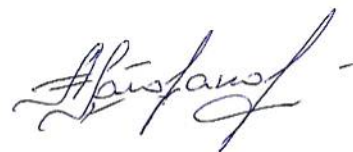


Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Кубанский государственный технологический университет»

На правах рукописи



Голованов Александр Александрович

**ПАРАМЕТРЫ И РЕЖИМЫ РАБОТЫ БЕЗРЕДУКТОРНОГО
ЭЛЕКТРОПРИВОДА СЕПАРАТОРА МОЛОКА**

Специальность

4.3.2 – Электротехнологии, электрооборудование и энергоснабжение
агропромышленного комплекса

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук, доцент,
Кашин Яков Михайлович

Краснодар – 2025

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	4
1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ	10
1.1 Состояние молочно-животноводческого хозяйства в России и технологии сепарирования молока	10
1.2 Анализ существующих сепараторных установок и способов повышения энергоэффективности электроприводов.....	15
1.3 Основные направления разработки и исследования безредукторных электроприводов сепараторов	25
1.4 Выводы по главе и постановка задачи исследования	36
2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ БЕЗРЕДУКТОРНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА СЕПАРАТОРА МОЛОКА	39
2.1 Обоснование и разработка конструктивно-технологической схемы безредукторного электропривода сепаратора молока.....	39
2.2 Математическое моделирование безредукторного электропривода сепаратора молока.....	44
2.3 Реализация математической модели БЭСМ и обоснование параметров и режимов его работы	62
2.4 Энергетические характеристики безредукторного электропривода сепаратора молока.....	73
2.5 Разработка конструкции перспективного сепаратора с безредукторным электроприводом на базе двигателя с двухслойным ротором-барабаном..	81
2.6 Выводы по главе 2	86
3. МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	91
3.1 Программа и методика экспериментальных исследований	91
3.2 Результаты экспериментальных исследований	114
3.3 Выводы по главе 3	124
4. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БЕЗРЕДУКТОРНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА СЕПАРАТОРА МОЛОКА	127
4.1 Расчёт стоимости модернизации сепараторной установки для переработки молока	127
4.2 Выводы по главе 4	140
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	141
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	144
ПРИЛОЖЕНИЯ	156

Перечень принятых сокращений

БЭСМ	– безредукторный электропривод сепаратора молока;
АДКЗ	– асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором;
АДМР	– асинхронный двигатель с массивным ротором;
АПК	– агропромышленный комплекс;
ОЭМПЭ	– обобщенный электромеханический преобразователь энергии
ОДУ	– обыкновенные дифференциальные уравнения;
ПЧ	– преобразователь частоты;
НМ	– натурная модель;
ИПН	– источник постоянного напряжения;
ИПТ	– источник постоянного тока;

ВВЕДЕНИЕ

Сельское хозяйство в Российской Федерации, не смотря на санкционное давление, активно развивается. Растущая экономика сельского хозяйства требует увеличения перерабатывающих мощностей. Техническое переоснащение предприятий, которые перерабатывают сельскохозяйственное сырье в готовую продукцию, является вопросом продовольственной безопасности страны [104].

Одной из важнейших отраслей сельского хозяйства является молочная отрасль. А в рамках молочной отрасли – первичная переработка молочного сырья. В частности, сепарирование молока на составляющие фракции, нормализация, гомогенизация и т.п.

Сегодня только в Краснодарском крае работают 15 крупных молочных предприятий и огромное количество мелких и средних. И их число продолжает расти. На всех подобных предприятиях так или иначе применяется процесс сепарирования молока, реализованный методом центробежного сепарирования на сепараторах-сливкоотделителях.

Так как в настоящее время наблюдается бурное развитие перерабатывающих сельхозпредприятий, проблема дефицита мощностей только обостряется. С учетом роста цен на тарифы энергоресурсов остро встает вопрос об энергосбережении в сельском хозяйстве. Одним из путей энергосбережения является внедрение нового более энергоэффективного оборудования по сравнению с существующим.

В молочной промышленности одним из наиболее энергозатратных процессов является сепарация молока. Сепараторы потребляют достаточно много энергии на единицу продукции ($0,58 - 1,76 \text{ кВтч/ (м}^3\text{/ч)}$) [84], что не только увеличивает себестоимость конечного продукта, но также усугубляет проблемы с электрическими распределительными сетями, описанные ранее. Вопросы энергоэффективности важны для предприятий АПК по причине

опережающего роста производства сельскохозяйственной продукции по отношению к возможностям электроснабжения сельского хозяйства [107].

Таким образом, совершенствование конструкций молочных сепараторов в части энергоэффективности, улучшения массогабаритных характеристик является актуальной научно-технической задачей.

Тема диссертации связана с планом научной работы ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет»: госбюджетная НИР № 121032600097-5 «Создание электромеханических преобразователей энергии совмещенной конструкции», хоздоговорными НИР № 2.45.05.04-19 «Обоснование и разработка двигателя-сепаратора совмещенной конструкции для очистки технологических жидкостей с частотно-управляемым электроприводом», № 2.45.05.05-23 «Разработка безредукторного электропривода сепаратора молока», № 2.45.07.01-25 «Определение КПД сепараторной установки на базе разработанного безредукторного электропривода сепаратора молока с учетом передачи тепла от статора приводного электродвигателя к молоку», заказчик Крестьянское фермерское хозяйство «АЛЕКС».

Степень разработанности темы.

