

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)

---

Энергосбережение и энергоэффективность  
(направленность (профиль))

---

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА  
(МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)**

на тему Повышение энергоэффективности системы собственных нужд

ТЭЦ Волжского автозавода

---

Студент

А.С. Саксонов

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный  
руководитель

к.п.н, доцент, М.Н. Третьякова

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

Тольятти 2020

## Содержание

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 Анализ режимов работы крупного насосного оборудования СН ТЭЦ ВАЗа и современных решений в области ЧРП.....	7
1.1 Анализ режимов работы крупного насосного оборудования СН ТЭЦ ВАЗа.....	7
1.2 Анализ современных решений в области ЧРП.....	17
1.3 Выводы к разделу 1.....	20
2 Проверка соответствия номинальной производительности крупного насосного оборудования системы СН ТЭЦ ВАЗа фактической производительности.....	22
2.1 Выводы к разделу 2.....	24
3 Расчет параметров частотных преобразователей для высоковольтных асинхронных электродвигателей крупных насосных агрегатов ТЭЦ ВАЗа...	25
3.1 Расчет параметров высоковольтного асинхронного электродвигателя сетевого насоса.....	25
3.2 Расчет и выбор ключей преобразователя частоты .....	38
3.3 Расчет потерь в инверторе .....	40
3.4 Тепловой расчет параметров охладителя инвертора .....	44
3.5 Расчет и выбор диодов выпрямителя.....	46
3.6 Тепловой расчет параметров охладителя выпрямителя .....	50
3.7 Расчет и выбор охладителя .....	51
3.8 Расчет фильтра .....	56
3.9 Расчет снаббера .....	60
3.10 Расчет механических характеристик ВАД с частотным регулированием .....	63
3.11 Выводы к разделу 3.....	72
4 Оценка технико-экономической эффективности от внедрения ЧРП .....	74

4.1 Выводы к разделу 4.....	82
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	83
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ:.....	86

## ВВЕДЕНИЕ

Теплоэлектроцентраль Волжского автозавода (ТЭЦ ВАЗа) является подразделением Самарского филиала ПАО «Т Плюс». Это – крупный производитель электроэнергии (ЭЭ) и теплоэнергии (ТЭ) в Самарской области (40 % электроэнергии, 30 % теплоэнергии). Электрическая мощность ТЭЦ составляет 1172 МВт, тепловая – 3903 Гкал. Годовая выработка электроэнергии составляет 6700 млн. кВт·ч, годовой отпуск тепловой энергии – 6800 тыс. Гкал/ч. В структуру ТЭЦ ВАЗа входят: котельный цех, турбинный цех, химический цех, электрический цех, цех автоматизированных систем управления технологическим процессом.

ТЭЦ ВАЗа обеспечивает энергоснабжение, отопление и горячее водоснабжение Волжского автомобильного завода, Автозаводского района города Тольятти и коммунальной зоны.

ТЭЦ Волжского автозавода имеет 11 турбогенераторов, 14 паровых энергетических котлов, 14 пиковых водогрейных котлов. Для выдачи электрической мощности ТЭЦ ВАЗа имеет два открытых распределительных устройства (ОРУ): 110 кВ и 220 кВ. По линиям 220 кВ имеется связь с Единой энергосистемой России. Для обеспечения электроэнергией собственных нужд на ТЭЦ имеются распределительные устройства собственных нужд 6 кВ (РУСН 6 кВ), запитанные от трансформаторов собственных нужд 110/6 кВ (ТСН 110/6 кВ) которые в свою очередь запитаны от отпаек турбогенераторов.

Собственные нужды (СН) электростанции – это важнейший аспект любой электростанции, особенно ТЭЦ. Оборудованию СН необходимо уделять особое внимание, так как от работы оборудования СН зависит работа всей электростанции.

К числу СН относят – освещение; низковольтные и высоковольтные электродвигатели насосных агрегатов, вентиляторов; электронагревательное оборудование (калориферы, тепловые завесы, установки отжига стыков

трубопроводов); сварка; бытовые потребители (розеточная сеть, электродвигатели инженерных коммуникаций). Наибольшее распространение среди всех механизмов СН ТЭЦ имеют электродвигатели. Наиболее энергоемкими являются высоковольтные электродвигатели (ВАД) крупных насосов задействованных в основном технологическом процессе.

У разных типов электростанций на собственные нужды расходуется различное количество генерируемой электроэнергии – у гидроэлектростанций – 1-3 %, конденсационных электростанций – 5-8 %, атомных электростанций – 6-10 %, теплоэлектроцентралей – 6-12 % [1]. ТЭЦ Волжского автозавода расходует 9 % генерируемой электроэнергии (105 МВт). Из них 68 МВт расходуется на высоковольтные электродвигатели, что составляет 64 % от всей мощности выделяемой на СН.

Большинство высоковольтных электродвигателей, эксплуатируемых на ТЭЦ ВАЗа, используются для привода насосов и вентиляторов, регулирование производительности, которых осуществляется при помощи дросселирования. Данный способ изменения производительности механизмов для транспортировки жидкости и газа в настоящее время признается малоэффективным. Для дросселирования характерны

- 1) низкий КПД;
- 2) большие потери энергии;
- 3) нагрев рабочей среды, возникающий в процессе её перекачки.

Вышеуказанные свойства дроссельного регулирования приводят к тому, что система СН ТЭЦ Волжского автозавода работает недостаточно эффективно. Это в свою очередь ведет

- 1) к повышению стоимости вырабатываемой электроэнергии;
- 2) к повышению стоимости вырабатываемой тепловой энергии;
- 3) к повышению расходов на собственные нужды;
- 4) к повышенным затратам на ремонт оборудования.

В тоже время имеются определенные резервы по повышению энергоэффективности системы собственных нужд ТЭЦ.

Цель работы – повышение энергоэффективности системы собственных нужд ТЭЦ ВАЗа за счет модернизации электропривода на основе высоковольтных асинхронных электродвигателей, задействованных в системе собственных нужд ТЭЦ ВАЗа.

Объект исследования – система собственных нужд ТЭЦ ВАЗа.

Предмет исследования – электропривод на основе высоковольтных асинхронных электродвигателей, задействованных в системе собственных нужд ТЭЦ ВАЗа.

Практическая значимость работы заключается в возможности использования предлагаемой модернизации для внедрения на ТЭЦ ВАЗа.

Новизна работы состоит в согласовании характеристик частотно-регулируемых высоковольтных электродвигателей и механизмов для транспортировки жидкости и газа, задействованных в системе собственных нужд ТЭЦ ВАЗа.

# **1 Анализ режимов работы крупного насосного оборудования СН ТЭЦ ВАЗа и современных решений в области ЧРП**

## **1.1 Анализ режимов работы крупного насосного оборудования СН ТЭЦ ВАЗа**

Как сказано выше, наибольшее потребление на любой ТЭЦ имеют высоковольтные асинхронные электродвигатели крупных насосов. На ТЭЦ ВАЗа к такому оборудованию относят

- 1) питательные электронасосы;
- 2) циркуляционные насосы;
- 3) сетевые насосы и подпорно-сетевые насосы;
- 4) дымососы, дымососы регенерации газов;
- 5) дутьевые вентиляторы;

Известно, что для ТЭЦ, в отличие от других типов электростанций преимущественным является тепловой график нагрузки [2]. Следствием этого является очень сильное различие в загрузке ТЭЦ в летний и зимний сезоны.

Это в свою очередь накладывает свой отпечаток на режимы работы насосного оборудования ТЭЦ, участвующего в главном технологическом процессе. Главной особенностью режима работы такого насосного оборудования является зависимость производительности от сезона года. Так, в зимнее время года потребителям тепловой энергии необходимо получать отопление, горячее водоснабжение и теплоноситель для вентиляции. Соответственно, для покрытия нужд потребителей задействуется большее количество турбогенераторов и котельных агрегатов, чем в летнее время, и вместе с этим производительность насосного оборудования участвующего в главном технологическом процессе также возрастает. В летнее же время работает минимальное число турбогенераторов и котельных агрегатов. Так как в этот период потребителям тепловой энергии необходимо получать

только горячее водоснабжение. В связи с этим, насосное оборудование, участвующее в главном технологическом процессе, летом имеет значительно более низкую производительность относительно зимнего времени года. На рисунке 1 показан тепловой график ТЭЦ ВАЗа за 2017 год.

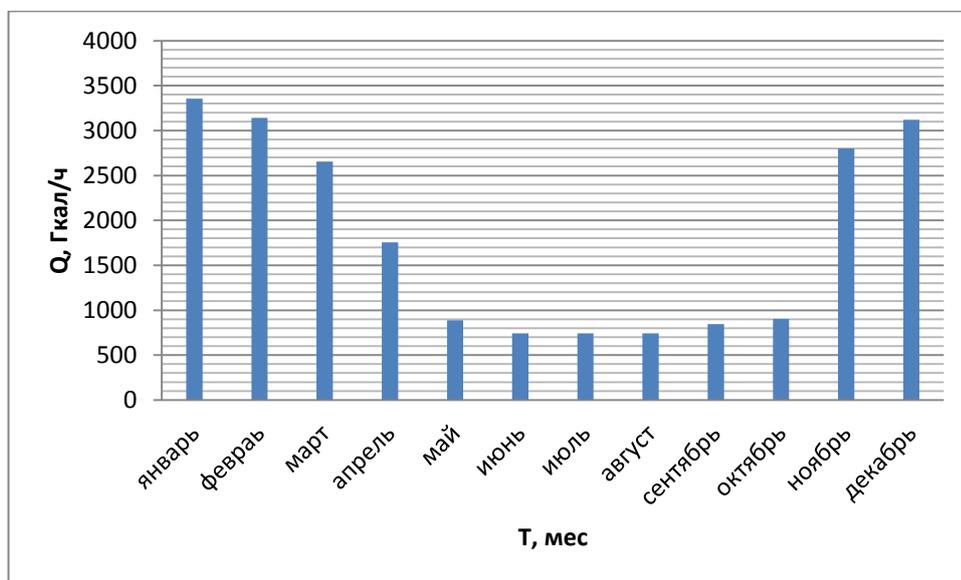


Рисунок 1 – Тепловой график ТЭЦ ВАЗа на 2017 год

Эту особенность работы оборудования ТЭЦ можно использовать для повышения энергоэффективности путем внедрения частотно-регулируемого электропривода (ЧРП). Предпосылки заключаются в том, что для изменения производительности насосного оборудования в соответствии с сезонной тепловой и электрической нагрузкой за счет дросселирования, электрическая мощность, потребляемая электродвигателями насосов, остается на номинальном уровне [2]. При внедрении ЧРП появляется возможность изменять производительность насосов без применения дросселирования, изменением скорости вращения ротора электродвигателя. Тем самым создаются предпосылки для снижения электроэнергии расходуемой двигателями насосов, поскольку изменение скорости вращения прямо пропорционально мощности, подводимой к электродвигателям.

В таблице 1 приведен перечень высоковольтных электродвигателей крупного насосного оборудования, имеющихся на ТЭЦ ВАЗа с указанием класса напряжения, мощности, производительности напора (давления), назначения каждого электродвигателя.

Таблица 1 – Перечень наиболее энергоемких электродвигателей ответственных механизмов задействованных в главном технологическом процессе ТЭЦ ВАЗа.

Оперативное наименование	Напряже-ние, кВ	Мощ-ность, кВт	Произво-дитель-ность пиковая, м <sup>3</sup> /ч	Напор, м (давлени е кПа)	Произво-дитель-ность минимальная, м <sup>3</sup> /ч	Назначе-ние механизма
питательный электронасос	6	4000	656	203	265	подача воды в котел из конденсатора и с ХВП
циркуляционны й насос	6	1600	19770	2,5	9898	циркуля-ция охлаждающе й воды по контуру «градирня-конденса-тор»
сетевой насос	6	1600	1092	53	334	подача сетевой воды в теплосеть из сетевого подогревател я
сетевой городской насос	6	630	521	50	105	подача сетевой воды в теплосеть от пиковых котлов
подпорно-сетевой насос	6	500	521	44	98	компенсация давления из-за утечек в тепловой сети
дымосос	6	500	35000	4450	12300	удаление дымовых газов

Продолжение таблицы 1

дымосос регенерации газов	6	500	35000	4450	12300	удаление дымовых газов со снижением концентрации вредных веществ
дутьевой вентилятор	6	500	34656	4762	11240	подача воздуха в котлоагрегат

За годы активного внедрения частотно-регулируемого электропривода (ЧРП) (начало 2000-х гг.) последний зарекомендовал себя наилучшим образом не только как средство для изменения частоты вращения роторов асинхронных электродвигателей, но и как средство энергосбережения. Особенно эффективно применение на электродвигателях вращающих насосные агрегаты коммунальных и энергетических объектов [3]. Главной особенностью насосных агрегатов таких объектов является работа с переменной производительностью, которая зависит от времени суток, сезона года и так далее. Хорошим примером может послужить теплоэлектроцентраль (ТЭЦ) [4]. Эту особенность можно использовать для повышения энергоэффективности системы собственных нужд ТЭЦ ВАЗа, это хорошо показано в [5] и [6]. Особенно эффективно применение ЧРП на высоковольтных асинхронных электродвигателях, задействованных в основном технологическом процессе ТЭЦ работающих с насосными агрегатами, имеющими переменную производительность (сетевые насосы, циркуляционные насосы, дымососы).

Известно, что синхронную частоту вращения электродвигателей можно определить формулой (1):

$$n = \frac{60 \cdot f}{p} \quad (1)$$

где,  $n$  – синхронная частота вращения электродвигателей, об/мин;

$f$  – частота напряжения в сети, Гц;

$p$  – число пар полюсов электродвигателя.

Мощность электродвигателя можно выразить следующим выражением (2):

$$P_{эд} = \frac{M \cdot n}{9549}, \quad (2)$$

где  $P_{эд}$  – мощность электродвигателя, кВт;

$M$  – механический момент, развиваемый ротором электродвигателя, Н·м.

Подставим выражение (1) в (2) и получим выражение (3):

$$P_{эд} = \frac{M \cdot 60 \cdot f}{9549 \cdot p} \quad (3)$$

Подставив выражение (1) в (2) можно заметить, что мощность электродвигателя пропорциональна частоте сети.

Мощность электродвигателя, необходимая для приведения во вращение центробежного насоса определяется следующим выражением (4):

$$P_n = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H}{\eta}, \quad (4)$$

где  $P_n$  – мощность электродвигателя необходимая для приведения во вращение центробежного насоса, кВт;

$\gamma$  – плотность перекачиваемой среды, кг·м<sup>3</sup>;

$Q$  – производительность насоса, м<sup>3</sup>/ч;

$H$  – напор, создаваемый насосом, м;

$\eta$  – КПД насоса, %.

Из выражения (4) заметно, что мощность электродвигателя необходимая для приведения центробежного насоса во вращение пропорциональна производительности насоса.

Приравняем выражение (3) к (4):

$$\frac{\gamma \cdot Q \cdot H}{\eta} = \frac{M \cdot 60 \cdot f}{9549 \cdot p}$$

Из последнего выразим производительность насоса формулой (5):

$$Q = \frac{M \cdot 60 \cdot f \cdot \eta}{9549 \cdot p \cdot \gamma \cdot H} \quad (5)$$

Из последнего выражения заметно, при регулировании частоты питающего напряжения пропорционально изменению производительности, т.е. при применении частотного регулирования на асинхронных электродвигателях насосов появляется возможность управлять производительностью насосных установок без применения дроссельных задвижек. В свою очередь, из (3) можно видеть, что потребляемая асинхронным электродвигателем мощность изменяется прямо пропорционально изменению частоты. Это положительно влияет на энергоэффективность системы собственных нужд ТЭЦ ВАЗа. Процент электроэнергии, расходуемой на собственные нужды, понижается при снижении производительности насосных агрегатов ТЭЦ ВАЗа. При этом выгоднее всего использовать частотное регулирование на мощных высоковольтных асинхронных электродвигателях, так как на них приходится около 60 % электроэнергии, выделяемой на собственные нужды [7].

Частотное регулирование эффективно не только в отношении снижения энергозатрат на СН ТЭЦ, но также и в отношении улучшения гидравлических характеристик тепловой сети отходящей от тепловых коллекторов ТЭЦ ВАЗа.

Эффективность применения ЧРП вместо дроссельных задвижек на насосном оборудовании можно пояснить при помощи двух характеристик насосных агрегатов: с дросселированием и при частотном регулировании

вращения ротора асинхронного электродвигателя [8]. На рисунке 2 показана характеристика насоса при дросселировании.

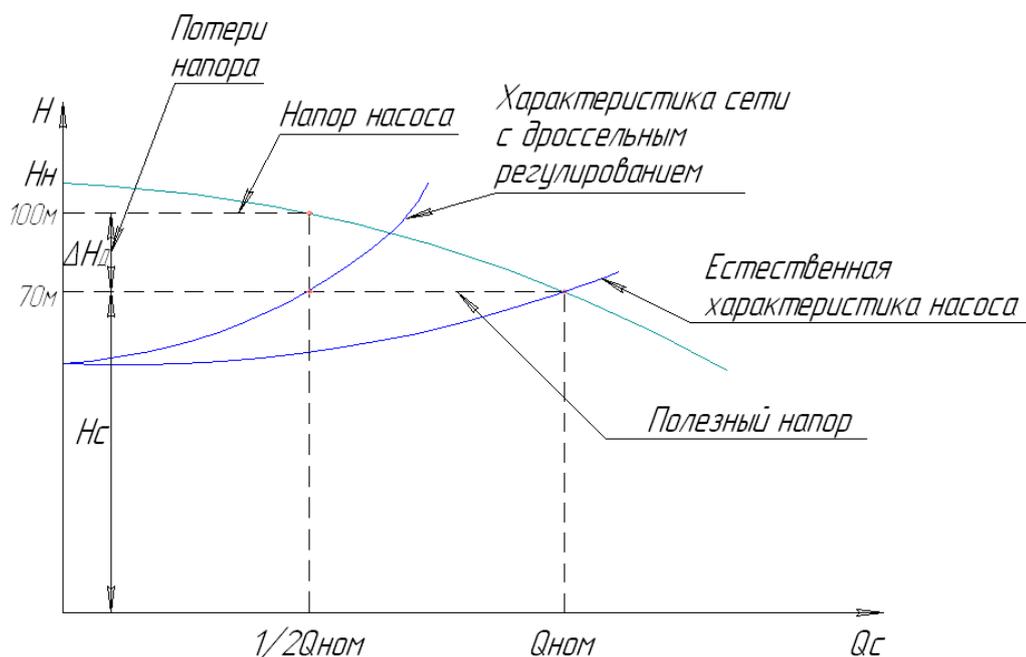


Рисунок 2 – Характеристика насосного агрегата с дросселированием

Дроссельные задвижки способны создавать дополнительное гидравлическое сопротивление и обеспечивать стабильное давление в трубопроводе тепловой сети, присоединенной к тепловым коллекторам ТЭЦ. При использовании дроссельных задвижек происходит распределение напора на элементах системы, т.е. тепловой сети. Это распределение напора показано на рисунке 2, где  $\Delta H_d$  – падение напора на дроссельной задвижке.

