии интенсивной эксплуатации технологического оборудования. При этом их внедрение, взамен установленных, дает экономию электроэнергии около 5%, но внедрение их на крупных предприятиях осложняется в связи с наличием большого оборотного фонда электрических машин и высокими затратами на единовременную замену.

3. Для регулирования скорости вращения насосных агрегатов необходимо использовать блоки мягкого пуска, преобразователями частоты, как специализированные, так и общепромышленными. Но рациональнее применить общепромышленные преобразователи частоты, так как это более оправданно на крупных предприятиях с большим «парком» уже действующих преобразователей частоты. Внедрение типового проекта установки и автоматизации работы преобразователей частоты на установках подачи СОЖ позволяет экономить в среднем более 500 кВт в течение рабочей смены, что соответствует более 1 млн. рублей в год. Экономический расчет выполнен в двумя способами в соответствии с рекомендованной ведущими электротехническими ВУЗаами методикой.

## Список используемых источников

1. Баулин А.Ю., Гуринович А.Д. Комплексные решения проблем энергоэффективности в системах водоснабжения и водоотведения. Материалы 8-го международного конгресса «Вода: Экология и технология», ЭКВАТЭК – 2008.
2. Белов М. П. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов: учебник для вузов / М.П. Белов, В.А. Новиков, Л.Н. Рассудов. – М.: Академия, 2007. – 576с.
3. Белов М.П. Инжиниринг электроприводов и систем автоматизации: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / М.П. Белов и др. под ред. В.А. Новикова, Л.М. Чернигова. – М.: Академия, 2006. – 368 с.
4. Белов М. П., Новиков В.А. Оптимизация интегрированных электроприводных систем механизмов, агрегатов, машин и комплексов. / М. П. Белов, В.А. Новиков, - СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015. - 300 с.
5. Браславский И.Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод / И.Я. Браславский, З.Ш. Ишматов, В.Н. Поляков. – М.: Академия, 2004. - 202с.
6. ВРД 39-1.10-052–2001. Методические указания по выбору и применению асинхронного частотно-регулируемого привода мощностью до 500 кВт. М.: ОАО «Газпром», 1999.
7. ГОСТ Р 54413-2011 Машины электрические вращающиеся. Часть 30. Классы энергоэффективности односкоростных трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором (код IE).
8. Иванов А.Г., Белов Г.А., Сергеев А.Г. Системы управления полупроводниковыми преобразователями. Чебоксары, изд-во ЧУ, 2010, 448 с.
9. Инструкция по расчету экономической эффективности применения частотно-регулируемого электропривода. Министерство топлива и энергетики РФ; 1997.

10. Карэн М. ABB's Energy Portfolio Management Solutions presented at Asian Power Utility Forum in Jakarta / Карэн М. // Материалы форума «Asian Power Utility». – 2017. URL: <http://new.ABB.com/ru> (дата обращения: 02.05.2021).

11. Копырин В.С., Бородацкий Е.Г. Автоматизация насосной станции с применением частотно-регулируемого электропривода / В.С. Копырин, Е.Г. Бородацкий / Силовая электроника. – 2006, №2. – с. 20-23

12. Лезнов Б. С. Методика оценки эффективности применения регулируемого электропривода в водопроводных и канализационных насосных установках. – М.: Машиностроение, 2011. 88с

13. Лезнов Б. С. Частотно-регулируемый электропривод насосных установок / Б. С. Лезнов. – М.: Машиностроение, 2013. – 176 с.

14. Официальный сайт компании «Schneider Electric. URL: <http://www.schneider-electric.com>. (дата обращения: 02.05.2021).

15. Официальный сайт компании «Siemens». URL: <http://www.siemens.com> (дата обращения: 02.05.2021).

16. Рузанов А.Н., Макаров С.В. Применение энергосберегающих технологий для управления двигателями насосных агрегатов на установках фильтрации и подачи СОЖ. // Сборник статей международной научно-практической конференции «Новые задачи технических наук и пути их решения» 10 декабря 2015 года: в 2-х ч. Ч. 2. /- Уфа: Аэтерна, 2015. – с. 102–106

17. Спиридонов Р.В. Модернизация насосных систем подачи охлаждающей жидкости на механообрабатывающих производствах // Сборник статей Международной научно-практической конференции «Внедрение передового опыта и практическое применение результатов инновационных исследований» (05 июня 2021 г., г. Новосибирск). - Уфа: Аэтерна, 2021. – с. 86 – 89.

18. Спиридонов Р.В. Повышение энергоэффективности насосных систем подачи охлаждающей жидкости // сборник статей Международной

научно-практической конференции «Актуальные проблемы теории, методологии и практики научной деятельности» (25 апреля 2021 г., г. Волгоград). - Уфа: Аэтерна, 2021. – 243 с.

19. Современные подходы к структурно - параметрическому синтезу, исследованию и управлению автоматизированными электроприводами промышленных агрегатов: монография / М.П. Белов; СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2012. – 451 с.

20. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием: Учебник для вузов / Г.Г. Соколовский. – М.: Академия, 2006. – 272 с.