Работы в области улучшения характеристик сепараторных установок, а также смежных вопросов создания высокоскоростного управляемого электропривода, широко ведутся в научных и образовательных организациях: КубГАУ имени И.Т. Трубилина, КубГТУ, Горский ГАУ, Томский ГУ, Великолукская ГСХА, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, СКФУ, Пензенский ГАУ и др. Научные проблемы разработки энергоэффективных сепараторов исследовали многие учёные: С.В. Пахомов, Б. Х. Гайтов, Э.Ю. Икоева, Е.С. Дружинина, Н.И. Присмотров, Е.А. Чеботарев и др.

Несмотря на большое разнообразие конструкций электроприводов сепараторов молока и научных разработок по этой теме на сегодняшний день вопросы теплообмена между барабаном сепаратора и молоком исследованы недостаточно, вопросы отбора тепла потерь в статоре совсем не рассмотрены. В существующем на сегодня научно-методическом аппарате отсутствуют

математические модели, которые бы позволяли оценить процессы теплообмена между статором, ротором и сепарируемой жидкостью. Кроме того, методики расчёта энергетических характеристик и параметров электроприводов сепараторов, позволяющие учесть передачу тепла от конструктивных элементов двигателя электропривода (статора и ротора) молоку, недостаточно проработаны.

Научная проблема заключается в следующем. Существует объективная потребность в создании более энергоэффективной молочной сепараторной установки для АПК. В исследованиях по описанию основных физических процессов в статоре электродвигателя безредукторного привода сепаратора не уделялось большого внимания возможностям использованию тепла для подогрева исходной жидкости.

Научная гипотеза: модернизированный научно-методический аппарат, исследования физических процессов, протекающих в сепараторе, позволит оценить потери в статоре приводного двигателя, рассчитать и создать конструкцию безредукторного электропривода с передачей тепловых потерь от статора электродвигателя к молоку, что позволит повысить энергоэффективность (КПД) сепараторной установки на 3-6%.

Цель работы: обоснование параметров и режимов работы безредукторного электропривода сепаратора молока с передачей части тепловых потерь от электрической машины молоку для повышения энергоэффективности сепараторной установки и улучшения её массогабаритных показателей.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи.

1. Разработать технологическую схему сепарирования молока с безредукторным электроприводом сепаратора и его конструкцию на основе теории обобщённого электромеханического преобразователя энергии (ОЭМПЭ) и теории теплопередачи, обеспечивающие передачу тепла от электрической машины молоку.

2. Модернизировать математическую модель безредукторного электропривода сепаратора молока, введя в неё уравнения, характеризующие процесс передачи тепла от электродвигателя к сепарируемой жидкости.

3. Провести исследование безредукторного электропривода сепаратора молока, используя его математическую модель, реализованную в программном комплексе MATLAB, обосновать параметры и режимы работы безредукторного электропривода сепаратора молока и определить его энергоэффективность.

4. Изготовить экспериментальный образец, провести физический эксперимент и сопоставить его результаты с теоретическими данными.

5. Определить экономическую эффективность внедрения безредукторного электропривода сепаратора молока на предприятиях АПК.

Объект исследования: безредукторный электропривод сепаратора молока.

Предмет исследования: параметры и режимы работы безредукторного электропривода сепаратора молока, энергетические характеристики сепаратора.

Методы исследования базируются на теоретических основах электротехники, законах электромеханики, законах теплопередачи, теории планирования эксперимента.

Научная новизна работы.

1. Математическая модель безредукторного электропривода сепаратора молока, отличающаяся тем, что в неё введены уравнения, описывающие совместно протекающие электромагнитные, электромеханические и тепловые процессы.

2. Обоснованные параметры и режимы работы нового безредукторного электропривода сепаратора молока и его энергоэффективность.

3. Регулировочные и энергетические характеристики безредукторного электропривода сепаратора молока.

Теоретическая и практическая значимость результатов исследования

1. Разработанная и реализованная математическая модель безредукторного электропривода сепаратора молока которая позволяет: получить функциональные связи между динамическими характеристиками и обосновать его параметры и режимы работы, получить регулировочные и энергетические характеристики проектируемых сепараторов, проанализировать тепловые процессы с учетом их взаимовлияния друг на друга и определить возможное количество тепловой энергии для передачи сепарируемой жидкости.

2. Полученные регулировочные и энергетические характеристики безредукторного электропривода сепаратора молока позволяют учесть влияние его активных сопротивлений обмоток, внутренних и внешних факторов на параметры процесса сепарирования.

3. Обоснованные параметры и режимы работы нового безредукторного электропривода сепаратора молока позволили разработать на уровне изобретения безредукторный электропривод сепаратора молока (патент № 2776987) с улучшенными технико-экономическими показателями.

4. Полученные характеристики сепараторной установки позволяют определить ее энергоэффективность и улучшить массогабаритные показатели.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Математическая модель безредукторного электропривода сепаратора молока.

2. Регулировочные и энергетические характеристики безредукторного электропривода сепаратора молока, полученные расчетным путем и экспериментально.

3. Результаты сопоставления теоретических и экспериментальных данных.

4. Обоснованные параметры и режимы работы нового безредукторного электропривода сепаратора молока.

Реализация и внедрение результатов исследования. Результаты исследований внедрены в КФХ «АЛЕКС» (акт производственных испытаний от 30.06.2023 г., акт внедрения от 30.06.2023 г.), результаты научно-исследовательской работы используются в учебном процессе кафедры электротехники и электрических машин Института нефти, газа и энергетики ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический процесс» (акт об использовании в учебном процессе результатов научно-исследовательской работы от 14.04.2025 г.).