Для поддержания заданного давления в трубопроводе тепловой сети при изменении расхода теплоносителя необходимо изменять гидравлическое сопротивление дроссельной задвижки. При этом общая гидравлическая характеристика имеет более крутой вид. Величина  $\Delta H_d$  с таким регулированием неуклонно увеличивается. Таким образом, чем глубже производится дросселирование задвижкой, тем больше энергетических потерь имеет весь технологический процесс перекачки теплоносителя из основных бойлеров паровых турбин в тепловую сеть.

На величину потерь при дроссельном регулировании влияет не только задвижка. Чаще всего на этапе проектирования выбирается насосный агрегат с определённым запасом напора. В период времени, когда ТЭЦ ВАЗа вводилась в эксплуатацию, выбор всех технических устройств осуществлялся с весьма большим коэффициентом запаса. Может оказаться, что установленное насосное оборудование агрегатов имеет сильно завышенные напорные характеристики и производительность. Этот весьма вероятный недостаток может усугубляться тем, что диапазон изменения входных давлений (перед всасывающим патрубком насосного агрегата) связан с величиной давления за насосным агрегатом. В совокупности перечисленные факты приводят к тому, что потери энергии в ходе технологического процесса на ТЭЦ становятся достаточно большими, достигающими 45 и более процентов от номинальной мощности насосного агрегата.

Для решения задачи минимизации потерь, связанных с регулированием давления в сети, необходимо исключить дополнительные гидравлические сопротивления на участке от насосного агрегата до трубопровода тепловой сети, т.е. необходимо полностью открыть всю запорно-регулирующую арматуру. Это возможно, если процесс регулирования давления в тепловой сети передать насосному агрегату. Теория работы нагнетателей (насосов и вентиляторов) доказывает, что изменение частоты вращения привода нагнетателя изменяет его напорные характеристики. Кроме того, напор, создаваемый нагнетателем, пропорционален квадрату частоты вращения агрегата. Изменение напорных характеристик насосного агрегата при изменении частоты вращения иллюстрирует рисунок 3, на котором кривая 1 соответствует номинальной (при номинальной частоте вращения привода) напорной характеристике, а кривые 2-4 – напорным характеристикам при пониженной частоте вращения.

На рисунке 3 показана характеристика насоса при частотном регулировании вращения ротора асинхронного электродвигателя.

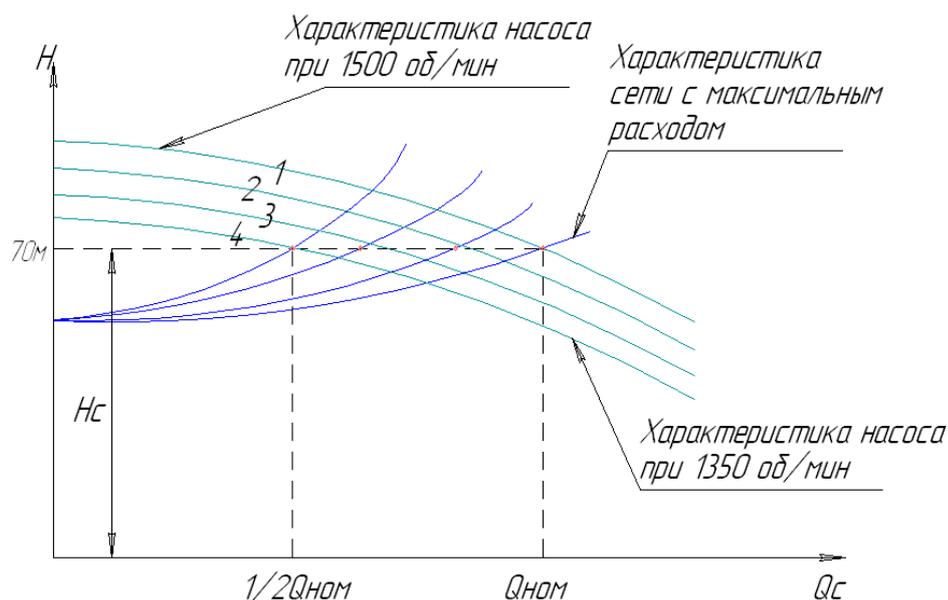


Рисунок 3 – Характеристика насоса при частотном регулировании вращения ротора электродвигателя

Способ регулирования давления в сети путем изменения частоты вращения привода насосного агрегата снижает энергопотребление ещё и по другой причине. Собственно насос как устройство преобразования энергии имеет свой коэффициент полезного действия – отношение механической энергии, приложенной к валу, к гидравлической энергии, получаемой в напорном трубопроводе насосного агрегата. Характер изменения коэффициента полезного действия насоса  $\eta_n$  в зависимости от расхода теплоносителя  $Q$  при различных частотах вращения представлен на рисунке 4.

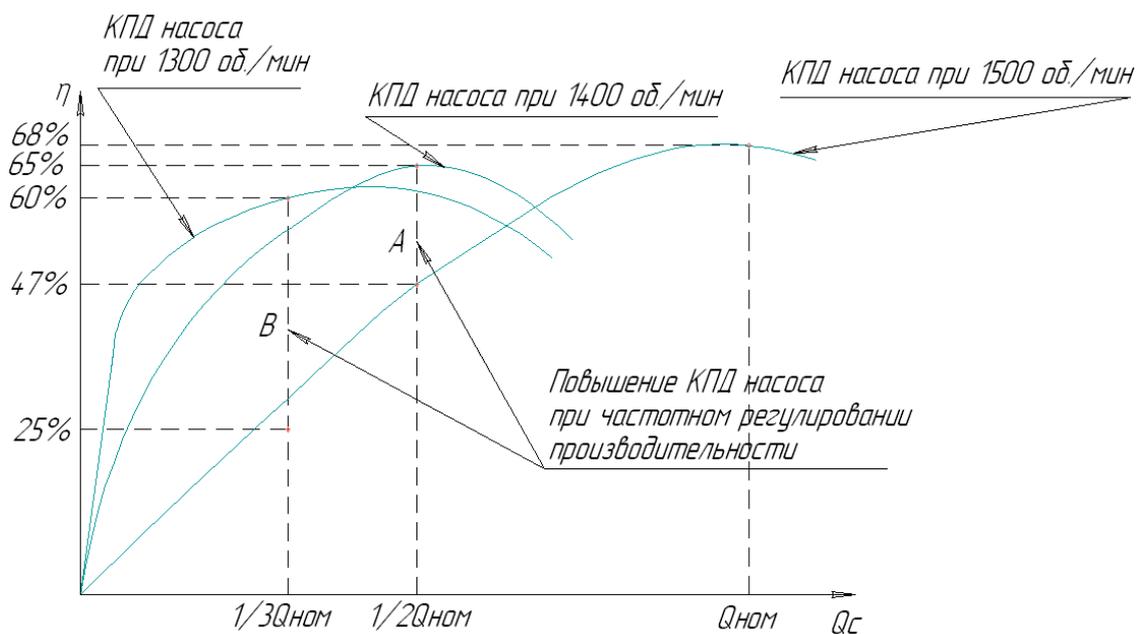


Рисунок 4 – КПД насосного агрегата при частотном регулировании

В соответствии с теорией подобия максимум коэффициента полезного действия с уменьшением частоты вращения несколько снижается и смещается влево [9]. Анализ требуемого изменения частоты насосного агрегата при изменении расхода в сети показывает, что с уменьшением расхода требуется снижение частоты вращения. Если рассмотреть работу агрегата для расхода меньше номинального (вертикальные линии А и В), то для этих режимов рационально работать на пониженной частоте вращения. В этом случае КПД насоса выше, чем при работе на номинальной частоте вращения. Таким образом, снижение частоты вращения в соответствии с тепловой нагрузкой позволяет не только экономить потребляемую энергию на исключении гидравлических потерь, но и получить экономический эффект за счет повышения коэффициента полезного действия самого насосного агрегата – преобразования механической энергии в гидравлическую.

Таким образом, применение частотного регулирования высоковольтных приводов крупных насосов позволяет не только снизить расход электроэнергии ТЭЦ ВАЗа на собственные нужды, но и повысить

КПД тепловой сети, отходящей от тепловых коллекторов ТЭЦ ВАЗа, а также снизить эксплуатационные затраты путем отказа от дроссельных задвижек. Все эти мероприятия позволяют повысить энергоэффективность ТЭЦ ВАЗа.

## 1.2 Анализ современных решений в области ЧРП

Как сказано выше, для наилучшего повышения энергоэффективности системы СН ТЭЦ ВАЗа необходимо оснастить высоковольтные асинхронные электродвигатели крупных насосов преобразователями частоты (ПЧ). Соответственно, необходимо осуществить анализ современных решений в области высоковольтного частотного электропривода.

В основе современных ПЧ для асинхронных электродвигателей лежат *IGBT*-транзисторы. Тиристорные ПЧ не рассматриваются, так как имеют сложные схемы, низкий *cosφ* и генерируют высшие гармоники, которые негативно сказываются на работе электродвигателей. ПЧ на основе *IGBT* - транзисторов лишены этих недостатков. ПЧ на основе *IGBT* -транзисторов имеют *cosφ* в районе 0,97 и КПД около 90 % [10]. Соответственно влияние на качество электроэнергии в системе электроснабжения минимально, в отличие от тиристорных ПЧ.

По принципу управления практически все высоковольтные ПЧ имеют скалярное управление, так как подавляющее большинство высоковольтных асинхронных электродвигателей используются в качестве электроприводов крупного насосного и вентиляторного оборудования, и соответственно высокой точности регулирования скорости вращения не требуется.

В настоящее время существует два вида высоковольтных частотных преобразователей для асинхронных электродвигателей, реализованных на *IGBT* -транзисторах:

- 1) Частотный преобразователь, построенный по двухтрансформаторной схеме;

- 2) Частотный преобразователь, построенный по однотономформаторной схеме;

Рассмотрим каждый из этих высоковольтных ПЧ отдельно.

Двухтрансформаторная схема, как видно из названия, строится на двойной трансформации напряжения с помощью понижающего и повышающего трансформаторов. Трёхфазное синусоидальное напряжение питающей сети 6 кВ подается на понижающий силовой трансформатор, который преобразует его в трёхфазное напряжение значением 380 В. Данное напряжение подается на низковольтный ПЧ. Затем трёхфазное напряжение переменной частоты с выхода ПЧ поступает на повышающий трансформатор для повышения напряжения до 6 кВ. Двойная трансформация позволяет использовать для регулирования частоты относительно недорогой низковольтный ПЧ. Однако, при более внимательном подходе к рассмотрению требуемого для нормальной работы данной схемы оборудования и общих ограничений такой схемы, стоимость такого ПЧ значительно возрастает. Во-первых, в выходном напряжении низковольтного преобразователя частоты присутствуют перенапряжения, амплитуда которых может достигать до 1 – 1,5 кВ, а частота следования может достигать до 5 – 20 кГц. Чтобы защитить от пробоя изоляцию первичной обмотки повышающего трансформатора, на выходе ПЧ устанавливается трёхфазный синусоидальный фильтр, имеющий сложное устройство. ПЧ, выполненные по этой схеме, имеют ограниченный диапазон регулирования частоты вращения ротора высоковольтного асинхронного электродвигателя как сверху, так и снизу от номинальной частоты. Диапазон регулирования ограничен в пределах  $n_{ном} > n > 0,5n_{ном}$ . Это вызвано тем, что при снижении частоты на выходе ПЧ увеличивается насыщение сердечника, что приводит к его нагреву и нарушению расчетного режима работы выходного трансформатора. Таким образом, при снижении частоты, заметно снижается и КПД данного высоковольтного ПЧ.

Однотрансформаторная схема высоковольтного ПЧ значительно проще. Такой ПЧ состоит из одного сухого трансформатора и блока ячеек *IGBT*-транзисторов. Трансформатор имеет первичную трехфазную обмотку 6 кВ и несколько трехфазных вторичных обмоток напряжением 1, 1,6, 3 или 5 кВ. Напряжение вторичных обмоток зависит от того, какое поколение *IGBT*-транзисторов применяется. В настоящее время в высоковольтных ПЧ используются *IGBT*-транзисторы третьего и четвертого поколения (напряжения ячеек соответственно 3 и 5 кВ). К каждой вторичной обмотке подключены ячейки *IGBT*-транзисторов. Ячейки *IGBT*-транзисторов соединены последовательно, соответственно на выходных зажимах высоковольтного ПЧ напряжения всех ячеек суммируются. К последовательно соединенным ячейкам через выходной фильтр подключается высоковольтный асинхронный электродвигатель

У таких высоковольтных ПЧ больше преимуществ, чем у предыдущих, так как они занимают меньше места по причине использования только одного трансформатора. Заметным преимуществом является значительно больший диапазон получаемых на выходе частот и меньшие потери в таком ПЧ по сравнению с ПЧ, построенным по двухтрансформаторной схеме. К существенным недостаткам однотрансформаторных ПЧ можно отнести высокую стоимость *IGBT*-транзисторов, особенно большой мощности. Тем не менее, однотрансформаторные ПЧ все чаще вытесняют двухтрансформаторные ПЧ.

В настоящее время ведется разработка и испытания *IGBT*-транзисторов с напряжением 6 и 10 кВ для высоковольтных ПЧ асинхронных электродвигателей. Это позволит отказаться от трансформаторов в схемах высоковольтных ПЧ [11].

### 1.3 Выводы к разделу 1

Применение высоковольтных частотных преобразователей для высоковольтных электродвигателей крупных насосов позволяет:

- снизить расход электроэнергии ТЭЦ ВАЗа на собственные нужды;
- повысить КПД тепловой сети;
- снизить эксплуатационные затраты путем отказа от дроссельных задвижек.

Все вышеперечисленные мероприятия позволяют повысить энергоэффективность системы собственных нужд ТЭЦ ВАЗа и тепловой сети отходящей от тепловых коллекторов ТЭЦ ВАЗа. Из сказанного можно вынести следующую гипотезу: при внедрении ЧРП для совместной работы с крупными насосами из числа механизмов СН ТЭЦ ВАЗа потребление электроэнергии этими механизмами СН снизится с 9 % до 6 %.

В результате анализа существующих схем высоковольтных преобразователей частоты сделан выбор в пользу ПЧ, построенного по однотрансформаторной схеме в силу следующих причин:

- ПЧ, построенный по однотрансформаторной схеме занимает значительно меньше пространства по сравнению с ПЧ построенными по двухтрансформаторной схеме;
- потери в ПЧ, построенных по однотрансформаторной схеме значительно меньше, чем в ПЧ, построенных по двухтрансформаторной схеме.

Основываясь на результатах проведенного анализа технических решений в области частотно-регулируемого привода высоковольтных асинхронных электродвигателей, для достижения поставленной цели в рамках диссертационной работы планируется решение следующих задач:

- 1) выполнить проверку соответствия номинальной производительности насосного оборудования системы СН ТЭЦ

ВАЗа фактической производительности, что в свою очередь также способствует энергоэффективности;

- 2) выполнить расчет параметров узлов высоковольтных преобразователей частоты для работы с высоковольтными асинхронными электродвигателями крупных насосных агрегатов и выполнить построение механических характеристик высоковольтных асинхронных электродвигателей с частотным регулированием;
- 3) выполнить оценку технико-экономической эффективности от внедрения частотно-регулируемого электропривода для работы с высоковольтными асинхронными электродвигателями крупных насосных агрегатов. Эта оценка позволит проверить насколько эффективно с экономической точки зрения внедрение частотно-регулируемого электропривода.

## 2 Проверка соответствия номинальной производительности крупного насосного оборудования системы СН ТЭЦ ВАЗа фактической производительности

Перед тем как начать расчет преобразователей частоты для высоковольтных электродвигателей, необходимо выполнить проверку соответствия номинальной производительности насосного оборудования системы СН ТЭЦ ВАЗа фактической производительности насосного оборудования ТЭЦ ВАЗа. Эта проверка необходима по причине того, что во времена проектирования ТЭЦ ВАЗа при выборе оборудования закладывался большой запас по мощности и производительности [12]. В связи с этим необходимо выполнить расчет мощностей электродвигателей насосного оборудования и при необходимости выполнить выбор электродвигателей по полученным значениям.

Для выполнения расчета необходимо воспользоваться значениями пиковой и минимальной производительности и напора (давления) из таблицы 1, а также формулой (6) [13]. По этой формуле определим значение необходимой мощности электродвигателя сетевого насоса для привода насосного агрегата в пиковом режиме:

$$P_{эд} = k_3 \cdot \frac{\gamma \cdot Q \cdot H}{1000 \cdot \eta_{п} \cdot \eta_{р}} \quad (6)$$

где,  $P_{эд}$  – мощность электродвигателя, кВт;

$\gamma$  – удельный вес горячей воды,  $\text{Н} \cdot \text{м}^3$ ;

$Q$  – производительность насоса,  $\text{м}^3/\text{ч}$ ;

$H$  – напор насоса, м;

$\eta_{п}$  – КПД передачи;

$\eta_{р}$  – КПД центробежных насосов;

$k_3$  – коэффициент запаса.

Рассчитаем мощность электродвигателя сетевого насоса при максимальной производительности по (6):

$$P_{эд} = 1,1 \cdot \frac{9810 \cdot 1092 \cdot 53}{1000 \cdot 1 \cdot 0,66} \cdot 10^{-3} = 946 \text{ кВт}$$

Теперь определим необходимую мощность электродвигателя сетевого насоса для привода насосного агрегата в минимальном режиме по (6):

$$P_{эд} = 1,1 \cdot \frac{9810 \cdot 334 \cdot 53}{1000 \cdot 1 \cdot 0,66} \cdot 10^{-3} = 263 \text{ кВт}$$

Полученная расчетная мощность насоса в режиме номинальной загрузки соответствует номинальным параметрам электродвигателя 4АЗМ-1000/6000 УХЛ4, приведенным в таблице 2.

Расчет мощности электродвигателей остальных насосов проведем аналогично. Полученные результаты также соответствуют номинальным параметрам электродвигателей, приведенным в таблице 2.1.

Расчет мощности электродвигателей остальных насосов проводится аналогично. Результаты сведены в таблице 2.