21. Терехов В.М. Системы управления электроприводов: учебник для студ. высш. учеб. заведений / В.М. Терехов, О.И. Осипов; под ред. В.М. Терехова. – М.: Академия, 2005. – 304 с

22. Технический паспорт. НПФ «Электро-РПС». 2002. «Станция управления частотно-регулируемым электроприводом насосных агрегатов типа СУ-ЧЭ-ПП»

23. Усольцев А.А. Векторное управление асинхронными двигателями. Учеб. пособие по дисциплинам электромеханического цикла / Усольцев А.А. – С–Пб, 2002.

24. Фираго Б.И. Регулируемые электроприводы переменного тока / Б.И. Фираго, Л.Б. Павлячик. - Мн.: Техноперспектива, 2006. - 363 с.

25. Чебаевский В.Ф. Проектирование насосных станций и испытание насосных установок / В.Ф. Чебаевский. К. П. Вишневский, Н. Н. Накладов. – М.: Колос, 2000. – 376 с

26. Шакарян Ю.Г. Инструкция по расчету экономической эффективности применения частотно-регулируемого электропривода, АО ВНИИЭ, МЭИ, М.- 1997 г.

27. Шумов Ю.Н., Сафонов А.С. Энергоэффективные электрические машины (обзор зарубежных разработок) // Электричество. № 4, 2015. с. 45-49.

28. Электропривод в современных технологиях: учебник для студ. учреждений высш. образования / под ред. В.А. Новикова. – М.: Академия, 2014. – 400 с.
29. Эльфляйн Н. Рецепт эффективности [Электронный ресурс] / Н. Эльфляйн // Журнал «Картины будущего». – 2015. URL: <http://siemens.ru> (дата обращения: 02.05.2021).
30. Boldea, I. Induction Machines Handbook / Ion Boldea, Syed A. Nasar // (Electric power engineering series) Includes bibliographical references and index. by CRC Press LLC. – 2012. – 946 p
31. Kai, F.E. Monitoring and Diagnosing Manufacturing Processes Using a Hybrid Architecture / F.E. Kai, K.J. Paul. – Mechanical Engineering, 2017.
32. Hughes, B. Drury, Electric Motors and Drives, fourth edition Edition, Elsevier Ltd., Oxford, UK, 2013.
33. Richard Ed., Dorf C. The Electrical Engineering Handbook. Boca Ration: CRC Press LLC, 2016.
34. Statistical optimization of frequency regulated induction electric drives with scalar control. URL : <https://cyberleninka.ru/article/v/statistical-optimization-of-frequency-regulated-induction-electric-drives-with-scalar-control> Published, 2019.
35. Three-phase energy supply systems simulation for the total power losses components assessment. URL: <https://cyberleninka.ru/article/v/three-phase-energy-supply-systems-simulation-for-the-total-power-losses-components-assessment> Published, 2017.