Апробация работы. Материалы диссертационной работы были доложены и обсуждены на II Международной научно-практической конференции «Наука и технологии в нефтегазовом деле» (31 января-01 февраля 2020 г.), XIII, XIV, XV Международных научных конференциях «Технические и технологические системы» (г. Краснодар 23-25.11.2022 г., 22-24.11.2023 г., 20-22.11.2024 г), V Международной научно-практической конференции преподавателей, аспирантов и научно-технических работников «Современные электротехнические и информационные комплексы и системы», посвященной 105-летию образования КубГТУ 10-11.11.2023 г. (г. Армавир). Конструкция электропривода центробежного сепаратора отмечена серебряной медалью Международной выставки инноваций и конкурса научных разработок «НИ-ТЕСН» (26-28.04.2022 г.), серебряной медалью Международного Салона изобретений и новых технологий «Новое время» (22-24.09.2022 г.), серебряной медалью 66-й Международной Технической Ярмарки, г. Белград, Сербия (21.05.2024 г.).

1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Состояние молочно-животноводческого хозяйства в России и технологии сепарирования молока

Из доклада Дмитрия Патрушева главы Минсельхоза РФ в ходе XV съезда Национального союза отмечено, что текущее состояние российского животноводства сложно назвать стабильным, тем не менее, наблюдается рост производства молока на 0,5 млн. тонн больше по итогам 2023 года в сравнении с 2022 и составляет 33,5 млн. тонн [76]. Тем не менее индикатор самообеспеченности молочной продукции не достигнут и составляет 85%, при необходимом 90 %.

Производство молока в Российской Федерации в разрезе производителей (мелких, средних и крупных) показано в таблице 1.1, из которой видно, что доля малых фермерских хозяйств (менее 100 голов) составляет 68,9 % при этом доля производства молока – 23,7 %.

Таблица 1.1 - Производство молока в Российской Федерации

Показатель	Менее 100 голов	100-200 голов	200-400 голов	400-600 голов	600-800 голов	800-1000 голов	1000-1600 голов	1600 и более голов
Кол-во ферм, ед.	13417	1838	1888	966	527	301	355	183
Доля ферм, %	68,9	9,4	9,7	5,0	2,7	1,5	1,8	0,9
Ср. надой на 1 корову	3150	3150	3150	4000	4000	6500	6500	6500
Пр-во молока, тыс. тонн	4077	1139	2364	2299	1644	1430	2248	2000
Доля пр-ва молока, %	23,7	6,6	13,7	13,4	9,6	8,3	13,1	11,6

С одной стороны, объём производства молока увеличился на 16 % 2020 году по сравнению с 2010 годом, и значительно возросли надой на 1 корову (+46,8%). Однако, с другой стороны, наблюдается снижение численности

крупного рогатого скота на 7,6 % (Рисунок 1.1 [73]). Причем увеличение производства молока приходит на долю сельскохозяйственных объединений частных фермеров и сельскохозяйственных производителей (+ 33,8%) (Рисунок 1.2 [73]). Хотя в абсолютных единицах прирост молока крестьянских (фермерских) хозяйств (КФХ) составляет всего 0,9 мил. тонн, тем не менее отмечается актуальность производства молока малыми фермами (+ 57,1 %).

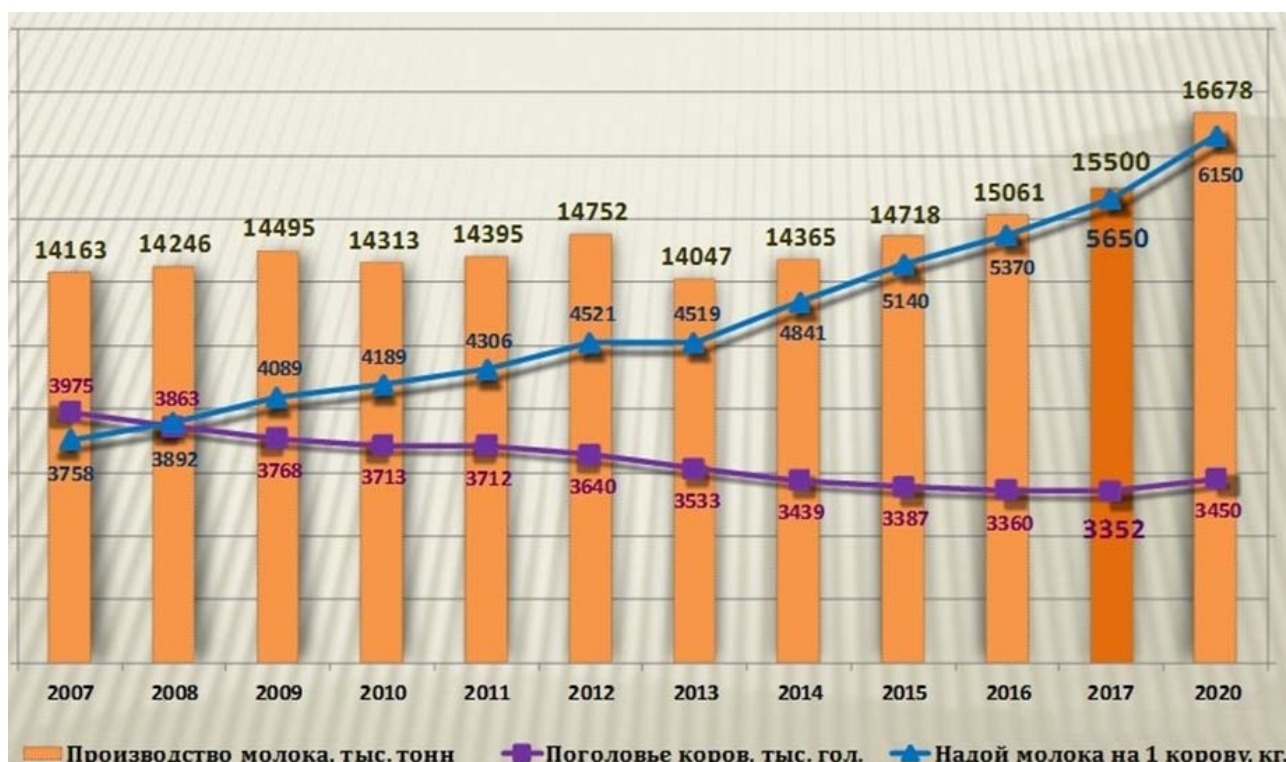


Рисунок 1.1 – Диаграмма основных показателей производства молока в сельскохозяйственных организациях за 2007-2020 годы

В 2021 году произошло небольшое снижение производства молока вследствие последствий коронавирусной пандемии, в 2022 году темпы развития сырьевого сектора молочной отрасли постепенно восстанавливались. Это произошло благодаря благоприятной ценовой ситуации на рынке и восстановлению рационов.