Таблица 2 – Характеристики выбранных электродвигателей для крупных насосов ТЭЦ ВАЗа

Наименование механизма	Тип электродвигателя	Расчетные параметры		Каталожные параметры					
		Р <sub>пик</sub> , кВт	Р <sub>мин</sub> , кВт	U, В	Р <sub>ном</sub> , кВт	η, %	cosφ	I <sub>ст</sub> , А	n, об/мин
питательный электронасос	4АЗМ-3150/6000 УХЛ4	2796	1321	6	3150	97	0,9	346	3000
циркуляционный насос	ЭДВА 1/173-6-16	878	542	6	1000	93	0,76	133	375
сетевой насос	4АЗМ-1000/6000 УХЛ4	946	263	6	1000	94	0,86	112,5	3000
сетевой городской насос	4АЗМ-500/6000 УХЛ4	444	110	6	500	95	0,89	56,5	3000
подпорно-сетевой насос	4АЗМ-400/6000 УХЛ4	351	196	6	400	95	0,87	45,4	3000

Продолжение таблицы 2

дымосос	ДА3О4-400ХК-4 У1	389	171	6	315	93	0,86	38	1500
дымосос регенерации газов	ДА3О4-400ХК-4 У1	389	171	6	315	93	0,86	38	1500
дутьевой вентилятор	ДА3О4-400ХК-4 У1	382	154	6	315	93	0,86	38	1500

На рисунке 5 показан общий вид высоковольтного асинхронного электродвигателя типа ДА3О4-400ХК-4 У1.

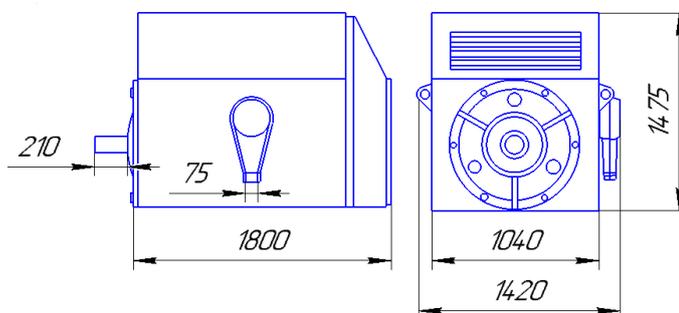


Рисунок 5 – Общий вид асинхронного электродвигателя типа ДА3О4-400ХК-4 У1

## 2.1 Выводы к разделу 2

В этом разделе выполнена проверка соответствия номинальной производительности насосного оборудования системы СН ТЭЦ ВАЗа фактической установленной мощности ТЭЦ ВАЗа. В результате этой проверки выявлено, что фактические значения производительности насосных агрегатов приведенных в таблице 1 значительно ниже, чем номинальные значения. Исходя из этого, выполнен выбор высоковольтных асинхронных электродвигателей для рассматриваемых насосных агрегатов ТЭЦ ВАЗа с меньшими значениями мощности, это мероприятие позволит также снизить расход электроэнергии на собственные нужды ТЭЦ ВАЗа.

### **3 Расчет параметров частотных преобразователей для высоковольтных асинхронных электродвигателей крупных насосных агрегатов ТЭЦ ВАЗа**

В данном пункте выберем методику расчета частотных преобразователей для высоковольтных электродвигателей системы СН ТЭЦ ВАЗа и проведем расчет параметров частотных преобразователей для высоковольтных асинхронных электродвигателей крупных насосных агрегатов по этой методике.

#### **3.1 Расчет параметров высоковольтного асинхронного электродвигателя сетевого насоса**

Выполним расчет параметров электродвигателя сетевого насоса по методике, представленной в учебно-методическом пособии [14], [15].

Исходные данные предоставлены в таблице 3

Таблица 3 – Исходные данные для расчета параметров частотного преобразователя для электродвигателя сетевого насоса

Параметр	Значение
Номинальная частота вращения, об/мин	3000
Число пар полюсов	1
Номинальная мощность, кВт	1000
КПД, %	94
$\cos \varphi$ , о.е.	0,86
Номинальное фазное напряжение, кВ	3,6
Число фаз в обмотке статора	3
Динамический момент инерции ротора, кг·м <sup>2</sup>	23

Продолжение таблицы 3

Кратность критического момента	3,3	
Номинальное скольжение, %	2,3	
Параметры Г-образной схемы замещения, о.е.	$x'_\mu$	5,7
	$x_1$	0,099
	$r_1$	0,012
	$x'_2$	0,11
	$r_2$	0,027

В соответствии с выбранной методикой определим параметры электродвигателя сетевого насоса.

Находим номинальный фазный ток статора электродвигателя по выражению (7):

$$I_{\text{фн}} = \frac{P_{\text{н}}}{m_1 \cdot U_{\text{фн}} \cdot \cos\varphi \cdot \eta}, \quad (7)$$

где  $I_{\text{фн}}$  – фазный ток статора, А;

$m_1$  – число фаз обмотки статора;

$P_{\text{н}}$  – номинальная мощность электродвигателя, кВт;

$U_{\text{фн}}$  – фазное напряжение статора, В;

$\cos\varphi$  – коэффициент мощности.

Рассчитываем номинальный фазный ток статора электродвигателя по (7):

$$I_{\text{фн}} = \frac{1000}{3 \cdot 3,6 \cdot 0,86 \cdot 0,94} = 114,5 \text{ А}$$

Определим индуктивное сопротивление обмотки статора электродвигателя в о.е. по выражению (8):

$$x_1 = \frac{2x'_1 \cdot x'_\mu}{x'_\mu + \sqrt{x'^2_\mu + 2x'_1 \cdot x'_\mu}}, \quad (8)$$

где  $x_1$  – индуктивное сопротивление обмотки статора электродвигателя, о.е.;

$x'_1$  – первичное индуктивное сопротивление, Ом

$x'_\mu$  – магнитное сопротивление цепи, Ом.

Определяем индуктивное сопротивление обмотки статора электродвигателя в о.е. по (8):

$$x_1 = \frac{2 \cdot 0,099 \cdot 5,7}{5,7 + \sqrt{5,7^2 + 2 \cdot 0,099 \cdot 5,7}} = 0,098 \text{ о.е.}$$

Определим активное сопротивление обмотки статора в о.е. по выражению (9):

$$r_1 = r'_1 \cdot \frac{x_1}{x'_1}, \quad (9)$$

где  $r_1$  – активное сопротивление обмотки статора, о.е.;

$r'_1$  – первичное активное сопротивление электродвигателя, Ом;

Определяем активное сопротивление обмотки статора в о.е. по (9):

$$r_1 = 0,012 \cdot \frac{0,098}{0,099} = 0,011 \text{ о.е.}$$

Определим коэффициент перевода относительных единиц (о.е.) в физические величины по выражению (10):

$$C = \frac{U_{\text{фн}}}{I_{\text{фн}}}, \quad (3.4)$$

где  $C$  – коэффициент перевода о.е. в физические величины, В/А.

Определяем коэффициент перевода о.е. в физические величины по (10):

$$C = \frac{3600}{114,5} = 31,44 \text{ В/А.}$$

Определим активное сопротивление обмотки статора по выражению (11):

$$R_s = r_1 \cdot c, \quad (11)$$

где  $R_s$  – активное сопротивление обмотки статора, Ом.

Определяем активное сопротивление обмотки статора по (11):

$$R_s = 0,011 \cdot 31,44 = 0,34 \text{ Ом.}$$

Определим взаимную индуктивность фаз статора по выражению (12):

$$L_m = \frac{x'_\mu \cdot c}{2 \cdot \pi \cdot f}, \quad (12)$$

где  $L_m$  – взаимная индуктивность фаз статора, Гн;

$f$  – частота сети переменного тока, Гц.

Рассчитываем взаимную индуктивность фаз статора по (12):

$$L_m = \frac{5,7 \cdot 31,44}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,57 \text{ Гн}$$

Теперь определим полную индуктивность фазы статора по выражению (13):

$$L_s = \frac{(x'_\mu + x_1) \cdot c}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad (13)$$

где  $L_s$  – полная индуктивность фазы статора, Гн.

Определяем полную индуктивность фазы статора по (13):

$$L_s = \frac{(5,7 + 0,098) \cdot 31,44}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,58 \text{ Гн.}$$

Определим параметр уточненной схемы замещения по выражения (14):

$$c_1 = \frac{x_1'}{x_1} \quad (14)$$

где  $c_1$  – параметр уточненной схемы замещения.

Рассчитываем параметр уточненной схемы замещения по (14):

$$c_1 = \frac{0,099}{0,098} = 1,01.$$

Определим активное сопротивление обмотки ротора по выражению (15):

$$R_r = \frac{r_2'' \cdot c}{c_1^2} \quad (15)$$

где  $R_r$  – активное сопротивление обмотки ротора, Ом.

$r_2''$  – активное сопротивление вторичной цепи схемы замещения, Ом.

Определяем активное сопротивление обмотки ротора по (15):

$$R_r = \frac{0,027 \cdot 31,44}{1,01^2} = 0,83 \text{ Ом.}$$

Определим полную индуктивность фаз ротора по выражению (16):

$$L_r = \frac{(x_\mu + \frac{x_2''}{c_1}) \cdot c}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad (16)$$

где  $L_r$  – полная индуктивность фаз ротора, Гн.

Рассчитываем полную индуктивность фаз ротора по (16):

$$L_r = \frac{(5,7 + \frac{0,11}{1,01^2}) \cdot 31,44}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,58 \text{ Гн.}$$

Определим коэффициент электромагнитной связи статора по выражению (17):

$$k_s = \frac{L_m}{L_s} \quad (18)$$

где  $k_s$  – коэффициент электромагнитной связи статора.

Определяем коэффициент электромагнитной связи статора по (18):

$$k_s = \frac{0,57}{0,58} = 0,98$$

Теперь определяем коэффициент электромагнитной связи ротора по выражению (19):

$$k_r = \frac{L_m}{L_r} \quad (19)$$

где  $k_r$  – коэффициент электромагнитной связи ротора.

Рассчитываем коэффициент электромагнитной связи ротора по (19):

$$k_r = \frac{0,57}{0,58} = 0,98$$

Определим коэффициент рассеяния обмоток по выражению (20):

$$\sigma = (1 - k_s \cdot k_r) \quad (20)$$

где  $\sigma$  – коэффициент рассеяния обмоток.

Рассчитываем коэффициент рассеяния обмоток по (20):

$$\sigma = (1 - 0,98 \cdot 0,98) = 0,04.$$

Определим переходную индуктивность статора по выражению (21):

$$L'_S = L_S \cdot \sigma \quad (21)$$

где  $L'_S$  – переходная индуктивность статора Гн.

Определяем переходную индуктивность статора по (21):

$$L'_S = 0,58 \cdot 0,04 = 0,023 \text{ Гн.}$$

Определим переходное активное сопротивление статора по выражению (22):

$$R'_S = R_S + k_r^2 \cdot R_r \quad (22)$$

где  $R'_S$  – переходное активное сопротивление статора, Ом.

Рассчитываем переходное активное сопротивление статора по (22):

$$R'_S = 0,64 + 0,98^2 \cdot 1,55 = 2,48 \text{ Ом.}$$

Определим индуктивное сопротивление рассеяния статора по выражению (23):

$$x_{s\sigma} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot (L_S - L_m) \quad (23)$$

где  $x_{s\sigma}$  – индуктивное сопротивление рассеяния статора, Гн.

Определяем индуктивное сопротивление рассеяния статора по (23):

$$x_{s\sigma} = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot (0,58 - 0,57) = 3,14 \text{ Ом.}$$

Определим индуктивное сопротивление намагничивающего контура по выражению (24):

$$x_\mu = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_m \quad (24)$$

где  $x_\mu$  – индуктивное сопротивление намагничивающего контура, Ом.

Определяем индуктивное сопротивление намагничивающего контура по (24):

$$x_{\mu}=2\cdot 3,14\cdot 50\cdot 0,57=178 \text{ Ом.}$$

Рассчитаем индуктивное сопротивление ротора, приведенное к статору по выражению (24):

$$x'_{r\sigma}=2\cdot \pi\cdot f\cdot (L_r-L_m) \quad (24)$$

где  $x'_{r\sigma}$  – индуктивное сопротивление ротора, приведенное к статору, Ом.

Определяем индуктивное сопротивление ротора, приведенное к статору по (24):

$$x'_{r\sigma}=2\cdot 3,14\cdot 50\cdot (0,58-0,57)=3,14 \text{ Ом.}$$

Рассчитаем постоянную времени ротора по выражению (25):

$$T_r=\frac{L_r}{R_r} \quad (25)$$

где  $T_r$  – постоянная времени ротора, с.

Рассчитываем постоянную времени ротора по (25):

$$T_r=\frac{0,58}{1,55}=0,37 \text{ с.}$$

Теперь рассчитаем постоянную времени статора по выражению (26):

$$T_s=\frac{L_s}{R_s} \quad (26)$$

где  $T_s$  – постоянная времени статора, с.

Рассчитываем постоянную времени статора по (26):

$$T_s = \frac{0,58}{0,64} = 0,90 \text{ с.}$$

Определим индуктивное сопротивление рассеяния цепи короткого замыкания по выражению (27):

$$x_k = x_{s\sigma} + x'_{r\sigma} \quad (27)$$

где  $x_k$  – индуктивное сопротивление рассеяния цепи короткого замыкания, Ом.

Теперь определяем индуктивное сопротивление рассеяния цепи короткого замыкания по (27):

$$x_k = 3,14 + 3,14 = 6,28 \text{ Ом.}$$

Проведем расчет параметров асинхронного электродвигателя дутьевого вентилятора. Исходные данные приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Исходные данные для расчета параметров частотного преобразователя электродвигателя дутьевого вентилятора

Параметр	Значение
Номинальная частота вращения, об/мин	1500
Число пар полюсов	2
Номинальная мощность, кВт	315
КПД, %	93
$\cos\varphi$	0,86
Номинальное фазное напряжение, кВ	3,6
Число фаз в обмотке статора	3
Динамический момент инерции ротора кг·м <sup>2</sup>	18

Продолжение таблицы 4

Кратность критического момента	3,1	
Номинальное скольжение, %	2,1	
Параметры Г-образной схемы замещения	$x_{\mu}$	2,3
	$x_1$	0,089
	$r_1$	0,010
	$x_2$	0,10
	$r_2$	0,024

Рассчитываем номинальный фазный ток статора электродвигателя по (7):

$$I_{\text{фн}} = \frac{315}{3 \cdot 3,6 \cdot 0,86 \cdot 0,93} = 36,5 \text{ А.}$$

Определяем индуктивное сопротивление обмотки статора электродвигателя в о.е. по (8):

$$x_1 = \frac{2 \cdot 0,089 \cdot 2,3}{2,3 + \sqrt{2,3^2 + 2 \cdot 0,089 \cdot 2,3}} = 0,40 \text{ о.е.}$$

Определяем активное сопротивление обмотки статора в о.е. по (9):

$$r_1 = 0,010 \cdot \frac{0,088}{0,089} = 0,009 \text{ о.е.}$$

Определяем коэффициент перевода о.е. в физические величины по (10):

$$c = \frac{3600}{36,5} = 98,63 \text{ В/А.}$$

Определяем активное сопротивление обмотки статора по (11):

$$R_s = 0,009 \cdot 98,63 = 0,88 \text{ Ом.}$$

Рассчитываем взаимную индуктивность фаз статора по (12):

$$L_m = \frac{2,3 \cdot 98,63}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,72 \text{ Гн.}$$

Определяем полную индуктивность фазы статора по (13):

$$L_s = \frac{(2,3 + 0,089) \cdot 98,63}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,75 \text{ Гн.}$$

Рассчитываем параметр уточненной схемы замещения по (14):

$$c_1 = \frac{0,089}{0,040} = 2,22.$$

Определяем активное сопротивление обмотки ротора по (15):

$$R_r = \frac{0,024 \cdot 98,63}{2,22^2} = 0,48 \text{ Ом.}$$

Рассчитываем полную индуктивность фаз ротора по (16):

$$L_r = \frac{(2,3 + \frac{0,10}{2,22^2}) \cdot 98,63}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,75 \text{ Гн.}$$

Определяем коэффициент электромагнитной связи статора по (17):

$$k_s = \frac{0,72}{0,75} = 0,96.$$

Рассчитываем коэффициент электромагнитной связи ротора по (18):

$$k_r = \frac{0,72}{0,75} = 0,96.$$

Определим коэффициент рассеяния обмоток по выражению (19):

$$\sigma = (1 - 0,96 \cdot 0,96) = 0,038.$$

Определяем переходную индуктивность статора по (20):

$$L'_S = 0,75 \cdot 0,02 = 0,015 \text{ Гн.}$$

Рассчитываем переходное активное сопротивление статора по (21):

$$R'_S = 0,88 + 0,96^2 \cdot 0,48 = 1,32 \text{ Ом.}$$

Определяем индуктивное сопротивление рассеяния статора по (22):

$$x_{s\sigma} = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot (0,75 - 0,72) = 9,42 \text{ Ом.}$$

Определяем индуктивное сопротивление намагничивающего контура по (23):

$$x_\mu = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 0,75 = 235 \text{ Ом.}$$

Определяем индуктивное сопротивление ротора, приведенное к статору по (24):

$$x'_{r\sigma} = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot (0,75 - 0,72) = 9,42 \text{ Ом.}$$

Рассчитываем постоянную времени ротора по (25):

$$T_r = \frac{0,75}{0,48} = 1,56 \text{ с.}$$

Рассчитываем постоянную времени статора по (26):

$$T_s = \frac{0,75}{0,88} = 0,85 \text{ с.}$$

Определяем индуктивное сопротивление рассеяния цепи короткого замыкания по (27):

$$x_k = 9,42 + 9,42 = 18,84 \text{ Ом.}$$

Расчет параметров остальных асинхронных электродвигателей ведется аналогично.

В таблице 5 приведены расчетные параметры всех асинхронных электродвигателей СН ТЭЦ ВАЗа.

Таблица 5 – Расчетные параметры асинхронных электродвигателей СН ТЭЦ ВАЗа

Тип	P, кВт	R <sub>s</sub> , Ом	R <sub>r</sub> , Ом	L <sub>s</sub> , Гн	L <sub>r</sub> , Гн	x <sub>k</sub> , Ом	x <sub>μ</sub> , Ом
4АЗМ-3150/6000 УХЛ4	3150	0,17	0,30	0,19	0,19	2,41	60,71
ЭДВА 1/173-6-16	1000	0,37	0,73	0,47	0,47	5,39	147,34
4АЗМ-1000/6000 УХЛ4	1000	0,64	0,83	0,58	0,58	6,28	178
4АЗМ-500/6000 УХЛ4	500	0,55	0,97	0,49	0,48	8,6	149,36
4АЗМ-400/6000 УХЛ4	400	0,61	1,10	0,59	0,59	9,8	182,51
ДАЗО4-400ХК-4 У1	315	6,4	1,36	0,67	0,67	12,82	206,33
ДАЗО4-400ХК-4 У1	315	6,4	1,35	0,67	0,67	12,81	206,30
ДАЗО4-400ХК-4 У1	315	0,88	0,48	0,75	0,75	18,84	235

Далее выполним расчет и выбор ключей преобразователя частоты.