## Приложение А

### Схема обвязки цепей питания PLC Mitsubishi

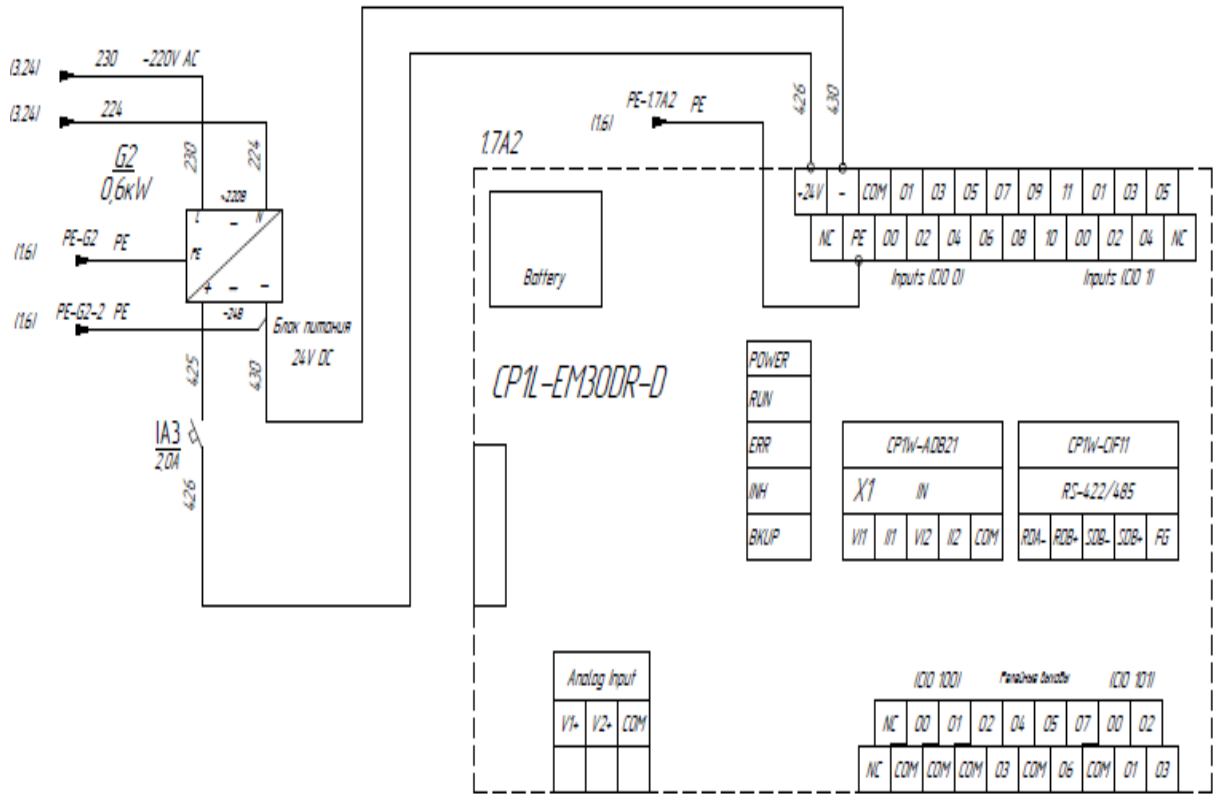


Рисунок А.1 – Схема обвязки цепей питания PLC Mitsubishi



## Приложение Б

### Схема обвязки входов и выходов программируемого контроллера Mitsubishi

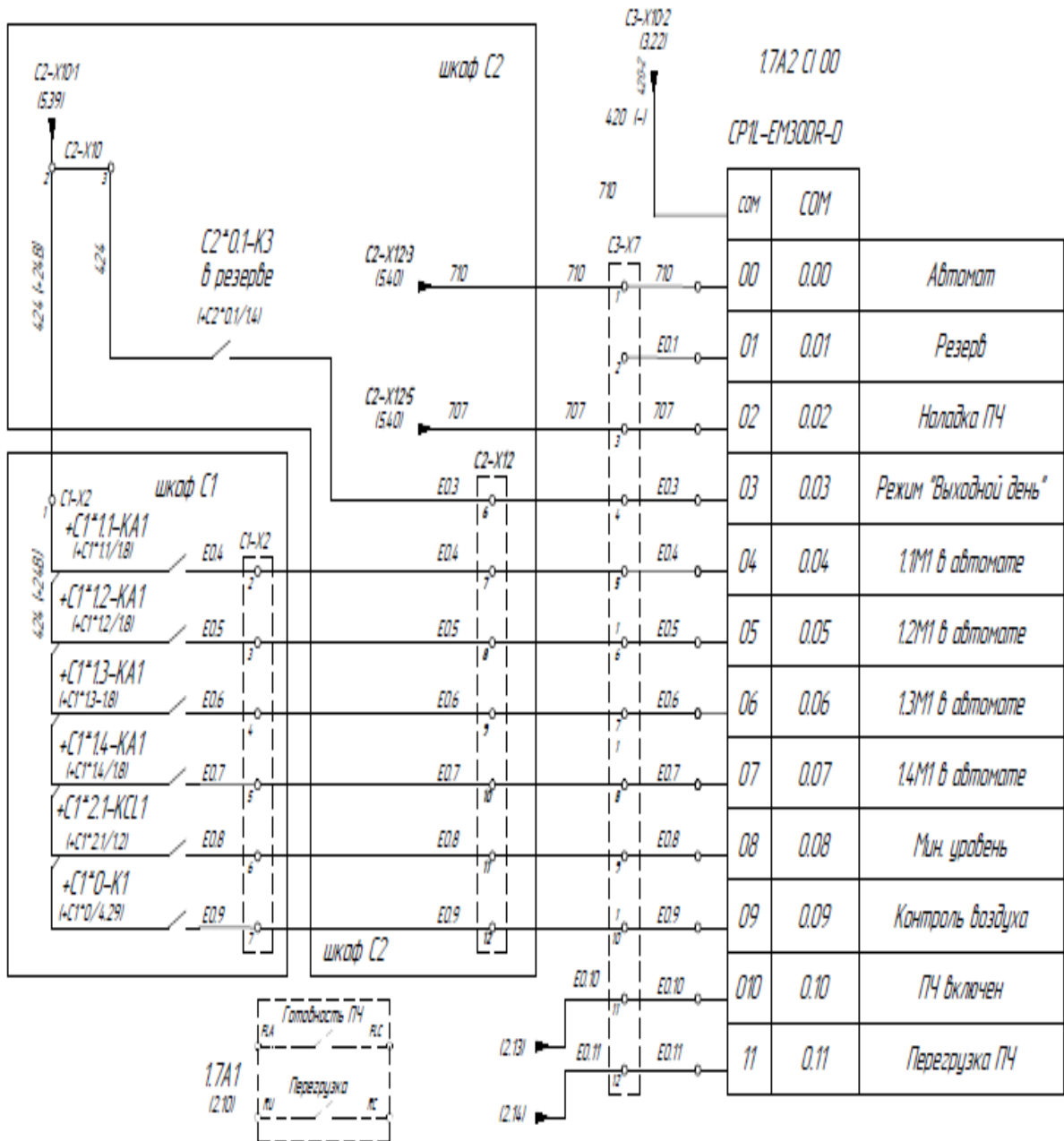


Рисунок Б.1 – Схема обвязки входов и выходов программируемого контроллера Mitsubishi