Поголовье коров в хозяйствах всех категорий к началу 2022 года по-прежнему оставалось ниже уровня того же периода 2021 года и составило 7,77 млн. гол. (-1,1%, или -86 тыс. гол.) [72]. Снижение наблюдалось и в сельхозорганизациях – на 0,1% (-4,4 тыс. гол., до 3,22 млн. гол.) (рисунок 1.3).

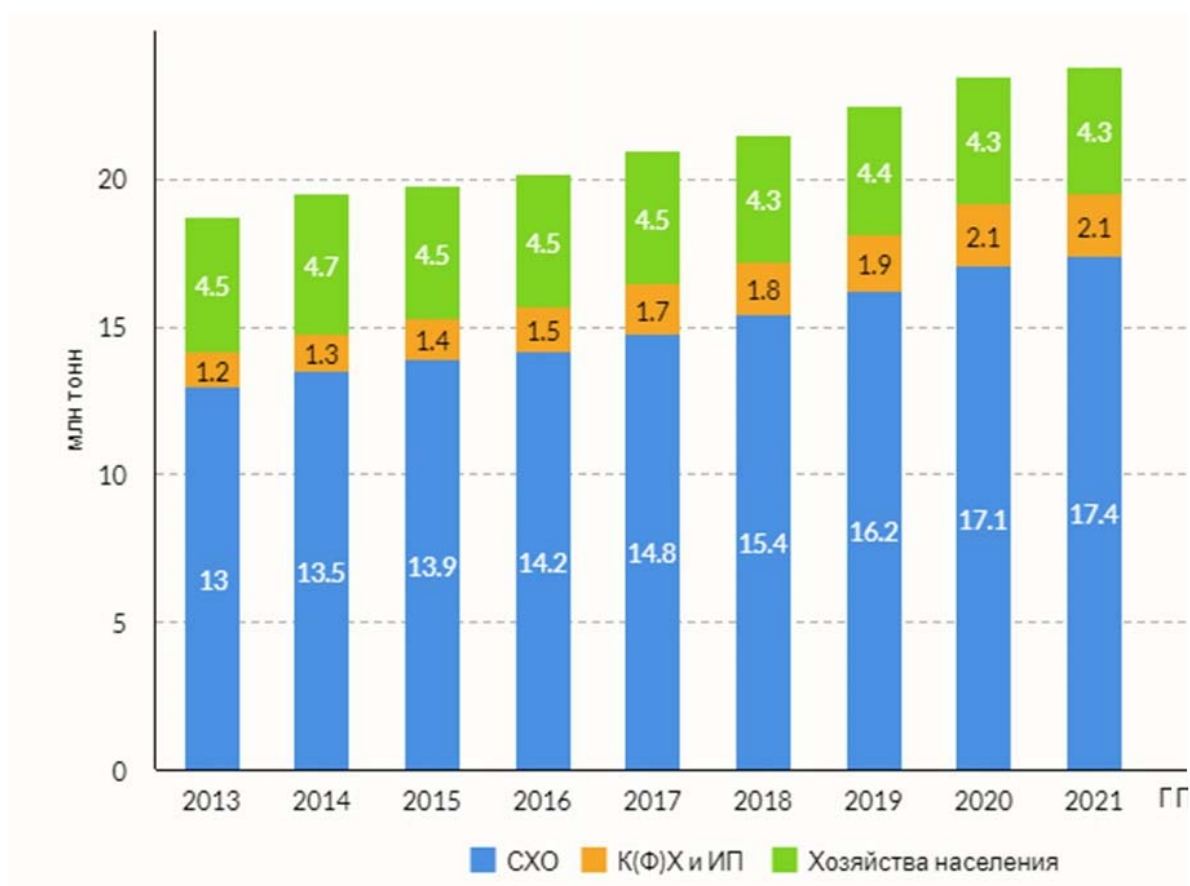


Рисунок 1.2 – График производства товарного молока

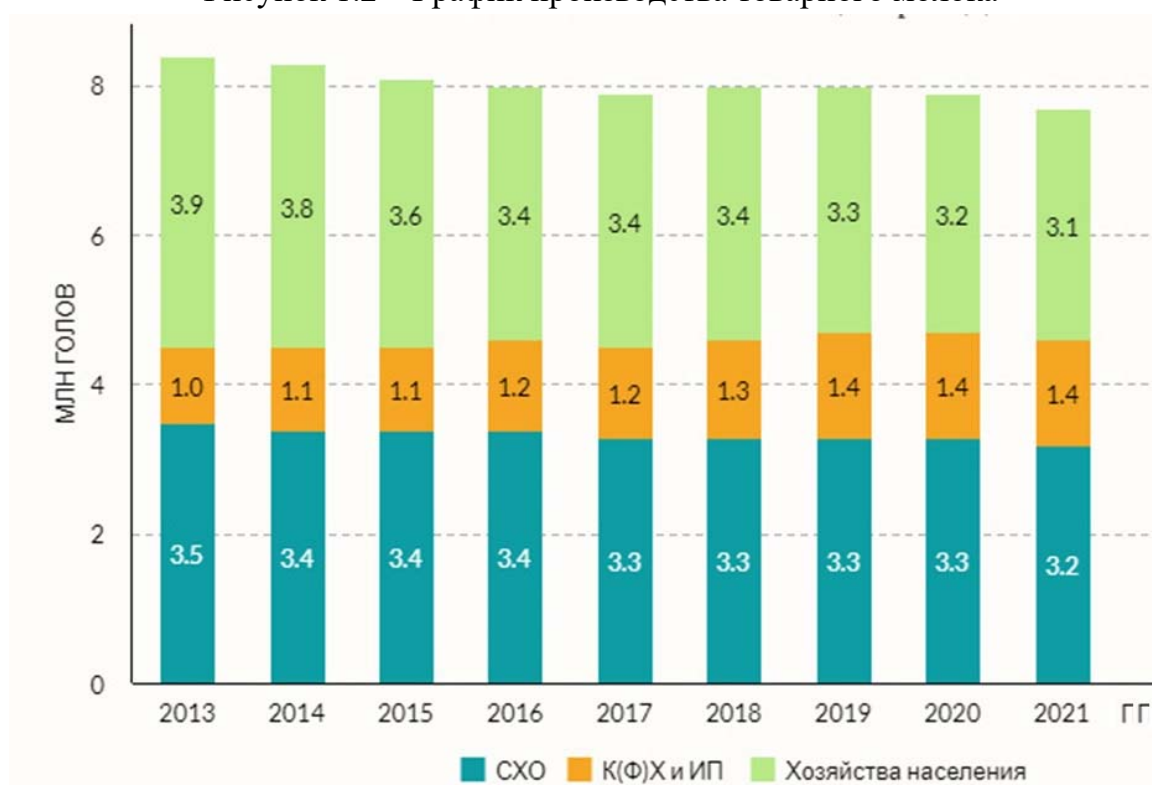


Рисунок 1.3 – График поголовья коров

Растет производство питьевого молока (+3%, до 4,85 млн. т) и «сырных продуктов» (+8%, до 176,3 тыс. т), а производство кисломолочной продукции, особенно из категории современных, – снижается: йогуртов – на 16% (до 585 тыс. т), творога и продуктов на его основе – на 8% (до 579 тыс. т), кефира – на 6% (до 759 тыс. т). График производства сырого молока и кисломолочной продукции изображен рис. 1.4 [72].

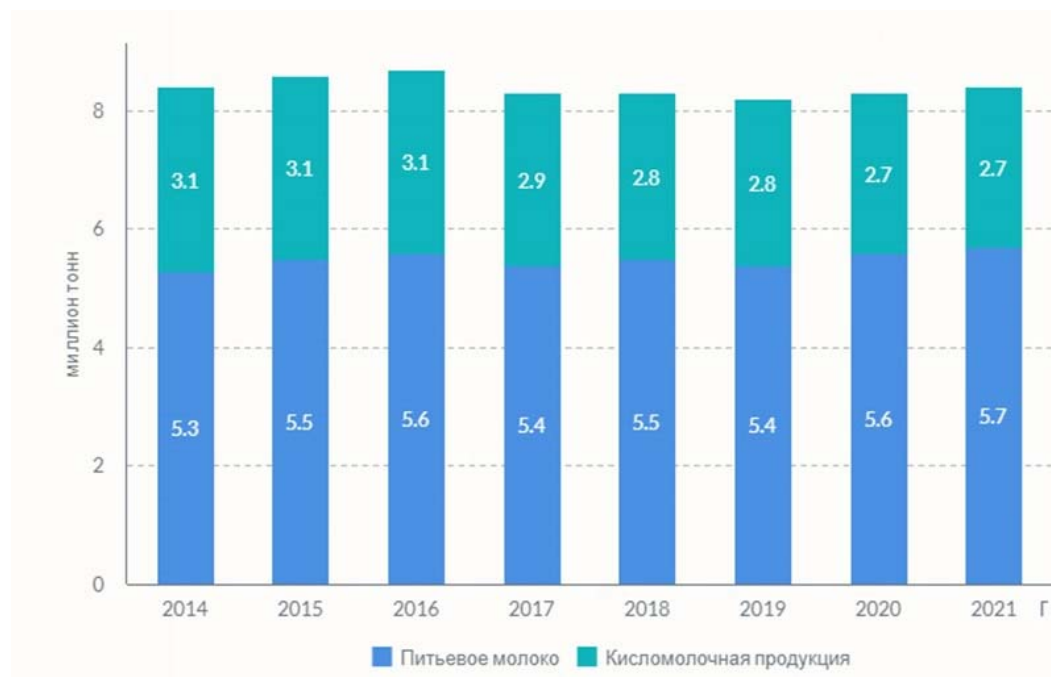


Рисунок 1.4 – График производства сырого молока и кисломолочной продукции

В 2022 году импорт молочной продукции снизился на 10% в сравнении с уровнем того же периода 2021 года. Снижение импортных поставок объяснялось осложнением внешнеполитической ситуации, разрывом логистических цепочек и валютными ограничениями [14]. Тем не менее переориентирования рынка сбыта в другие страны позволяет восстановить импорт молочной продукции, так как в мире наблюдается устойчивый рост потребления молока в первую очередь за счет производства сухого обезжиренного молока на 11% в 2024 году [33].

Краснодарский край является одним из самых густонаселенных регионов РФ. Основу экономического потенциала края составляет

агропромышленный комплекс. Произведенное хозяйствами края сырье перерабатывает 30 крупных и средних предприятий молочной промышленности, а также множество мелких фермерских хозяйств и способны ежегодно производить 2 млн. т молока [78].