### 3.2 Расчет и выбор ключей преобразователя частоты

Как было сказано ранее, выбор сделан в пользу ПЧ построенного по однотрансформаторной схеме с применением *IGBT*- транзисторов третьего поколения.

На рисунке 6 показан *IGBT*-транзистор третьего поколения, рассчитанный на напряжение 3 кВ.

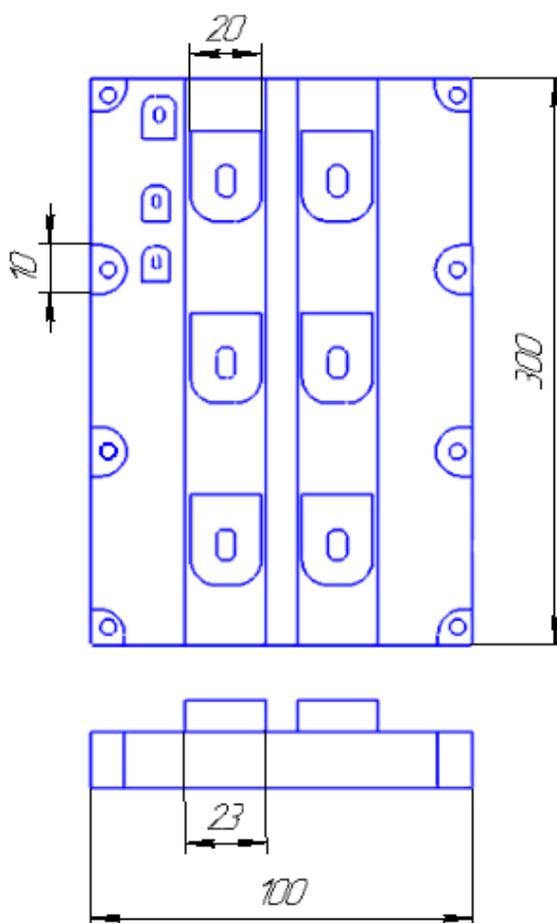


Рисунок 6 – *IGBT* -транзистор из блока ячеек

Далее необходимо выполнить расчет и выбор преобразователя частоты по методике из [3]

Определим максимальный ток через ключи инвертора по выражению (28):

$$I_{cmax} = \frac{P_H \cdot k_1 \cdot \sqrt{2} \cdot k_2}{\eta \cdot \cos\varphi \cdot \sqrt{3} \cdot U_n} \quad (28)$$

где  $I_{cmax}$  – максимальный ток через ключи инвертора, А;

$k_1$  – коэффициент допустимой кратковременной перегрузки;

$k_2$  – коэффициент допустимых кратковременных пульсаций.

Определяем максимальный ток через ключи инвертора по (28):

$$I_{cmax} = \frac{1000 \cdot 1,3 \cdot \sqrt{2} \cdot 1,2}{0,94 \cdot 0,87 \cdot \sqrt{3} \cdot 6,3} = 248,6 \text{ А.}$$

Повторяем данный расчет для выбора ключей инвертора преобразователя частоты.

Определяем максимальный ток через ключи инвертора по (28):

$$I_{cmax} = \frac{315 \cdot 1,3 \cdot \sqrt{2} \cdot 1,2}{0,93 \cdot 0,87 \cdot \sqrt{3} \cdot 6,3} = 79,2 \text{ А.}$$

Расчетные данные сведены в таблицу 3.4

Таблица 6 – Расчетные данные для выбора ключей инвертора частотных преобразователей асинхронных электродвигателей

Тип	$I_{cmax}$ , А
4АЗМ-3150/6000 УХЛ4	765,01
ЭДВА 1/173-6-16	300,35
4АЗМ-1000/6000 УХЛ4	248,60
4АЗМ-500/6000 УХЛ4	125,54
4АЗМ-400/6000 УХЛ4	102,74
ДАЗО4-400ХК-4 У1	83,60
ДАЗО4-400ХК-4 У1	83,60
ДАЗО4-400ХК-4 У1	79,20

Далее выполним расчет потерь в инверторе.

### 3.3 Расчет потерь в инверторе

Рассчитаем потери в *IGBT*-транзисторе в проводящем состоянии по выражению (29):

$$P_{ss} = I_{cp} \cdot U_{cc} \left( \frac{1}{8} \cdot \frac{D}{3\pi} \cdot \cos\varphi \right) \quad (29)$$

где  $P_{ss}$  – потери в *IGBT*- транзисторе, Вт;

$I_{cp}$  – максимальная амплитуда тока на входе инвертора, А;

$D$  – максимальная скважность;

$U_{cc}$  – падение напряжения на ключе при насыщении, В.

Определяем потери в *IGBT*-транзисторе в проводящем состоянии по (29):

$$P_{ss} = 248,6 \cdot 2,2 \cdot \left( \frac{1}{8} \cdot \frac{0,95}{3\pi} \cdot 0,87 \right) = 5,99 \text{ Вт.}$$

Определим потери в транзисторе при коммутации по выражению (30):

$$P_{sw} = \frac{1}{\pi \cdot \sqrt{2}} \cdot \frac{I_{cp} \cdot U_{cc} \cdot (t_{c(on)} + t_{c(off)}) \cdot f_{sw}}{2} \quad (30)$$

где  $P_{sw}$  – потери в транзисторе при коммутации, Вт;

$t_{c(on)}$  – продолжительность переходного процесса по цепи коллектора на открытие, с;

$t_{c(off)}$  – продолжительность переходного процесса по цепи коллектора на закрытие, с;

$U_{cc}$  – напряжение на коллекторе ключа, В;

$f_{sw}$  – частота коммутации, Гц.

Определяем потери в транзисторе при коммутации по (30):

$$P_{sw} = \frac{1}{3,14 \cdot \sqrt{2}} \cdot \frac{248,6 \cdot 2,2 \cdot (0,13 + 0,45) \cdot 50}{2} = 1779 \text{ Вт.}$$

Суммарные потери в транзисторе определим по выражению (31):

$$P_Q = P_{ss} + P_{sw} \quad (31)$$

где  $P_Q$  – суммарные потери в транзисторе, Вт.

Определяем суммарные потери в транзисторе по (31):

$$P_Q = 5,99 + 1779 = 1784 \text{ Вт.}$$

Далее определяем потери диода в проводящем состоянии по выражению (32):

$$P_{DS} = I_{cp} \cdot U_{ce} \cdot \left(\frac{1}{8} \cdot \frac{D}{3\pi} \cdot \cos\varphi\right) \quad (32)$$

где  $P_{DS}$  – потери диода в проводящем состоянии, Вт;

$U_{ce}$  – падение напряжения на диоде, В.

Рассчитываем потери диода в проводящем состоянии по (32):

$$P_{DS} = 248,6 \cdot 0,9 \cdot \left(\frac{1}{8} \cdot \frac{0,95}{3 \cdot 3,14} \cdot 0,87\right) = 2,45 \text{ Вт.}$$

Определим потери при восстановлении запирающих свойств по выражению (33):

$$P_{DR} = \frac{1}{8} \cdot (I_{rr} \cdot U_{cc} \cdot t_{rr} \cdot f_{sw}) \quad (33)$$

где  $P_{DR}$  – потери при восстановлении запирающих свойств, Вт;

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

$t_{rr}$  – длительность импульса обратного тока, с.

Определяем потери при восстановлении запирающих свойств по (33):

$$P_{DR} = \frac{1}{8} \cdot (50 \cdot 0,9 \cdot 0,6 \cdot 10^{-6} \cdot 50) = 0,00135 \text{ Вт.}$$

Определим суммарные потери диода по выражению (34):

$$P_D = P_{DS} + P_{DR} \quad (34)$$

где  $P_D$  – суммарные потери диода, Вт.

Определяем суммарные потери диода по выражению (34):

$$P_D = 2,45 + 0,00135 = 2,46 \text{ Вт.}$$

Наконец, определим суммарные потери в гибридном модуле по выражению (35):

$$P_T = P_Q + P_D \quad (35)$$

где  $P_T$  – суммарные потери в гибридном модуле, Вт.

Определяем суммарные потери в гибридном модуле по (35):

$$P_T = 1784 + 2,46 = 1786 \text{ Вт.}$$

Проводим данный расчет повторно для определения потерь в инверторе частотного преобразователя для асинхронного электродвигателя дутьевого вентилятора.

Определяем потери в *IGBT* -транзисторе в проводящем состоянии по (29):

$$P_{SS} = 79,2 \cdot 2,2 \cdot \left( \frac{1}{8} \cdot \frac{0,95}{3\pi} \cdot 0,87 \right) = 1,91 \text{ Вт.}$$

Определяем потери в транзисторе при коммутации по (30):

$$P_{sw} = \frac{1}{3,14 \cdot \sqrt{2}} \cdot \frac{79,2 \cdot 2,2 \cdot (0,13 + 0,45) \cdot 50}{2} = 567 \text{ Вт}$$

Определяем суммарные потери в транзисторе по (31):

$$P_Q=1,91+567=569 \text{ Вт.}$$

Рассчитываем потери диода в проводящем состоянии по (32):

$$P_{DS}=79,2 \cdot 0,9 \cdot \left(\frac{1}{8} \cdot \frac{0,95}{3 \cdot 3,14} \cdot 0,87\right)=0,78 \text{ Вт.}$$

Определяем потери при восстановлении запирающих свойств по (33):

$$P_{DR}=\frac{1}{8} \cdot (20 \cdot 0,9 \cdot 0,6 \cdot 10^{-6} \cdot 50)=0,00675 \text{ Вт.}$$

Определяем суммарные потери диода по выражению (34):

$$P_D=0,78+0,00675=0,79 \text{ Вт.}$$

Определяем суммарные потери в гибридном модуле по (35):

$$P_T=569+0,79=570 \text{ Вт.}$$

Полученные результаты сведены в таблице 7

Таблица 7 – Результаты расчета потерь в инверторах частотных преобразователей асинхронных электродвигателей

Тип	$P_{ss}$ , Вт	$P_{sw}$ , Вт	$P_Q$ , Вт	$P_{DS}$ , Вт	$P_{DR}$ , Вт	$P_D$ , Вт	$P_T$ , Вт
4АЗМ-3150/6000 УХЛ4	19,08	5492,78	5511,87	7,80	0,0003	7,80	5519,68
ЭДВА 1/173-6-16	6,32	2156,51	2162,84	2,58	0,0002	2,58	2165,43

Продолжение таблицы 7

4АЗМ-1000/6000 УХЛ4	5,99	1779,91	1784,20	2,45	0,00135	2,46	1786,04
4АЗМ-500/6000 УХЛ4	3,09	901,38	904,47	1,26	0,0001	1,26	912,19
4АЗМ-400/6000 УХЛ4	2,47	737,67	740,15	1,01	0,0001	1,01	747,70
ДАЗО4-400ХК-4 У1	1,99	600,24	602,24	0,81	$6,7 \cdot 10^{-5}$	0,81	603,05
ДАЗО4-400ХК-4 У1	1,99	600,24	602,24	0,81	$6,7 \cdot 10^{-5}$	0,81	603,05
ДАЗО4-400ХК-4 У1	1,91	567	569	0,78	0,00675	0,79	570

Далее выполним тепловой расчет параметров охладителя инвертора.

### 3.4 Тепловой расчет параметров охладителя инвертора

Определим максимальное переходное сопротивление охладителя по выражению (36):

$$R_o = \frac{T_c - T_a}{P_r} - R_{th} \quad (36)$$

где  $R_o$  – максимальное переходное сопротивление охладителя, К/Вт;

$T_c$  – температура теплопроводящей среды, К;

$R_{th}$  – термическое переходное сопротивление К/Вт.

Определяем максимальное переходное сопротивление охладителя по (36):

$$R_o = \frac{373 - 323}{1786} - 0,015 = 0,0013 \text{ К/Вт.}$$

Определим температуру кристалла транзистора по выражению (37):

$$T_{ja}=T_c+P_Q \cdot R_{th} \quad (37)$$

где  $T_{ja}$  – температура кристалла транзистора, К.

Определяем температуру кристалла транзистора по (37):

$$T_{ja}=373+1786 \cdot 0,0015=375 \text{ К.}$$

Определим температуру кристалла обратного диода по выражению (38):

$$T_{jd}=T_c+P_D \cdot R_{th} \quad (38)$$

где  $T_{jd}$  – температура кристалла обратного диода, К.

Определяем температуру кристалла обратного диода по (38):

$$T_{jd}=373+2,46 \cdot 0,0015=373 \text{ К}$$

Температуры транзистора и обратного диода не превышает 398 К, теплоотдача охладителя вполне достаточна.

Выполним данный расчет повторно для определения параметров охладителя инвертора частотного преобразователя для асинхронного электродвигателя дутьевого вентилятора.

Определяем максимальное переходное сопротивление охладителя по (36):

$$R_o=\frac{373-323}{570} - 0,015=0,072 \text{ К/Вт.}$$

Определяем температуру кристалла транзистора по (37):

$$T_{ja}=373+570\cdot 0,0015=378 \text{ К.}$$

Определяем температуру кристалла обратного диода по (38):

$$T_{jd}=373+0,79\cdot 0,0015=374 \text{ К}$$

Температуры транзистора и обратного диода не превышает 398 К, теплоотдача охладителя вполне достаточна.

Результаты теплового расчета параметров охладителя инвертора остальных высоковольтных асинхронных электродвигателей приведены в таблице 8

Таблица 8 – Результаты теплового расчета параметров охладителя инвертора высоковольтных асинхронных электродвигателей

Тип	R <sub>о</sub> , К/Вт	T <sub>ja</sub> , К	T <sub>jd</sub> , К
4АЗМ-3150/6000 УХЛ4	0,0076	381	374
ЭДВА 1/173-6-16	0,0039	376	373
4АЗМ-1000/6000 УХЛ4	0,0013	375	373
4АЗМ-500/6000 УХЛ4	0,039	374	373
4АЗМ-400/6000 УХЛ4	0,051	374	373
ДАЗО4-400ХК-4 У1	0,067	374	373
ДАЗО4-400ХК-4 У1	0,067	374	373
ДАЗО4-400ХК-4 У1	0,072	374	373

Далее выполним расчет и выбор диодов выпрямителя

### 3.5 Расчет и выбор диодов выпрямителя

Определим среднее выпрямленное напряжение по выражению (39):

$$U_d = K_{CH} \cdot U_L \quad (39)$$

где  $U_d$  – среднее выпрямленное напряжение, В;

$K_{CH}$  – коэффициент схемы при номинальной нагрузке.

Определяем среднее выпрямленное напряжение по (39)

$$U_d = 1,35 \cdot 6300 = 8505 \text{ В.}$$

Определим максимальное значение выпрямленного тока по выражению (40):

$$I_{dmv} = \frac{\sqrt{3} \cdot \frac{I_{cmax}}{\sqrt{2}} \cdot U_L \cdot \cos\varphi + n \cdot P_T}{U_d} \quad (40)$$

где  $I_{dmv}$  – максимальное значение выпрямленного тока, А;

$n$  – число *IGBT* -транзисторов.

Определяем максимальное значение выпрямленного тока по (40):

$$I_{dmv} = \frac{\sqrt{3} \cdot \frac{248,6}{\sqrt{2}} \cdot 6,3 \cdot 0,88 + 3 \cdot 1738}{8,5} = 810 \text{ А.}$$

Определяем максимальный рабочий ток диода по выражению (41):

$$I_{dm} = K_{CC} \cdot I_{dmv} \quad (41)$$

где  $I_{dm}$  – максимальный рабочий ток диода, А;

$K_{CC}$  – коэффициент для мостовой трехфазной схемы.

Определяем максимальный рабочий ток диода по (41):

$$I_{dm} = 1,045 \cdot 810 = 846 \text{ А}$$

Определим максимальное обратное напряжение диода по выражению (42):

$$U_{um} = K_{3H} \cdot \sqrt{2} \cdot U_L \cdot K_{CH} \cdot K_C + \Delta U_n \quad (42)$$

где  $U_{um}$  – максимальное обратное напряжение диода, В.

Определяем максимальное обратное напряжение диода по (42):

$$U_{um}=1,15\cdot\sqrt{2}\cdot 6300\cdot 1,35\cdot 1,1+150=15319 \text{ В.}$$

Определим потери в выпрямителе по выражению (43):

$$P_{du}=m_u\cdot K_{cs}\cdot \Delta U_u\cdot \frac{I_{dm}}{k_1} \quad (43)$$

где  $P_{du}$  – потери в выпрямителе, Вт;

$m_u$  – число полупроводниковых приборов,

$K_{cs}$  – коэффициент трехфазной схемы.

Определяем потери в выпрямителе по (43):

$$P_{du}=6\cdot 0,577\cdot 1\cdot \frac{846}{1,3}=2252 \text{ Вт.}$$

На рисунке 7 показан диод из блока выпрямителей.

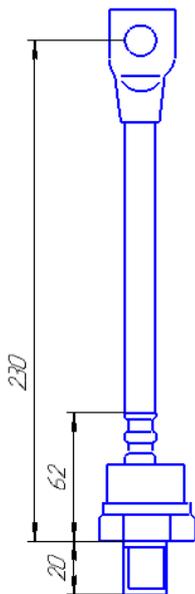


Рисунок 7 – Диод из блока выпрямителя

Повторим данный расчет для выбора вентилях выпрямителя частотного преобразователя асинхронного электродвигателя дутьевого вентилятора.

Определяем среднее выпрямленное напряжение по (39)

$$U_d = 1,35 \cdot 6300 = 8505 \text{ В}$$

Определяем максимальное значение выпрямленного тока по (40):

$$I_{dmv} = \frac{\sqrt{3} \cdot \frac{79,2}{\sqrt{2}} \cdot 6,3 \cdot 0,87 + 3 \cdot 570}{8,5} = 263 \text{ А.}$$

Определяем максимальный рабочий ток диода по (41):

$$I_{dm} = 1,045 \cdot 263 = 274 \text{ А}$$

Определяем максимальное обратное напряжение диода по (42):

$$U_{um} = 1,15 \cdot \sqrt{2} \cdot 6300 \cdot 1,35 \cdot 1,1 + 150 = 15319 \text{ В.}$$

Определяем потери в выпрямителе по (43):

$$P_{du} = 6 \cdot 0,577 \cdot 1 \cdot \frac{274}{1,3} = 729 \text{ Вт.}$$

Результаты расчета вентилях выпрямителей частотных преобразователей для остальных высоковольтных асинхронных электродвигателей приведены в таблице 9.

Таблица 9 – Результаты расчета вентилях выпрямителей частотных преобразователей для высоковольтных асинхронных электродвигателей

Тип	$U_d$ , В	$I_{dmv}$ , А	$I_{dm}$ , А	$U_{um}$ , В	$P_{du}$ , В
4АЗМ-3150/6000 УХЛ4	8505	2543	2657	15319	7077

Продолжение таблицы 9

ЭДВА 1/173-6-16	8505	961	1004	15319	2675
4АЗМ-1000/6000 УХЛ4	8505	846	810	15319	2252
4АЗМ-500/6000 УХЛ4	8505	418	436	15319	1163
4АЗМ-400/6000 УХЛ4	8505	340	355	15319	947
ДАЗО4-400ХК-4 У1	8505	274	286	15319	764
ДАЗО4-400ХК-4 У1	8505	274	286	15319	764
ДАЗО4-400ХК-4 У1	8505	263	274	15319	729

Далее выполним тепловой расчет параметров охладителя выпрямителя.

### 3.6 Тепловой расчет параметров охладителя выпрямителя

Определим максимально допустимое переходное сопротивление охладителя по выражению (44):

$$R_{th} = \frac{T_c - T_a}{P_{du}} - R_{th} \quad (44)$$

Определяем максимально допустимое переходное сопротивление охладителя по (44):

$$R_{th} = \frac{373 - 323}{2252} - 0,015 = 0,0072 \text{ К/Вт.}$$

Определим температуру кристалла по выражению (45):

$$T_{aju} = T_c + \frac{P_{du}}{n_d} \cdot R_{th} \quad (45)$$

Определяем температуру кристалла по (45):

$$T_{dju}=373+\frac{2252}{6} \cdot 0,0051=375 \text{ К}$$

Повторим данный тепловой расчет параметров охладителей частотного преобразователя асинхронного электродвигателя дутьевого вентилятора.

Определяем максимально допустимое переходное сопротивление охладителя по (44):

$$R_{th}=\frac{373-323}{729} - 0,015=0,0072 \text{ К/Вт.}$$

Определяем температуру кристалла по (45):

$$T_{dju}=373+\frac{729}{6} \cdot 0,0051=375 \text{ К}$$

Таблица 10 – Результаты теплового расчета параметров охладителя выпрямителя

Тип	R <sub>th</sub> , К/В	T <sub>dju</sub> , К
4АЗМ-3150/6000 УХЛ4	0,0071	379
ЭДВА 1/173-6-16	0,0187	375
4АЗМ-1000/6000 УХЛ4	0,0072	375
4АЗМ-500/6000 УХЛ4	0,043	374
4АЗМ-400/6000 УХЛ4	0,0528	374
ДАЗО4-400ХК-4 У1	0,0654	373
ДАЗО4-400ХК-4 У1	0,0654	373
ДАЗО4-400ХК-4 У1	0,0686	373

Далее выполним расчет и выбор охладителя.

### 3.7 Расчет и выбор охладителя

При работе преобразователя частоты его токоведущие части нагреваются. Мощность потерь, рассеиваемая в современных преобразователях частоты, достигает 2% – 2,5% передаваемой мощности.

Наиболее простым и дешевым способом является воздушное охлаждение с принудительным обдувом [16], [17], [18]. Для таких систем охлаждения частотных преобразователей используют алюминиевые радиаторы, прикрепленные к *IGBT* -транзисторам из блока инвертора и диодам из блока выпрямителя. Алюминиевые радиаторы обдуваются вентилятором, встроенным в корпус ПЧ.

Как правило, радиаторы выполняются ребристой формы, так как это способствует наиболее лучшему отводу тепла от *IGBT* -транзисторов и диодов [19].

При выборе ребристых радиаторов в качестве охладителей главным условием является максимума температуры получаемой при использовании ребристых радиаторов.

Определим требуемое суммарное переходное сопротивление охладителя по выражению (46):

$$R_{th} = \frac{R_{th_{вып}} \cdot R_{th_{инв}}}{R_{th_{вып}} + R_{th_{инв}}} \quad (46)$$

Определяем требуемое суммарное переходное сопротивление охладителя по (46):

$$R_{th} = \frac{0,0072 \cdot 0,015}{0,0072 + 0,015} = 0,0048 \text{ Вт/}^\circ\text{К.}$$

Определим необходимую площадь охладителя по выражению (47):

$$A_{охл} = 2d \cdot (b+h) \quad (47)$$

где  $A_{охл}$  – площадь охладителя, м<sup>2</sup>;

$d$  – ширина охладителя, м;

$b$  – длина охладителя, м;

$h$  – высота охладителя включая ребра.

Рассчитаем необходимую площадь охладителя по (47):

$$A_{\text{охл}}=2 \cdot 0,5 \cdot (0,4+0,2)=0,6 \text{ м}^2$$

Определим площадь охладителя участвующую в конвекции по выражению (48):

$$A_{\text{к}}=2d \cdot (b+m(h-c)) \quad (48)$$

где  $A_{\text{к}}$  – площадь охладителя участвующая в конвекции,  $\text{м}^2$ ;

$m$  – число ребер охладителя;

$c$  – высота основания охладителя.

Рассчитываем площадь охладителя участвующую в конвекции по (48):

$$A_{\text{к}}=2 \cdot 0,5 \cdot (0,4+20(0,2-0,08))=2,8 \text{ м}^2$$

Определим переходное сопротивление излучению тепла по выражению (49):

$$R_{\text{rad}}=\frac{\Delta T}{5,1 \cdot E \cdot A_{\text{охл}} \cdot \left(\frac{T_{\text{с}}}{100}\right)^4 + \left(\frac{T_{\text{а}}}{100}\right)^4} \quad (49)$$

где  $R_{\text{rad}}$  – переходное сопротивление излучению тепла,  $\text{Вт}/^\circ\text{К}$ ;

$\Delta T$  – разность температур  $T_{\text{а}}$  и  $T_{\text{с}}$ .

Определяем переходное сопротивление излучению тепла по (49):

$$R_{\text{rad}}=\frac{389-375}{5,1 \cdot 0,8 \cdot 0,6 \cdot \left(\frac{389}{100}\right)^4 + \left(\frac{375}{100}\right)^4}=0,018 \text{ Вт}/^\circ\text{К}.$$

Определяем переходное температурное сопротивление теплопередачи конвекции по выражению (50):

$$R_{\kappa} = \frac{1}{1,34 \cdot A_{\kappa} \cdot F_{rad}} \cdot \left( \frac{d}{\Delta T} \right)^{0,25} \quad (50)$$

где  $R_{\kappa}$  – переходное температурное сопротивление теплопередачи конвекции, Вт/°К;

$F_{rad}$  – коэффициент ухудшения теплоотдачи.

Определяем переходное температурное сопротивление теплопередачи конвекции по (50):

$$R_{\kappa} = \frac{1}{1,34 \cdot 2,8 \cdot 0,74} \cdot \left( \frac{0,1}{7} \right)^{0,25} = 0,125 \text{ °К/Вт.}$$

Определим переходное сопротивление охладитель-окружающая среда при естественном охлаждении по выражению (51):

$$R_{tho-o} = \frac{R_{rad} \cdot R_{\kappa}}{R_{rad} + R_{\kappa}} \quad (51)$$

где  $R_{tho-o}$  – переходное сопротивление охладитель-окружающая среда при естественном охлаждении, °К/Вт.

Определяем переходное сопротивление охладитель-окружающая среда при естественном охлаждении по (51):

$$R_{tho-o} = \frac{0,018 \cdot 0,125}{0,018 + 0,125} = 0,015 \text{ °К/Вт.}$$

Выполним повторно данный расчет для выбора охладителя частотного преобразователя асинхронного электродвигателя дутьевого вентилятора.

Определяем требуемое суммарное переходное сопротивление охладителя по (46):

$$R_{th} = \frac{0,053 \cdot 0,072}{0,053 + 0,072} = 0,030 \text{ Вт/°К}$$

Рассчитаем необходимую площадь охладителя по (47):

$$A_{\text{охл}}=2 \cdot 0,5 \cdot (0,4+0,2)=0,6 \text{ м}^2$$

Рассчитываем площадь охладителя участвующую в конвекции по (48):

$$A_{\text{к}}=20,5 \cdot (0,4+20(0,2-0,08))=2,8 \text{ м}^2.$$

Определяем переходное сопротивление излучению тепла по (49):

$$R_{\text{rad}}=\frac{381-374}{5,1 \cdot 0,8 \cdot 0,6 \cdot \left(\frac{381}{100}\right)^4 + \left(\frac{374}{100}\right)^4}=0,0098 \text{ Вт/}^\circ\text{К}.$$

Определяем переходное температурное сопротивление теплопередачи конвекции по (50):

$$R_{\text{к}}=\frac{1}{1,34 \cdot 2,8 \cdot 0,74} \cdot \left(\frac{0,1}{7}\right)^{0,25}=0,125 \text{ }^\circ\text{К/Вт}.$$

Определяем переходное сопротивление охладитель-окружающая среда при естественном охлаждении по (51):

$$R_{\text{tho-o}}=\frac{0,0098 \cdot 0,125}{0,0098+0,125}=0,00908 \text{ К/Вт}.$$

Таблица 11 – Результаты расчета и выбора охладителей

Тип	$R_{\text{th}}$ , Вт/К	$A_{\text{охл}}$ , м <sup>2</sup>	$A_{\text{к}}$ , м <sup>2</sup>	$R_{\text{rad}}$ , Вт/К	$R_{\text{к}}$ , Вт/К	$R_{\text{tho-o}}$ , К/Вт
4АЗМ-3150/6000 УХЛ4	0,0032	1,62	9,72	0,014	0,04	0,02
ЭДВА 1/173-6-16	0,0030	1,44	7,87	0,088	0,06	0,088
4АЗМ-1000/6000 УХЛ4	0,0048	0,6	2,8	0,018	0,125	0,015
4АЗМ-500/6000 УХЛ4	0,0036	0,32	0,8	0,02	0,69	0,02

## Продолжение таблицы 11

4АЗМ-400/6000 УХЛ4	0,0036	0,32	0,8	0,02	0,69	0,02
ДАЗО4-400ХК-4 У1	0,047	0,32	0,8	0,02	0,69	0,02
ДАЗО4-400ХК-4 У1	0,047	0,32	0,8	0,02	0,69	0,02
ДАЗО4-400ХК-4 У1	0,030	0,6	2,8	0,0098	0,125	0,00908

Далее выполним расчет фильтра.

### 3.8 Расчет фильтра

Частотные преобразователи, как и многие другие электронные преобразователи с питанием от сети переменного тока с частотой 50 Гц, в силу одного лишь своего устройства искажают форму потребляемого тока: ток не линейно зависит от напряжения, поскольку выпрямитель на входе устройства стоит, как правило, обычный, то есть неуправляемый. Так же и выходные ток и напряжение преобразователя частоты – они тоже отличаются искаженной формой, наличием множества гармоник из-за работы ШИМ-инвертора.

В итоге, в процессе регулярного питания статора двигателя таким искаженным током, его изоляция быстрее стареет, подшипники портятся, шум двигателя усиливается, растет вероятность тепловых и электрических пробоев обмоток. А для сети, питающей частотный преобразователь, такое положение дел всегда чревато наличием помех, которые способны навредить другому оборудованию, питающемуся от этой же сети [20].

Для избавления от выше описанных проблем, к частотным преобразователям и двигателям устанавливают дополнительно входные и

выходные фильтры, спасающие от вредных факторов и саму питающую сеть, и питаемый данным частотным преобразователем двигатель.

Входные фильтры призваны подавлять помехи генерируемые выпрямителем и ШИМ-инвертором преобразователя частоты, защищая таким образом сеть, а выходные фильтры — защищают сам двигатель от помех генерируемых ШИМ-инвертором частотного преобразователя. Входные фильтры — это дроссели и ЭМИ-фильтры, а выходные — это фильтры синфазные, моторные дроссели, синус-фильтры [21].

Определим коэффициент пульсаций на входе в фильтр по выражению (52):

$$q_{\text{ВЫХ}} = \frac{2}{m^2 - 1} \quad (52)$$

где  $q_{\text{ВЫХ}}$  — коэффициент пульсаций на входе в фильтр;

$m$  — пульстность схемы выпрямления.

Определяем коэффициент пульсаций на входе в фильтр по (52):

$$q_{\text{ВЫХ}} = \frac{2}{6^2 - 1} = 0,057.$$

Определим параметр сглаживания  $LC$ -фильтра по выражению (53):

$$LC = \frac{S+1}{(2\pi m f)^2} \quad (53)$$

где  $LC$  — параметр сглаживания  $LC$ -фильтра;

$S$  — коэффициент сглаживания по первой гармонике.

Определяем параметр сглаживания  $LC$ -фильтра по (53):

$$LC = \frac{7+1}{(2 \cdot 3,14 \cdot 6 \cdot 50)^2} = 2,25 \cdot 10^{-6}.$$

Определим средний ток звена постоянного тока по выражению (54):

$$I_d = \frac{I_{dm1}}{k_1} \quad (54)$$

Определяем средний ток звена постоянного тока по (54):

$$I_d = \frac{846}{1,3} = 650 \text{ А}$$

Определим индуктивность дросселя по выражению (55):

$$L_0 = 3 \cdot \frac{0,013 \cdot U_d}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot I_d} \quad (55)$$

Определяем индуктивность дросселя по (55):

$$L_0 = 3 \cdot \frac{0,013 \cdot 6300}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 650} = 0,00401 \text{ Гн.}$$

Определим амплитуду тока протекающего через конденсатор фильтра на частоте первой гармоники по выражению (56):

$$I_A = q_{\text{ВЫХ}} \cdot U_d \cdot 2\pi m f \cdot C_0 \quad (56)$$

где  $I_A$  – амплитуду тока протекающего через конденсатор фильтра на частоте первой гармоники, А;

$C_0$  – емкость конденсатора, Ф.

Определяем амплитуду тока протекающего через конденсатор фильтра на частоте первой гармоники по (56):

$$I_A = 0,057 \cdot 8505 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 7 \cdot 50 \cdot 20 \cdot 10^{-6} = 21,3 \text{ А.}$$

Данный расчет повторно проведем для фильтра частотного преобразователя асинхронного электродвигателя дутьевого вентилятора.

Определяем коэффициент пульсаций на входе в фильтр по (52):

$$q_{\text{ВЫХ}} = \frac{2}{6^2 - 1} = 0,057.$$

Определяем параметр сглаживания LC-фильтра по (53):

$$LC = \frac{7+1}{(2 \cdot 3,14 \cdot 6 \cdot 50)^2} = 2,25 \cdot 10^{-6}.$$

Определяем средний ток звена постоянного тока по (54):

$$I_d = \frac{274}{1,3} = 210 \text{ А.}$$

Определяем индуктивность дросселя по (55):

$$L_0 = 3 \cdot \frac{0,013 \cdot 6300}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 210} = 0,00124 \text{ Гн.}$$

Определяем амплитуду тока протекающего через конденсатор фильтра на частоте первой гармоники по (56):

$$I_A = 0,057 \cdot 8505 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 7 \cdot 50 \cdot 20 \cdot 10^{-6} = 21,3 \text{ А.}$$

Таблица 12 – Результаты расчета фильтров для ЧП высоковольтных асинхронных электродвигателей

Тип	$I_d$ , А	$L_0$ , Гн
4АЗМ-3150/6000 УХЛ4	2043	0,0003
ЭДВА 1/173-6-16	772	0,0008
4АЗМ-1000/6000 УХЛ4	650	0,00401
4АЗМ-500/6000 УХЛ4	356	0,0017
4АЗМ-400/6000 УХЛ4	273	0,0022
ДАЗО4-400ХК-4 У1	220	0,0027
ДАЗО4-400ХК-4 У1	220	0,0027
ДАЗО4-400ХК-4 У1	210	0,00124

Далее выполним расчет снаббера.

### 3.9 Расчет снаббера

Снаббер предназначен для подавления индуктивных выбросов, для понижения значения перенапряжений в переходных процессах, которые появляются при коммутационных действиях с силовыми полупроводниками. Они практически незаменимы для снижения влияния паразитной генерации, которая способствует снижению величины нагрева обмоток трансформатора и для предохранения от температурного перегрева диодов и мощных транзисторов [22], [23].

Достигается это с помощью облегчения теплообмена при работе ключа. При этом емкость служит для понижения скорости нарастания напряжения, а индуктивность снижает нарастание величины тока. При снижении значения динамических потерь в силовом ключе происходит формирование траектории переключения: при этом параллельно подключенные емкостные конденсаторы понизят скорость нарастания напряжения. Индуктивность в коммутационных цепях ограничивает скорость увеличения тока.

Снаббер выполняет задачу по предотвращению ошибочного включения семистора, которое может произойти в результате сетевых помех. Полезно применение снаббера в качестве ограничителя перенапряжений для ключевого транзистора, которые появляются во время коммутации. В этом случае модель может применяться в устройствах импульсных источников питания.

Определим мощность резистора снаббера по выражению (57):

$$P=0,5 \cdot C \cdot \Delta U^2 \cdot f_{sw} \quad (57)$$

где  $P$  – мощность резистора снаббера, Вт;

$C$  – емкость конденсатора снаббера, Ф.

Определяем мощность резистора снаббера по (57):

$$P=0,5 \cdot 0,12 \cdot 10^{-6} \cdot 60^2 \cdot 5 \cdot 10^3 = 1,08 \text{ Вт.}$$

Определим сопротивление резистора для обеспечения минимума колебаний тока коллектора IGB-транзистора по выражению (58):

$$R=2 \cdot \sqrt{\frac{L_{sn}}{C}} \quad (58)$$

где  $R$  – сопротивление резистора для обеспечения минимума колебаний тока коллектора *IGBT* -транзистора, Ом.

$L_{sn}$  – индуктивность цепей снаббера, нГн.

Определяем сопротивление резистора для обеспечения минимума колебаний тока коллектора *IGBT* -транзистора по (58):

$$R=2 \cdot \sqrt{\frac{10 \cdot 10^{-9}}{0,12 \cdot 10^{-6}}} = 0,57 \text{ Ом.}$$

Проведем повторно данный расчет для снаббера частотного преобразователя асинхронного электродвигателя дутьевого вентилятора.

Определяем мощность резистора снаббера по (57):

$$P=0,5 \cdot 0,12 \cdot 10^{-6} \cdot \Delta 60^2 \cdot 5 \cdot 10^3 = 1,08 \text{ Вт.}$$

Определяем сопротивление резистора для обеспечения минимума колебаний тока коллектора *IGBT* -транзистора по (58):

$$R=2 \cdot \sqrt{\frac{10 \cdot 10^{-9}}{0,12 \cdot 10^{-6}}} = 0,57 \text{ Ом.}$$

Расчет параметров частотных преобразователей для остальных механизмов СН ТЭЦ ВАЗа приведенных в таблице 1 выполняется аналогично.