В перерабатывающей промышленности края молочная промышленность является одной из лидирующих отраслей, занятых переработкой сельскохозяйственной продукции - в отрасли работает более 10 тыс. человек. Годовой объем товарной продукции превышает 7 млрд. руб.

Выделим особенности деятельности предприятия молочной отрасли: материалоемкость, ограниченный срок реализации продукции, длительность производственного цикла не более 6-8 часов необходимость в дополнительной (резервной) мощности.

Технологический цикл переработки молока на предприятии выглядит следующим образом:

- после приемки молока лаборанты делают анализы с помощью микроскопов, центробежных и других приборов определяют жирность, качество молока и следят, чтобы в нём не было опасных для человека микробов.

- проверенное молоко нормализуют стерилизуют при определённой температуре, за которой следят умные приборы датчиками.

- стерилизованное молоко попадает в следующий цех, где из него делают сливки с помощью сепараторов.

- молоко пропускают через сепаратор, и сливки по трубам перетекают в следующий цех, а обезжиренное молоко, которое называют «обрат» переливают в другие ёмкости, для изготовления творога и сыра

- из сливок в следующем цехе делают масло, для этого есть специальные приспособления, похожие на центрифугу, которая вращается с огромной скоростью и взбивает масло.

- для приготовления кефиров, сметаны, творога, йогуртов необходимо заквасочная, это такое небольшое помещение, где стоят термостаты и в них выращивают специальные грибки.

- часть молока и сливок перегоняют в танки-термосы, в фасовочный цех, где молоко с помощью специальных фасовочных аппаратов взвешивается, разливается по пакетам и тетрапакам, упаковщица раскладывает молоко по ящикам, и по транспортеру ящики с молочной продукцией попадают на склад готовой продукции [45, 116, 118].

При поступлении молока на переработку обязательной технологической операцией являются его оценка качества. После проверки молока на качество, его подогревают. Подогрев молока необходим для эффективной нормализации сырья и его очистки. Оптимальные температурные параметры подогрева молока – $(40 \pm 5) ^\circ\text{C}$. Очистку молока от механических загрязнений проводят либо на сепараторах-молокоочистителях, сепараторах-нормализаторах, совмещающая ее с нормализацией [90].

Таким образом, сегодня имеет место рост производства молока как в малых и средних фермерских хозяйствах, так и в крупных агрокомплексах. Это естественным образом приводит к необходимости увеличивать мощности по переработке. Часть существующего оборудования морально и физически устарело, часть не удовлетворяет современным требованиям энергоэффективности, а также возрастающим объемам переработки.

1.2 Анализ существующих сепараторных установок и способов повышения энергоэффективности электроприводов

Сепарация молока производится центробежными сепараторами, при этом средний расход электроэнергии на процесс сепарации составляет около 0,001 кВт·ч на 1 кг сепарируемого молока [68].

В настоящее время серийно выпускаются промышленностью редукторные (мультипликаторные) сепараторы, технологическая схема сепарирования полидисперсных жидких систем которых показана на рисунке 1.5 [94]. Эта продукция, как правило, для малых фермерских хозяйств – установки

небольшой мощности без автоматической выгрузки [95]. А также сепараторы, кинематическая схема которых включает в себя коническую зубчатую передачу с передаточным числом 1:1. Кроме того, для обеспечения нужной частоты вращения (около 6000 об/мин) в таких установках применяется преобразователь частоты. В разрезе энергоэффективности такая схема похожа на редукторный сепаратор, так как коническая зубчатая передача имеет КПД 0,95–0,97, примерно, как и у редуктора. То есть, если исключить из кинематической схемы зубчатую передачу, энергоэффективность сепаратора заведомо улучшится на 3–5%. В этом смысле представляется более целесообразной кинематическая схема безредукторного сепаратора на основе прямого привода [29], так как исключаются потери в зубчатых передачах.