Выбранные преобразователи частоты приведены в таблице 13.

Таблица 13 – Выбранные высоковольтные преобразователи частоты для работы с асинхронными электродвигателями крупных насосных агрегатов

Тип АД	Тип ЧП	U, кВ	cosφ	Δf, Гц	S, кВА	I <sub>н</sub> , А	количество силовых ячеек IGBT на фазу
4АЗМ-3150/6000 УХЛ4	РИТМ-В-3150/384-6000	6	0,97	0-60	4000	384	6
ЭДВА 1/173-6-16	РИТМ-В-1000/120-6000	6	0,97	0-60	1250	120	6
4АЗМ-1000/6000 УХЛ4	РИТМ-В-1000/120-6000	6	0,97	0-60	1250	120	6
4АЗМ-500/6000 УХЛ4	РИТМ-В-500/61-6000	6	0,97	0-60	630	61	5
4АЗМ-400/6000 УХЛ4	РИТМ-В-400/29-6000	6	0,97	0-60	500	29	3
ДАЗО4-400ХК-4 У1	РИТМ-В-400/29-6000	6	0,97	0-60	500	29	3
ДАЗО4-400ХК-4 У1	РИТМ-В-400/29-6000	6	0,97	0-60	500	29	3
ДАЗО4-400ХК-4 У1	РИТМ-В-400/29-6000	6	0,97	0-60	500	29	3

На рисунке 8 показан общий вид высоковольтного преобразователя частоты построенного по однотрансформаторной схеме основанного на IGBT-транзисторах.

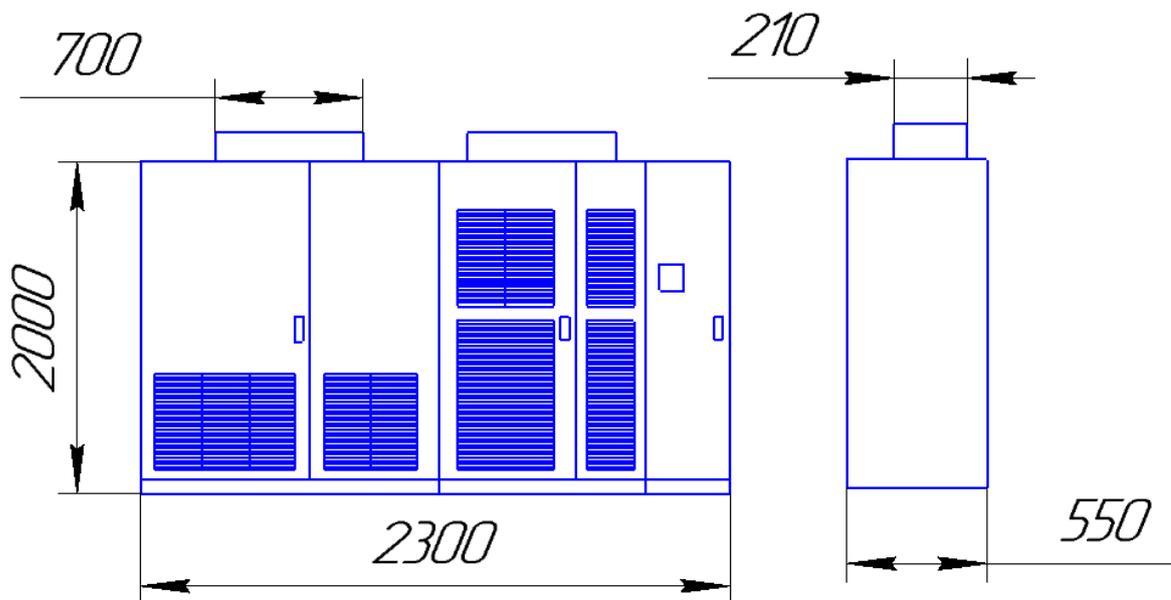


Рисунок 8 – Высоковольтный частотный преобразователь РИТМ-В  
рассчитанный на напряжение 6 кВ

Далее, в конечном подпункте этого пункта выполним расчет статических характеристик высоковольтных асинхронных электродвигателей с частотным регулированием.

### 3.10 Расчет механических характеристик ВАД с частотным регулированием

Необходимость определения статических характеристик высоковольтного асинхронного электродвигателя необходима для установления факта допустимости работы такого электродвигателя совместно с приводимым им насосным агрегатом [24].

При работе асинхронных электродвигателей с механизмами на валу важно учитывать значение критического момента асинхронного электродвигателя. Значение критического момента должно быть больше, чем критический момент вращаемого механизма. Критический момент асинхронного электродвигателя определяется выражением (59):

$$M_{кр} = \frac{3 \cdot h^2 \cdot U_{\phi}^2}{2 \cdot f_s^* \cdot \omega_s \cdot (R_s \pm \sqrt{R_s^2 + (f_s^* + x_k)^2}} \quad (59)$$

где  $M_{кр}$  – критический момент электродвигателя сетевого насоса, Н·м.

Значение вращающего момента насосного агрегата должно лежать в пределах значения вращающего момента асинхронного электродвигателя.

Вращающий момент электродвигателя определяется выражением (60):

$$M_x = \frac{3 \cdot h^2 \cdot U_{\phi}^2 \cdot R_r \cdot S_x}{\omega_s \cdot f_s^* \cdot (f_s^* \cdot S_x + R_r)^2 + \omega_s \cdot f_s^* \cdot S_x \cdot (x_{s\sigma} + x'_{r\sigma})} \quad (60)$$

где  $M_x$  – Вращающий момент электродвигателя, Н·м.

Для магистерской диссертации выполнено построение статических характеристик электродвигателя сетевого насоса в ПО «MATLAB».

Был составлен скрипт для построения механических характеристик электродвигателя сетевого насоса. Скрипт показан на рисунке 9.

```

%Задание величины скольжения, относительно частоты и напряжения:
s=[0.001:0.005:0.5];f=1;h=1;
%Вычисление угловой скорости вращения ротора, принимаем Wsh=314 рад/сек,
%обозначаем угловую скорость вращения ротора w=y:
[y1]=314*f*(1-s);
%Вычисление момента двигателя, обозначаем момент M=x:
[x1]=3*3468^2*h.^2*0.83*s./(((314*f*(3*s+0.83).^2+(314*f*s*6.28))));
%вычисление угловой скорости и момента двигателя при f=0.8 и h=0.8:
s=[0.001:0.005:1];f=0.95;h=0.9;[y2]=314*f*(1-s);
[x2]=3*3468^2*h.^2*0.83*s./(((314*f*(3*s+0.83).^2+(314*f*s*6.28))));
%вычисление угловой скорости и момента двигателя при f=0.6 и h=0.6:
s=[0.001:0.005:1];f=0.89;h=0.8;[y3]=314*f*(1-s);
[x3]=3*3468^2*h.^2*0.83*s./(((314*f*(3*s+0.83).^2+(314*f*s*6.28))));
%вычисление угловой скорости и момента двигателя при f=0.4 и h=0.4:
s=[0.001:0.005:1];f=0.84;h=0.7;[y4]=314*f*(1-s);
[x4]=3*3468^2*h.^2*0.83*s./(((314*f*(3*s+0.83).^2+(314*f*s*6.28))));
%вычисление угловой скорости и момента двигателя при f=0.2 и h=0.2:
s=[0.001:0.005:1];f=0.78;h=0.6;[y5]=314*f*(1-s);
[x5]=3*3468^2*h.^2*0.83*s./(((314*f*(3*s+0.83).^2+(314*f*s*6.28))));
%построение семейства механических характеристик:
plot(x1,y1,x2,y2,x3,y3,x4,y4,x5,y5),grid
xlabel('x (Hm)'), ylabel('y(rad)')

```

Рисунок 9 – Скрипт для построения механических характеристик высоковольтного асинхронного электродвигателя сетевого насоса при частотном регулировании

Построенные характеристики приведены на рисунке 10.

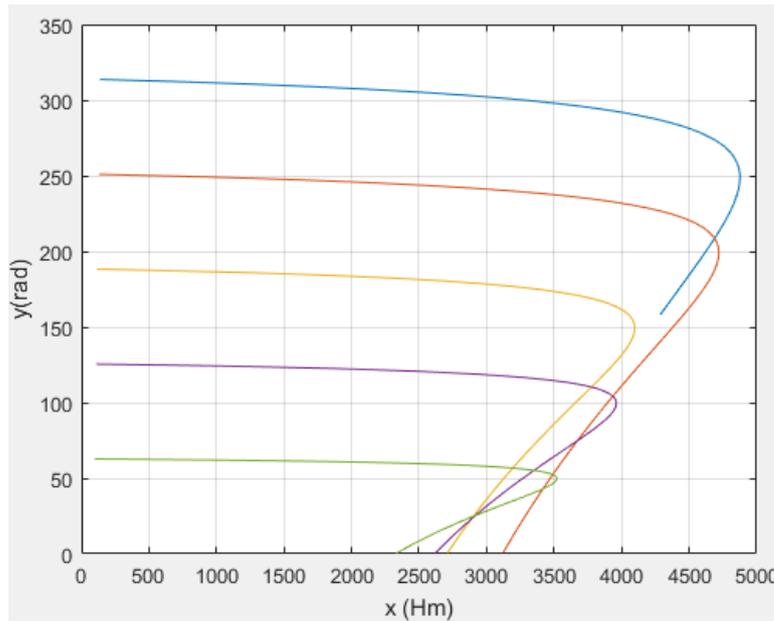


Рисунок 10 – Механические характеристики высоковольтного асинхронного электродвигателя сетевого насоса при частотном регулировании  $M_x=f(\omega_s)$

Из приведенных на рисунке 10 характеристик можно заметить, что при снижении частоты снижается величина критического момента и снижается жесткость характеристик. В [25] сказано, что это объясняется тем, что с ростом нагрузки происходит падение напряжения на активном сопротивлении статорной обмотки двигателя. В свою очередь это приводит к уменьшению магнитного потока, и соответственно, к снижению электромагнитного момента. Для сохранения постоянства критического момента двигателя сетевого насоса необходимо величину питающего напряжения на статоре в процессе регулирования уменьшать в меньшей степени, чем частоту [26]. Это необходимо в связи с тем, что сетевые насосы являются важной частью тепловой сети (горячее водоснабжение, теплоснабжение) и падение напряжения (а также падение электромагнитного момента как следствие) приводит к снижению давления в тепловой сети, что может вызвать аварию.

Перед построением механических характеристик при  $M_{кр}=\text{const}$  необходимо рассчитать относительные величины напряжения на статоре

двигателя сетевого насоса при изменении частоты, используя выражение (59):

$$7236 = \frac{3 \cdot 1^2 \cdot 3468^2}{2 \cdot 1 \cdot 314 \cdot (0,64 \pm \sqrt{0,64^2 + (1 + 6,28)^2})}$$

В ходе расчета получаем следующие результаты:

- 1) при  $f_s^* = 0,2$  величина  $h = 0,383$ ;
- 2) при  $f_s^* = 0,4$  величина  $h = 0,571$ ;
- 3) при  $f_s^* = 0,6$  величина  $h = 0,710$ ;
- 4) при  $f_s^* = 0,8$  величина  $h = 0,881$

Исходя из этих данных строим график приведенный на рисунке 11.

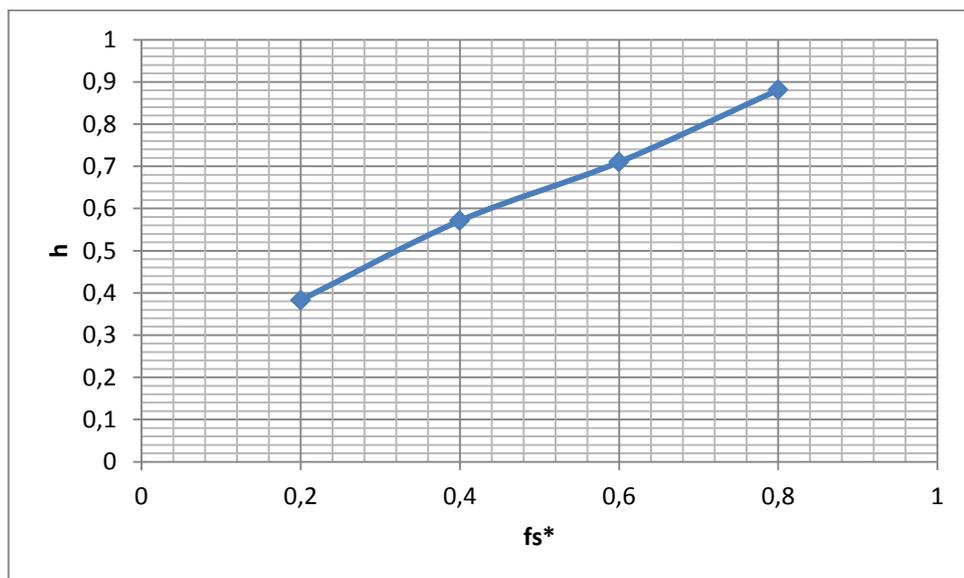


Рисунок 11 – Зависимость  $h(f_s^*)$

Данная зависимость может быть реализована в системе пропорционального частотного регулирования с  $I \cdot r$ -компенсацией, что обеспечивает регулирование скорости вращения ротора при постоянном электромагнитном моменте.

Используя ПО «MATLAB» составляем скрипт для расчета и построения семейства механических характеристик электродвигателя

сетевого насоса с  $I \cdot r$ -компенсацией. Скрипт для построения механических характеристик высоковольтного асинхронного электродвигателя при частотном регулировании с  $I \cdot r$  компенсацией показан на рисунке 12.

```

%задание величины скольжения, относительно частоты и напряжения:
s=[0.001:0.005:0.5];f=1;h=1;
%Вычисление угловой скорости вращения ротора, принимаем Wsh=314 рад/сек,
%обозначаем угловую скорость вращения ротора w=y:
[y1]=314*f*(1-s);
%Вычисление момента двигателя, обозначаем момент M=x:
[x1]=3*3468.^2*h.^2*0.83*s./((314*f*(4*s+0.83).^2+(314*f*s*6.28)));
%вычисление угловой скорости и момента двигателя при f=0.8 и h=0.8:
s=[0.001:0.005:1];f=0.8;h=0.88;[y2]=314*f*(1-s);
[x2]=3*3468.^2*h.^2*0.83*s./((314*f*(4.2*s+0.83).^2+(314*f*s*6.28)));
%вычисление угловой скорости и момента двигателя при f=0.6 и h=0.6:
s=[0.001:0.005:1];f=0.6;h=0.71;[y3]=314*f*(1-s);
[x3]=3*3468.^2*h.^2*0.83*s./((314*f*(4*s+0.83).^2+(314*f*s*6.28)));
%вычисление угловой скорости и момента двигателя при f=0.4 и h=0.4:
s=[0.001:0.005:1];f=0.4;h=0.57;[y4]=314*f*(1-s);
[x4]=3*3468.^2*h.^2*0.83*s./((314*f*(4.5*s+0.83).^2+(314*f*s*6.28)));
%вычисление угловой скорости и момента двигателя при f=0.2 и h=0.2:
s=[0.001:0.005:1];f=0.2;h=0.38;[y5]=314*f*(1-s);
[x5]=3*3468.^2*h.^2*0.83*s./((314*f*(5.3*s+0.83).^2+(314*f*s*6.28)));
%построение семейства механических характеристик:
plot(x1,y1,x2,y2,x3,y3,x4,y4,x5,y5),grid
xlabel('x (Hm)'), ylabel('y(rad)')

```

Рисунок 12 – Скрипт для построения механических характеристик высоковольтного асинхронного электродвигателя при частотном регулировании с  $I \cdot r$ -компенсацией

На рисунке 13 показано семейство механических характеристик высоковольтного асинхронного электродвигателя при частотном регулировании с  $I \cdot r$  компенсацией.

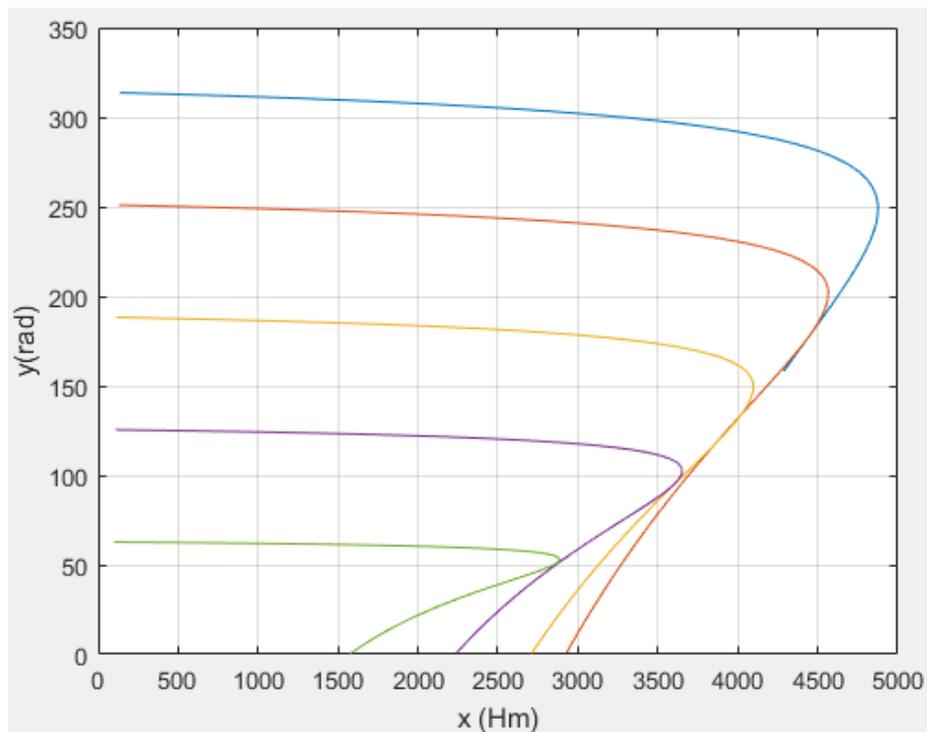


Рисунок 13 – Семейство механических характеристик при наличии ЧРП с  $I \cdot r$  компенсацией для сетевого насоса

По характеристикам, приведенным на рисунке 13 можно увидеть, что пропорциональное частотное регулирование с  $I \cdot r$ -компенсацией обеспечивает регулирование скорости вращения ротора с неизменным критическим электромагнитным моментом. Как описано в [27] – использование частотного регулирования с  $I \cdot r$  – компенсацией позволяет увеличить жесткость характеристики высоковольтного асинхронного электродвигателя, и при этом падение напряжения значительно ниже, чем при отсутствии  $I \cdot r$  – компенсации.

Теперь в ПО «MATLAB» составим скрипт для расчета и построения механических характеристик высоковольтного асинхронного электродвигателя сетевого насоса с частотным регулированием и нагрузкой на валу. В этом же скрипте прописываем механическую характеристику сетевого насоса. Как сказано ранее, это необходимо для проверки нормальной работы насосного агрегата совместно с высоковольтным

асинхронным электродвигателем с частотным регулированием. На рисунке 14 показан скрипт для построения этих характеристик.

```

%задание величины скольжения, относительно частоты и напряжения:
s=[0.001:0.005:0.5];f=1;h=1;
%Вычисление угловой скорости вращения ротора, принимаем Wsh=314 рад/сек,
%обозначаем угловую скорость вращения ротора w=y:
[y1]=314*f*(1-s);
%Вычисление момента двигателя, обозначаем момент M=x:
[x1]=3*3468.^2*h.^2*0.83*s./((314*f*(4*s+0.83).^2+(314*f*s*6.28)));
%вычисление угловой скорости и момента двигателя при f=0.8 и h=0.8:
s=[0.001:0.005:1];f=0.8;h=0.88;[y2]=314*f*(1-s);
[x2]=3*3468.^2*h.^2*0.83*s./((314*f*(4.2*s+0.83).^2+(314*f*s*6.28)));
%вычисление угловой скорости и момента двигателя при f=0.6 и h=0.6:
s=[0.001:0.005:1];f=0.6;h=0.71;[y3]=314*f*(1-s);
[x3]=3*3468.^2*h.^2*0.83*s./((314*f*(4*s+0.83).^2+(314*f*s*6.28)));
%вычисление угловой скорости и момента двигателя при f=0.4 и h=0.4:
s=[0.001:0.005:1];f=0.4;h=0.57;[y4]=314*f*(1-s);
[x4]=3*3468.^2*h.^2*0.83*s./((314*f*(4.5*s+0.83).^2+(314*f*s*6.28)));
%вычисление угловой скорости и момента двигателя при f=0.2 и h=0.2:
s=[0.001:0.005:1];f=0.2;h=0.38;[y5]=314*f*(1-s);
[x5]=3*3468.^2*h.^2*0.83*s./((314*f*(5.3*s+0.83).^2+(314*f*s*6.28)));
%построение семейства механических характеристик:
plot(x1,y1,x2,y2,x3,y3,x4,y4,x5,y5),grid
hold on
%задание угловой скорости вращения сетевого насоса:
w=[1:0.2:0.5];
%вычисление угловой скорости вращения сетевого насоса:
[y1]=314*f*(1-s)
[x1]=696+(2323-696)*(314*f*(1-s)./3000).^2;
%построение характеристики
plot(x1,y1),grid
xlabel('x (Hm)'),ylabel('y(rad)')

```

Рисунок 14 – Скрипт для расчета и построения механических характеристик высоковольтного асинхронного электродвигателя сетевого насоса с частотным регулированием и нагрузкой на валу

На рисунке 15 показано семейство характеристик высоковольтного асинхронного электродвигателя при нагрузке на валу в виде сетевого насоса.

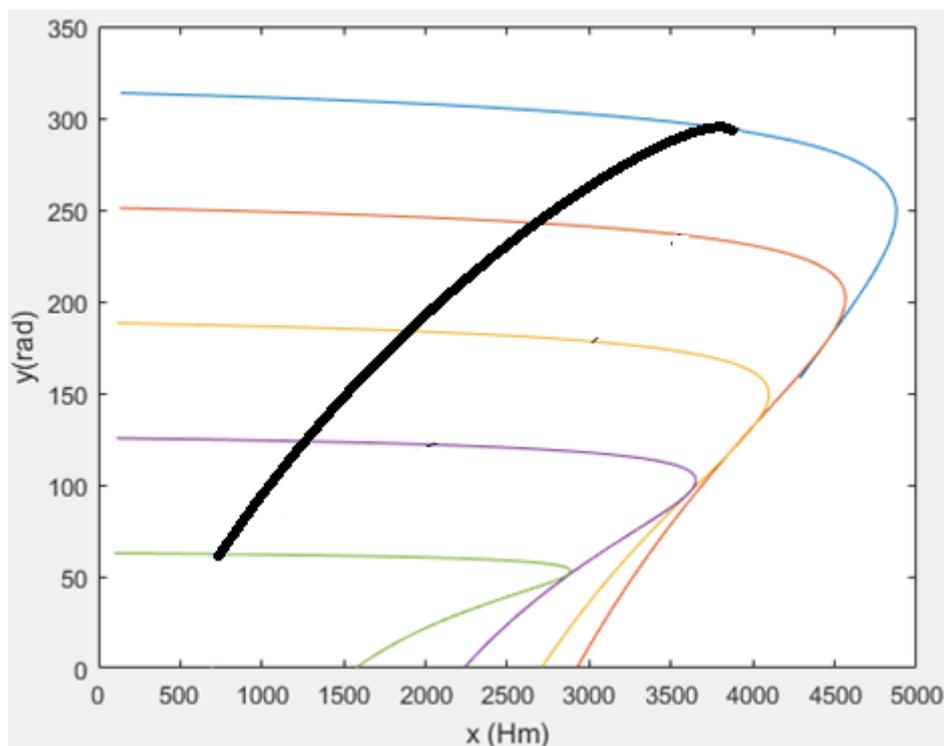


Рисунок 15 – Семейство характеристик высоковольтного асинхронного электродвигателя при нагрузке на валу в виде сетевого насоса

Из приведенного выше семейства механических характеристик высоковольтного асинхронного электродвигателя с нагрузкой на валу и построенной характеристики сетевого насоса заметно, что работа этого агрегата с приводом от высоковольтного асинхронного электродвигателя с частотным регулированием допустима.

В ПО «MATLAB» составим скрипт для расчета и построения механических характеристик высоковольтного асинхронного электродвигателя дутьевого вентилятора с частотным регулированием и нагрузкой на валу. На рисунке 16 показан скрипт.

```

%задание величины скольжения, относительно частоты и напряжения:
s=[0.001:0.005:0.5];f=1;h=1;
%Вычисление угловой скорости вращения ротора, принимаем Wsh=314 рад/сек,
%обозначаем угловую скорость вращения ротора w=y:
[y1]=314*f*(1-s);
%Вычисление момента двигателя, обозначаем момент M=x:
[x1]=3*3468.^2*h.^2*0.88*s./((314*f*(4*s+0.88).^2+(314*f*s*18.84)));
%вычисление угловой скорости и момента двигателя при f=0.8 и h=0.8:
s=[0.001:0.005:1];f=0.8;h=0.88;[y2]=314*f*(1-s);
[x2]=3*3468.^2*h.^2*0.88*s./((314*f*(4*s+0.88).^2+(314*f*s*18.84)));
%вычисление угловой скорости и момента двигателя при f=0.6 и h=0.6:
s=[0.001:0.005:1];f=0.6;h=0.71;[y3]=314*f*(1-s);
[x3]=3*3468.^2*h.^2*0.88*s./((314*f*(3.2*s+0.88).^2+(314*f*s*18.84)));
%вычисление угловой скорости и момента двигателя при f=0.4 и h=0.4:
s=[0.001:0.005:1];f=0.4;h=0.57;[y4]=314*f*(1-s);
[x4]=3*3468.^2*h.^2*0.88*s./((314*f*(3.2*s+0.88).^2+(314*f*s*18.84)));
%вычисление угловой скорости и момента двигателя при f=0.2 и h=0.2:
s=[0.001:0.005:1];f=0.2;h=0.38;[y5]=314*f*(1-s);
[x5]=3*3468.^2*h.^2*0.88*s./((314*f*(2.6*s+0.88).^2+(314*f*s*18.84)));
%построение семейства механических характеристик:
plot(x1,y1,x2,y2,x3,y3,x4,y4,x5,y5),grid
hold on
%задание угловой скорости вращения сетевого насоса:
w=[1:0.2:0.5];
%вычисление угловой скорости вращения сетевого насоса:
[y1]=314*f*(1-s)
[x1]=269+(898-269)*(314*f*(1-s)./3000).^2;
%построение характеристики
plot(x1,y1),grid
xlabel('x (Hm)'),ylabel('y(rad)')

```

Рисунок 16 – Скрипт для расчета и построения механических характеристик высоковольтного асинхронного электродвигателя дутьевого вентилятора с частотным регулированием и нагрузкой на валу

На рисунке 17 показаны механические характеристики высоковольтного асинхронного электродвигателя дутьевого вентилятора с частотным регулированием и нагрузкой на валу.

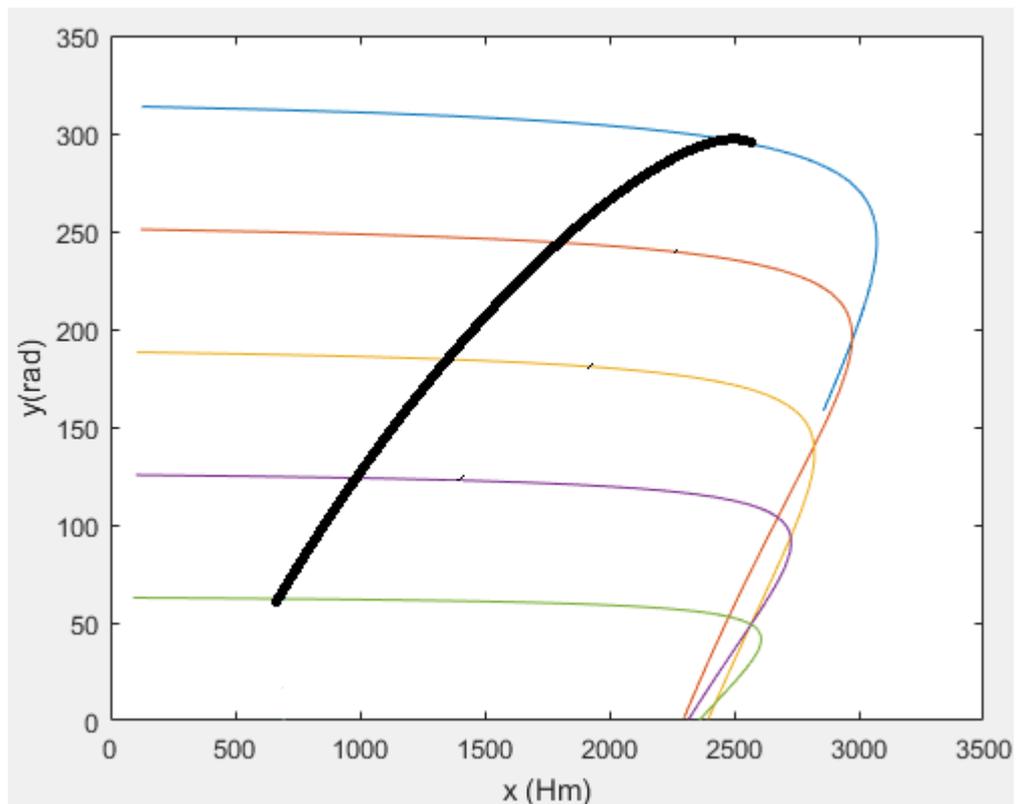


Рисунок 17 – механическая характеристика высоковольтного асинхронного электродвигателя дутьевого вентилятора с частотным регулированием и нагрузкой на валу

Из приведенного выше семейства механических характеристик высоковольтного асинхронного электродвигателя с нагрузкой на валу и построенной характеристики дутьевого вентилятора заметно, что работа этого агрегата с приводом от высоковольтного асинхронного электродвигателя с частотным регулированием допустима.

### 3.11 Выводы к разделу 3

В этом разделе выполнен расчет параметров преобразователей частоты согласно методике приведенной в [14] на примерах высоковольтных электродвигателей сетевого насоса и дутьевого вентилятора ТЭЦ ВАЗа, расчет параметров преобразователей частоты других высоковольтных электродвигателей выполнены по аналогии. Информация о расчетах по узлам

высоковольтных частотных преобразователей предоставлена в таблицах 5-13. По результатам вышеприведенного расчета выбраны высоковольтные частотные преобразователи, результаты выбора высоковольтных преобразователей частоты приведены в таблице 13. Также, с помощью ПО MATLAB с применением скриптов показанных на рисунках 9, 12, 14, 16 были рассчитаны и построены механические характеристики высоковольтных асинхронных электродвигателей на холостом ходу без  $I \cdot r$  компенсации, с  $I \cdot r$  компенсацией и с нагрузкой на валу в виде сетевого насоса и дутьевого вентилятора. Характеристики показаны на рисунках 10, 13, 15, 17. По данным характеристикам сделан вывод о том, что работа механизмов приводимых высоковольтными асинхронными электродвигателями с частотным регулированием допустима на частотах тока ниже 50 Гц.

#### 4 Оценка технико-экономической эффективности от внедрения ЧРП

Оценка технико-экономического эффекта от внедрения частотно-регулируемого электропривода необходима для проверки гипотезы вынесенной в первом разделе. Вынесенная гипотеза говорит, что при внедрении ЧРП расход электроэнергии выделяемой на СН снижается с 9 % до 6 %.

В настоящее время на СН ТЭЦ ВАЗа расходуется 105 МВт (установленная электрическая мощность ТЭЦ ВАЗа составляет 1172 МВт). Выполним расчет в соответствии с [28], [29]. Определим расход электроэнергии за год механизмами СН ТЭЦ ВАЗа по выражению (61):

$$W_{\text{СН}}=P_{\text{СН}}\cdot T_{\text{год}} \quad (61)$$

где  $W_{\text{СН}}$  – расход электроэнергии механизмами СН за промежуток времени, кВт·ч;

$P_{\text{СН}}$  – мощность расходуемая механизмами СН, кВт;

$T_{\text{год}}$  – число часов в году, ч.

Определяем расход электроэнергии за год механизмами СН ТЭЦ ВАЗа по (61):

$$W_{\text{СН}}=105000\cdot 8760=919800000 \text{ кВт}\cdot\text{ч}.$$

Теперь определим годовой расход электроэнергии высоковольтными асинхронными электродвигателями крупных насосных агрегатов из числа механизмов СН ТЭЦ ВАЗа по выражению (62):

$$W_{\text{ВЭД}}=P_{\text{ВЭД}}\cdot T_{\text{год}} \quad (62)$$

где  $W_{\text{ВЭД}}$  – расход электроэнергии высоковольтными асинхронными электродвигателями крупных насосных агрегатов из числа механизмов СН, кВт·ч;

$P_{\text{ВЭД}}$  – мощность, расходуемая высоковольтными асинхронными электродвигателями крупных насосных агрегатов из числа механизмов СН, кВт.

Определяем расход электроэнергии высоковольтными асинхронными электродвигателями крупных насосных агрегатов из числа механизмов СН по (63):

$$W_{\text{ВЭД}}=68000 \cdot 8760=595680000 \text{ кВт ч}$$

Далее определим расход электроэнергии за характерный период (зимний и летний) каждым из имеющихся высоковольтных асинхронных электродвигателей (таблица 1). За основу берем мощность, потребляемую каждым отдельно взятым высоковольтным асинхронным электродвигателем с частотным регулированием из таблицы 2.

Рассчитаем расход электроэнергии высоковольтным асинхронным электродвигателем сетевого насоса с частотным регулированием в режиме пиковой загрузки по (62):

$$W_{\text{ВЭД}}=946 \cdot 4320=4086720 \text{ кВт ч}$$

Теперь определим расход электроэнергии высоковольтным асинхронным электродвигателем сетевого насоса с частотным регулированием в режиме минимальной загрузки по (62):

$$W_{\text{ВЭД}}=263 \cdot 3600=946800 \text{ кВт ч}$$

Далее находим экономию электроэнергии, потребляемую высоковольтным асинхронным электродвигателем сетевого насоса в каждый характерный период по выражению (63):

$$\Delta \mathcal{E}_{\text{ЭК}} = \Delta P_{i_{\text{ВЭД}}} \cdot t_{i_{\text{ВЭД}}} \quad (63)$$

где  $\Delta \mathcal{E}_{\text{ЭК}}$  – Экономия электроэнергии потребляемой высоковольтным асинхронным электродвигателем при использовании ЧРП, кВт·ч;

$\Delta P_{i_{\text{ВЭД}}}$  – разность мощностей высоковольтного асинхронного электродвигателя с ПЧ и без ПЧ, кВт;

$t_{i_{\text{ВЭД}}}$  – время, в течение которого высоковольтный асинхронный электродвигатель работает с постоянной нагрузкой двигателя, час.

Рассчитываем экономию электроэнергии, потребляемую высоковольтным асинхронным электродвигателем сетевого насоса в режиме пиковой загрузки по (63):

$$\Delta \mathcal{E}_{\text{ЭК}} = (1600 - 946) \cdot 4320 = 2852280 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$$

Теперь определяем экономию электроэнергии, потребляемую высоковольтным асинхронным электродвигателем сетевого насоса в режиме минимальной загрузки по (63):

$$\Delta \mathcal{E}_{\text{ЭК}} = (1600 - 263) \cdot 3600 = 4813200 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$$

Теперь данный расчет повторим для высоковольтного асинхронного электродвигателя дутьевого вентилятора:

Определяем расход электроэнергии высоковольтным асинхронным электродвигателем дутьевого вентилятора с частотным регулированием в режиме пиковой загрузки по (61):

$$W_{\text{ВЭД}}=382 \cdot 4320=1650240 \text{ кВт ч}$$

Считаем расход электроэнергии высоковольтным асинхронным электродвигателем дутьевого вентилятора с частотным регулированием в режиме минимальной загрузки по (62):

$$W_{\text{ВЭД}}=154 \cdot 3600=554400 \text{ кВт ч}$$

Определяем экономию электроэнергии, потребляемую высоковольтным асинхронным электродвигателем дутьевого вентилятора в режиме пиковой загрузки по (63):

$$\Delta \mathcal{E}_{\text{эк}}=(500-382) \cdot 4320=509760 \text{ кВт ч}$$

Вычисляем экономию электроэнергии, потребляемую высоковольтным асинхронным электродвигателем дутьевого вентилятора в режиме минимальной загрузки по (63):

$$\Delta \mathcal{E}_{\text{эк}}=(500-154) \cdot 3600=1245600 \text{ кВт ч}$$

Определение расходов электроэнергии и экономии электроэнергии в пиковом и минимальном режимах остальных высоковольтных асинхронных электродвигателей в характерные периоды проводим аналогично. Результаты расчета помещаем в таблицу 14.