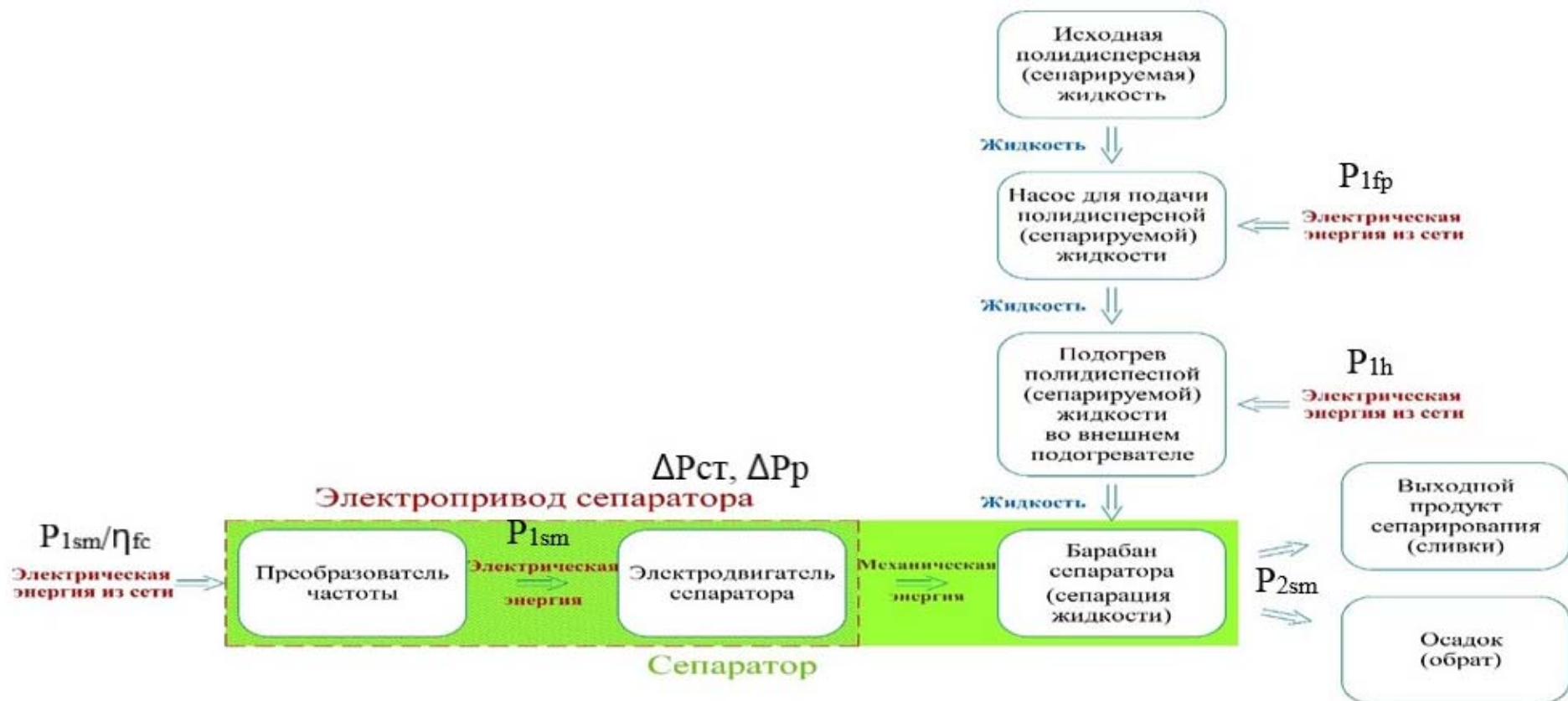
На рис. 1.5 приведена технологическая схема сепарирования молока с сепаратором классической (серийно выпускающейся) конструкции. Подача полидисперсной (сепарируемой) жидкости производится насосом (потребляемая мощность P_{1fp}). Электродвигатель серийного сепаратора вращает через коническую зубчатую передачу вращает барабан при этом потребляется мощность P_{1sm} . В процессе работы электродвигателя выделяются потери мощности в статоре $\Delta P_{ст}$ и роторе ΔP_p , поэтому мощность потока сепарируемой жидкости будет меньше по величине чем потребляется мощность $P_{2sm} = P_{1sm} - \Delta P_{ст} - \Delta P_p$. Для подогрева полидисперсной (сепарируемой) жидкости до необходимой температуры затрачивается мощность внешним подогревателем P_{1h} , для чего преимущественно применяется энергия пара в пластинчатых или трубчатых теплообменниках.

На рис. 1.6 – приведена технологическая схема сепарирования молока с сепаратором на основе прямого привода. В отсутствие конической зубчатой передачи требуемая частота вращения достигается применением частотного преобразователя, при этом потребляемая мощность с учетом его КПД определяется как P_{1sm}/η_{fc} .



P_{1fp} – потребляемая мощность насоса, подающего сепарируемую жидкость в сепаратор; P_{1sm} – потребляемая мощность электродвигателя серийного сепаратора молока с классической конструкции; P_{1h} – потребляемая мощность внешним подогревателем; $P_{2fp.sp}$ – мощность потока сепарируемой жидкости; P_{2sm} – мощность на валу барабана сепаратора; $\Delta P_{ст}$ и $\Delta P_{р}$ – потери мощности в статоре и роторе соответственно.

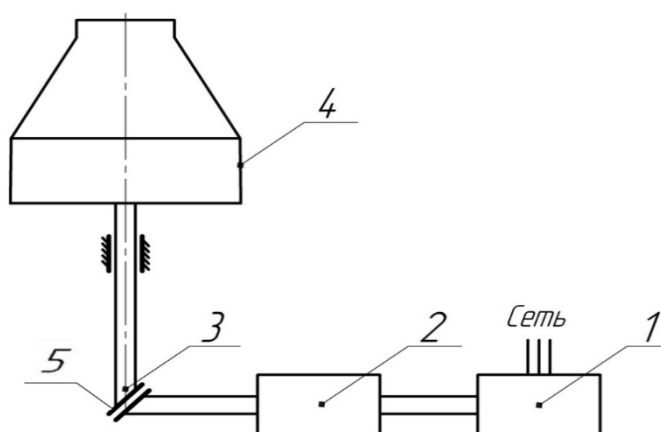
Рисунок 1.5 – Технологическая схема сепарирования полидисперсных жидких систем при использовании серийного сепаратора классической конструкции



P_{1fp} – потребляемая мощность насоса, подающего сепарируемую жидкость в сепаратор; P_{1sm} – потребляемая мощность электродвигателя серийного безредукторного сепаратора молока; P_{1h} – потребляемая мощность внешним подогревателем; η_{fc} – КПД преобразователя частоты; $P_{2fp,sp}$ – мощность потока сепарируемой жидкости; P_{2sm} – мощность на валу барабана сепаратора; $\Delta P_{ст}$ и $\Delta P_{р}$ – потери мощности в статоре и роторе соответственно.