Таблица 14 – Расходы электроэнергии высоковольтными асинхронными электродвигателями крупных насосных агрегатов с частотным регулированием.

Тип	Потребление электроэнергии в период пиковой загрузки кВт·ч	Потребление электроэнергии в период минимальной загрузки кВт·ч	Экономия электроэнергии в период пиковой загрузки кВт·ч	Экономия электроэнергии в период минимальной загрузки кВт·ч

Продолжение таблицы 14

4АЗМ-3150/6000 УХЛ4	12078720	4755600	5201280	9644400
ЭДВА 1/173-6-16	3792960	1951200	3119040	3808800
4АЗМ-1000/6000 УХЛ4	4086720	946800	2852280	4813200
4АЗМ-500/6000 УХЛ4	1918080	396000	803520	1872000
4АЗМ-400/6000 УХЛ4	1516320	705600	643680	1094400
ДАЗО4-400ХК-4 У1	1680480	615600	479520	1184400
ДАЗО4-400ХК-4 У1	1680480	615600	479520	1184400
ДАЗО4-400ХК-4 У1	1650240	554400	509760	1245600

Определим стоимость сэкономленной электроэнергии в каждый характерный период по выражению (64):

$$C_{ээ} = 1,15 \cdot T_э \cdot \Delta Э_{эк} \quad (64)$$

где  $C_{ээ}$  – Стоимость сэкономленной электроэнергии за расчетный период, руб.;

$T_э$  – Тариф на электроэнергию, покупаемую для покрытия СН, руб/кВт·ч.

Рассчитываем стоимость сэкономленной электроэнергии в период пиковой загрузки по (64):

$$C_{ээ} = 1,15 \cdot 2,1 \cdot 2852280 = 6888256 \text{ руб.}$$

Теперь вычисляем стоимость сэкономленной электроэнергии в период минимальной загрузки по (64):

$$C_{\text{ээ}}=1,15 \cdot 2,1 \cdot 4813200=11623878 \text{ руб}$$

Далее находим ориентировочную стоимость преобразователя частоты в соответствии с выражением (65):

$$C_{\text{чрп}}=1,7 \cdot P_{\text{м}} \quad (65)$$

где  $C_{\text{чрп}}$  – стоимость преобразователя частоты, тыс. руб.;

$P_{\text{м}}$  – номинальная мощность высоковольтного асинхронного электродвигателя, кВт.

Рассчитываем ориентировочную стоимость преобразователя частоты по (65):

$$C_{\text{чрп}}=1,2 \cdot 1000=1200 \text{ тыс. руб.}$$

По каталогу производителя выбираем наиболее подходящий по стоимости вариант. В соответствии с каталогом наиболее подходящий вариант составляет в цене 1500 тыс. руб.

Определим срок окупаемости частотно-регулируемого электропривода по выражению (66):

$$T_{\text{ок}}=\frac{C_{\text{ээ}}}{d_{\text{у}} \cdot P_{\text{пр}}} \quad (66)$$

где  $T_{\text{ок}}$  – Срок окупаемости частотно-регулируемого электропривода, год;

$d_{\text{у}}$  – Удельная стоимость 1 кВт ЧРП, руб/кВт;

$P_{\text{пр}}$  – Паспортная мощность преобразователя частоты, кВт.

Рассчитываем срок окупаемости частотно-регулируемого электропривода по (67):

$$T_{\text{ок}} = \frac{5033520}{1500 \cdot 1000} = 3,3 \text{ год.}$$

Данный расчет повторяем для высоковольтного асинхронного электродвигателя дутьевого вентилятора.

Определяем стоимость сэкономленной электроэнергии в период пиковой загрузки по (64):

$$C_{\text{ээ}} = 1,15 \cdot 2,1 \cdot 509760 = 1231070 \text{ руб.}$$

Определяем стоимость сэкономленной электроэнергии в период минимальной загрузки по (64):

$$C_{\text{ээ}} = 1,15 \cdot 2,1 \cdot 1245600 = 3008124 \text{ руб}$$

Определяем ориентировочную стоимость преобразователя частоты по (65):

$$C_{\text{ЧРП}} = 1,2 \cdot 500 = 600 \text{ тыс. руб.}$$

По каталогу производителя выбираем наиболее подходящий по стоимости вариант. В соответствии с каталогом наиболее подходящий вариант составляет в цене 1000 тыс. руб.

Определяем срок окупаемости частотно-регулируемого электропривода по (66):

$$T_{\text{ок}} = \frac{4239194}{1500 \cdot 500} = 2,8 \text{ год.}$$

Расчет стоимости сэкономленной электроэнергии, стоимости ЧРП, сроков окупаемости остальных высоковольтных ЧРП показаны в таблице 15.

Таблица 15 – Результаты расчета стоимости сэкономленной электроэнергии, стоимости ЧРП, сроков окупаемости высоковольтных ЧРП

Тип	Стоимость сэкономленной электроэнергии, руб.	Стоимость высоковольтного ПЧ, тыс. руб.	Срок окупаемости ПЧ, год
4АЗМ-3150/6000 УХЛ4	35852317	3600	7,5
ЭДВА 1/173-6-16	16728802	1500	6,9
4АЗМ-1000/6000 УХЛ4	5033520	1200	3,3
4АЗМ-500/6000 УХЛ4	6461381	1000	4,3
4АЗМ-400/6000 УХЛ4	4197463	1000	2,7
ДАЗО4-400ХК-4 У1	4018367	1000	2,6
ДАЗО4-400ХК-4 У1	4018367	1000	2,6
ДАЗО4-400ХК-4 У1	4239194	1000	2,8

Оценим суммарное снижение мощности высоковольтных асинхронных электродвигателей оснащенных ПЧ по выражению (67):

$$P_{\text{вэд}} = \frac{W_{\text{эд}}}{T} \quad (67)$$

Определяем суммарное снижение мощности высоковольтных асинхронных электродвигателей оснащенных ПЧ по (67):

$$P_{\text{вэд}} = \frac{38944800}{8760} = 45541 \text{ кВт}$$

Видим, что суммарная мощность высоковольтных асинхронных электродвигателей составляет 45,5 МВт, вместо 68 МВт.

Оценим снижение потребляемой мощности электроприемниками системы собственных нужд ТЭЦ ВАЗа, используя выражение (68):

$$P_{\text{сн2}} = (P_{\text{сн1}} - P_{\text{вэд1}}) + P_{\text{вэд2}} \quad (68)$$

где  $P_{\text{сн2}}$  – мощность СН после внедрения ЧРП, МВт;

$P_{\text{сн1}}$  – мощность СН до внедрения ЧРП, МВт

$P_{\text{вэд1}}$  – мощность высоковольтных асинхронных электродвигателей до внедрения ЧРП, МВт;

$P_{\text{вэд2}}$  – мощность высоковольтных асинхронных электродвигателей после внедрения ЧРП, МВт;

Мощность, потребляемая электроприемниками СН ТЭЦ ВАЗа согласно выражению (68), снизиться на величину, равную

$$P_{\text{сн2}}=(105 - 68) + 45=82 \text{ МВт.}$$

#### 4.1 Выводы к разделу 4

Проведенный в данном разделе расчет показал экономическую эффективность внедрения частотно-регулируемого электропривода для совместной работы с крупными насосными агрегатами ТЭЦ ВАЗа.

Суммарная экономия электроэнергии составит 38944800 кВт·ч. Суммарная стоимость сэкономленной электроэнергии составляет 80549411 руб. за год. Срок окупаемости всех преобразователей частоты, внедряемых в состав высоковольтных асинхронных электроприводов, не превышает 10 лет [30].

Наибольший срок окупаемости имеют высоковольтные преобразователи частоты, входящие в систему асинхронного электропривода питательных насосов – 7,5 лет.

При реализации предлагаемой модернизации процент мощности, расходуемый на собственные нужды ТЭЦ ВАЗа, снижается с 9 до 6 %, т.е. со 105 до 82 МВт

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В магистерской диссертации решена проблема по внедрению высоковольтного частотно-регулируемого электропривода, приводящего в движение крупное насосное оборудование, с целью повышения энергоэффективности ТЭЦ ВАЗа.

1. Для достижения данной цели проанализированы особенности режимов работы ТЭЦ ВАЗа и насосного оборудования, задействованного в основном технологическом процессе. Выявлено, что имеются предпосылки для энергосбережения в системе собственных нужд ТЭЦ за счет внедрения высоковольтного частотно-регулируемого электропривода. Выполнен анализ технических решений в области высоковольтного частотно-регулируемого электропривода.

2. Выполнена проверка соответствия номинальной производительности крупного насосного оборудования системы СН ТЭЦ ВАЗа фактической производительности. Цель проверки выявление завышенного расчетного запаса производительности крупного насосного оборудования. В результате этой проверки выявлено, что производительность крупных насосов с высоковольтным асинхронным электроприводом завышены. На основании фактических производительностей крупных насосов выполнен расчет мощностей высоковольтных асинхронных электродвигателей, достаточных для привода этих насосов. Данное мероприятие также способствует энергосбережению на ТЭЦ ВАЗа.

3. На основании анализа технических решений в области высоковольтного частотно-регулируемого электропривода и результатов проверки соответствия номинальной производительности крупного насосного оборудования системы СН ТЭЦ ВАЗа фактической производительности выполнен расчет высоковольтных преобразователей частоты для работы в составе высоковольтного частотно-регулируемого асинхронного электропривода на примерах высоковольтных асинхронных

электродвигателей сетевого насоса и дутьевого вентилятора. Проведен расчет и сделан выбор следующих узлов высоковольтных преобразователей частоты: расчет и выбор транзисторных ключей инвертора, диодов выпрямителя, охладителей инвертора и выпрямителя, фильтра и снаббера. Выполнены расчеты потерь в инверторе и выпрямителе, по результатам расчета выполнены тепловые расчеты для выбора охладителей инвертора и выпрямителя. По результатам расчета наиболее подходящими оказались высоковольтные частотные преобразователи частоты марки «РИТМ-В» российского производства. После расчета высоковольтных преобразователей частоты проведены расчет и построение механических характеристик высоковольтных асинхронных электродвигателей с частотным регулированием на примерах электродвигателей сетевого насоса и дутьевого вентилятора. Выполнено наложение на механические характеристики высоковольтных асинхронных электродвигателей механических характеристик соответствующих насосных агрегатов. В результате наложения механических характеристик выявлено, что работа высоковольтных асинхронных электродвигателей с частотным регулированием совместно с насосными агрегатами допустима с частотами тока ниже 50 Гц.

4. Произведена оценка технико-экономического эффекта от внедрения частотно-регулируемого электропривода. Необходимость этой проверки необходима для подтверждения или опровержения гипотезы вынесенной в первом разделе магистерской диссертации. Результатом оценки является подтверждение гипотезы, сущность которой заключается в том, что при внедрении высоковольтного частотно-регулируемого электропривода в систему собственных нужд ТЭЦ ВАЗа мощность собственных нужд снижается с 9 до 6 %, т.е. со 105 до 82 МВт.

Таким образом, внедрение высоковольтного частотно-регулируемого электропривода положительно сказывается на энергоэффективности ТЭЦ ВАЗа. Высоковольтный частотно-регулируемый электропривод позволяет

существенно снизить расходы на закупку электроэнергии из энергосистемы и вместе с этим позволяет оптимизировать режимы работы крупного насосного оборудования участвующего в главном технологическом процессе ТЭЦ ВАЗа. Также при помощи построения механических высоковольтных асинхронных электродвигателей показано, что работа крупных насосных агрегатов с приводом от этих высоковольтных асинхронных электродвигателей работающих совместно с высоковольтными преобразователями частоты на частотах ниже номинальной допустима. В связи с вышесказанным сделано заключение: гипотеза исследования верна. Цель, поставленная во введении магистерской диссертации, достигнута. Работа имеет практическую новизну и значимость для ТЭЦ Волжского автозавода.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ:

1. Окле́й П.И. Экономико-математические методы и модели для проектирования программ ремонтных работ на тепловых электростанциях. — М. : URSS, 2017. — 288 с.
2. Авинов В.В. Повышение энергоэффективности внутростанционных теплосетей Тольяттинской ТЭЦ // Актуальные проблемы энергетики АПК материалы VIII международной научно-практической конференции. — Саратов: Издательство Саратовского государственного аграрного университета, 2017. — С. 5-6.
3. Климова Г.Н. Электроэнергетические системы и сети. Энергосбережение. Учебное пособие для прикладного бакалавриата. — 2-е изд. — М. : Юрайт, 2017. — 179 с.
4. Саксонов А.С. Эффективность применения частотно регулируемого электропривода для сетевых насосов теплоэлектроцентралей // Молодой ученый. — 2019. — № 39. — С. 201-202.
5. Саксонов А.С. Эффективность применения частотно-регулируемого электропривода для циркуляционных насосов ТЭЦ // Энергоэффективность и энергобезопасность производственных процессов (ЭЭПП-2019). — Тольятти : Издательство ТГУ, 2019. — С. 219-222.
6. Саксонов А.С. Техничко-экономическое сравнение электроприводов сетевых насосов ТЭЦ с частотным регулированием и дросселированием // Молодой ученый. — 2019. — № 45. — С. 24-26.
7. Босов Н.С. . Анализ эффективности регулирования дымососов частотно-регулируемым приводом на котлоагрегате ТГМ-96 // научный потенциал XXI века материалы Международной (заочной) научно-практической конференции. — Нефтекамск : Издательство БашГУ, 2019. — С. 29-33.

8. Wei T., Song Q., Li J., Zhao B., Chen Z., Zeng R. . Experimental evaluation of IGCT converters with reduced DI/DT limiting inductance // Conference Proceedings - IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC. — New Orleans : , 2017. — С. 1710-1716.
9. Горбунов В.А., Лоншаков Н.А. Сравнение эффективности работы питательных насосов с турбо- и электроприводом // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (Бенардосовские чтения) материалы международной (XX Всероссийской) научно-технической конференции. — Иваново : Издательство ИГЭУ, 2019. — С. 80-83.
10. Бирюков Б.В., Рюмина О.И. Применение IGCT тиристоров в современной технике // Приоритетные научные исследования и разработки. Сборник статей Международной научно-практической конференции. — Саратов : Издательство Саратовского аграрного университета, 2016. — С. 17-20.
11. Такахашаи М., Юшида С., Тамерони А., Икава О., Субботин Е. RC-IGBT седьмого поколения чип технология RC IGBT седьмого поколения // Силовая электроника. — 2018. — № 74. — С. 38-42.
12. Печников М.А., Грачев А.В., Лаврентьев А.В. Сравнительный анализ и выбор наиболее эффективного метода регулирования производительности питательных электронасосов на примере Читинской ТЭЦ-1 // Кулагинские чтения: техника и технологии производственных процессов Сборник статей. — Чита : Издательство ЗГУ, 2017. — С. 192-196.
13. Задворский С.Н., Силаев А.А. Система автоматического управления группой сетевых насосов для котельной станции // Научно-технический вестник Поволжья. — 2016. — № 2. — С. 109-112.
14. Денисов В.А., Третьякова М.Н. Асинхронный электропривод с частотно-векторным управлением: электронное учебно-

методическое пособие . — Тольятти : Издательство ТГУ, 2016. — 48 с.

15. Инструкция по расчету экономической эффективности применения частотно-регулируемого электропривода, АО ВНИИЭ, МЭИ, М.: - 1997
16. Zanotto L., Dan M., Toigo V., Ferrari F., Zella D., Gutierrez D., Huart M., Decamps H., Perna M., Merli E., Finotti C., Guarda F., Panizza C. Acceleration grid power supply conversion system of the mitica neutral beam injector: on site integration activities and tests // Fusion Engineering and Design. — 2019. — № 138. — С. 139-146.
17. Fischetti M., Tulp J. W. . U.S. power supply is changing significantly // Scientific american. — 2020. — № 1. — С. 32-42.
18. Дарьенков А.Б., Варыгин И.А., Комраков Д.А. Анализ теплового режима двунаправленного ключа трехфазного матричного преобразователя частоты // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. — 2016. — № 3. — С. 36-43.
19. Ершов М.С., Чернев М.Ю. Влияние высших гармоник тока на эффективность частотно-регулируемых электроприводов // Достижения, проблемы и перспективы развития нефтегазовой отрасли материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 60-летию высшего нефтегазового образования в Республике Татарстан. — Альметьевск : Издательство АГНИ, 2016. — С. 126-130.
20. Pochuly F., Haluza M., Fialova S., Dobsakova L., Волков А.В., Парыгин А.Г., Наумов А.В., Вихлянцев А.А., Дружинин А.А. Применение гетерогенных лопастных систем – путь к повышению эффективности центробежных энергетических насосов // Теплоэнергетика. — 2017. — № 11. — С. 13-32.
21. Storrow B. . Massachusetts tops energy efficiency rankings, but other states close In // Scientific american. — 2020. — № 2. — С. 78-86.

22. Борзиков В.Б., Жуков А.О., Козлов В.Л., Никольский Ю.В. . Применение снабберов для обеспечения мер энергоресурсосбережения и энергоэффективности оборудования при ограничении перенапряжений в условиях наличия помеховых воздействий на автономные электроэнергетические комплексы // Новые исследования в разработке техники и технологий. — 2016. — № 1. — С. 77-84.
23. Шустов М.А. Основы силовой электроники. — СПб. : Наука техника, 2017. — 336 с.
24. Третьякова М.Н., Саксонов А.С. Механические характеристики высоковольтного асинхронного электродвигателя теплоэлектроцентрали при частотном регулировании // Молодежь. Наука. Общество.. — Тольятти : Издательство ТГУ, 2019. — С. 65-67.
25. Luong H. C. Yin, J. Transformer-based design techniques for oscillators and frequency dividers. — Seattle : Springer, 2016. — 106 с.
26. Зиядаев М.Е., Авдеев Л.А. Частотно-регулируемый электропривод для вентиляторной нагрузки // Молодой исследователь: вызовы и перспективы. Сборник статей по материалам LCIV международной научно-практической конференции. — М. : Издательство "Интернаука", 2018. — С. 255-260.
27. Бурмистрова А.В., Малыхин А.А. Повышение эффективности водогрейной котельной // Вестник молодежной науки. — 2017. — № 5. — С. 16.
28. Инструкция по расчету экономической эффективности применения частотно-регулируемого электропривода. — М.: АО ВНИИЭ, 1997. — 12 с.
29. ВРД 39-1.10-052–2001. Методические указания по выбору и применению асинхронного частотно-регулируемого привода мощностью до 500 кВт. — М. : ОАО «Газпром», 1999. — 33 с.

30.Иванова В.Р., Киселев И.Н. Частотно-регулируемый электропривод для энергосбережения и оптимизации технологических процессов в электротехнических комплексах // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. — 2019. — № 5. — Казань. Издательство КГЭУ.