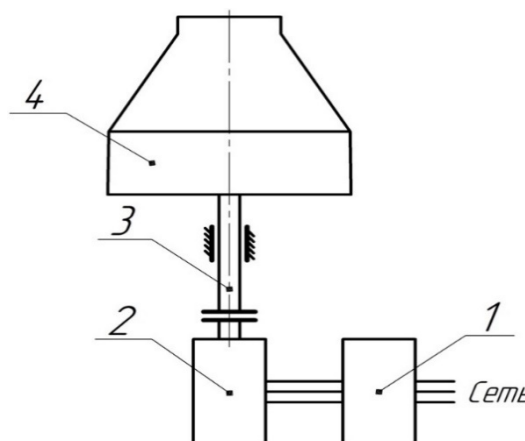
Рисунок 1.6 – Технологическая схема сепарирования полидисперсных жидких систем при использовании серийного безредукторного сепаратора

Сегодня сепараторные установки, построенные по редукторной схеме, практически, не применяются (рисунок 1.7). В основном применяются сепараторные установки, построенные на основе безредукторного привода при этом в кинематической схеме, как правило, присутствует коническая зубчатая передача для изменения оси вращения (рисунок 1.8). Приведение же во вращение барабана сепаратора осуществляется от асинхронного электродвигателя, питание электро-энергией которого осуществляется от преобразователя частоты.



1 – электродвигатель, 2 – муфта, 3 – вал,
4 – барабан, 5 – коническая зубчатая передача

Рисунок 1.7 – Кинематическая схема электропривода сепаратора классической конструкции



1 – преобразователь частоты, 2 – электродвигатель, 3 – вал, 4 – барабан

Рисунок 1.8 – Кинематическая схема безредукторного электропривода сепаратора

Молоко перед сепарированием подогревается до определенной температуры. Процесс этот требует соответствующего расхода энергии, что ухудшает показатели энергоэффективности всей установки в целом. При нагреве молока теплом, выделяющимся в электроприводе сепаратора, потери энергии $\Delta P_{ст}$ и ΔP_p , которые изначально ухудшают показатели энергоэффективности, могут быть использованы для полезной работы, что позволит уменьшить расход энергии для первичного нагрева молока P_{1h} и увеличить суммарный коэффициент полезного действия всей сепараторной установки.

Преобразование энергии осуществляется в следующей последовательности: источник электрической энергии (преобразователь частоты, для схемы на основе прямого привода) – статор асинхронного электродвигателя – ротор асинхронного электродвигателя – муфта – коническая зубчатая передача – вал – барабан сепаратора. Для обеспечения преодоления сопротивления дополнительных механических ступеней в кинематической схеме установленная мощность приводного электродвигателя выбирается большей, что снижает массо-габаритные показатели установки для сепарирования молока. Кроме того, как и у всех электродвигателей, часть потребляемой из сети электрической энергии при протекании электрического тока по обмотке статора электродвигателя теряется в виде тепла. При этом чем больше величина электрического тока, тем больше потери в обмотке статора электродвигателя [114, 115].

Недостатками данных схем сепарирования молока являются:

- высокие затраты энергии на предварительный подогрев исходной сепарируемой жидкости (молока) повышают энергоемкость процесса сепарирования, снижая его энергоэффективность;
- большие потери энергии и сепараторной установки из-за наличия промежуточных кинематических связей (в приводах с конической зубчатой передачей), что приводит к снижению КПД сепараторной установки;
- высокие потери активной мощности в распределительных сетях из-за больших пусковых токов в сепараторной установке.

Таким образом, в связи с увеличением объемов переработки молока требуются большие мощности для электроснабжения соответствующего оборудования, что не всегда выполнимо. Частично эту проблему можно решить применением нового более энергоэффективного оборудования.

Электропривод сепараторов различного типа и назначения имеет общие особенности, состоящие в необходимости передачи большого количества кинетической энергии рабочему органу в период пуска.

Это обусловлено большими значениями момента инерции барабана, при высокой частоте вращения. Поэтому потребная мощность двигателя для обеспечения пуска барабана в приемлемое время (3-10 мин) в 2-3 раза превышает мощность, необходимую для обеспечения процесса сепарирования. Из сказанного следует, что двигатель, выбранный по условию обеспечения надежного пуска сепаратора, в рабочем режиме загружен лишь на 30- 50 % и работает при энергетических показателях, значительно худших, чем номинальные показатели двигателя. Улучшение показателей в рабочем режиме может быть обеспечено облегчением процесса пуска.

Одним из способов облегчения пуска сепаратора является установка муфты скольжения, позволяющей по мере разгона двигателя, обеспечить примерное постоянство пусковой мощности на валу электродвигателя. Вначале двигатель преодолевает трение в муфте при неподвижной ведомой части ее. При некоторой частоте вращения двигателя (частоте подхвата) начинается процесс сцепления ведущей части муфты с ведомой. С этого момента двигатель перестает увеличивать свою частоту вращения и начинает ускорять барабан сепаратора.

Для привода серийных отечественных и большинства зарубежных центрифуг и сепараторов, применяются асинхронные с короткозамкнутым ротором двигателя химовлагостойкого исполнения на 50 - 60 Гц. Это обусловлено высокой надежностью и простотой эксплуатации и ремонта асинхронных двигателей. Для облегчения пускового режима этих электродвигателей применены центробежные фрикционные муфты. Это

усложняет и удорожает конструкцию [46, 66].

В связи с этим имели место попытки применения коллекторных двигателей, позволяющих получить необходимые частоты вращения барабана без применения мультипликаторов или преобразователей частоты.

Но эти установки оказались практически неработоспособными из-за нестабильности частоты вращения барабана, при колебаниях расхода (подкачки) продукта, чрезмерных вибраций, затруднения коммутации на коллекторе (особенно в условиях повышенной влажности и химической агрессивности среды), отличались высокой стоимостью электродвигателя и сложностью эксплуатации [7].

Существуют работы по применению в безредукторных сепараторах двигателя двойного питания в каскаде с асинхронным двигателем. Но такая схема по похожим причинам не нашла широкого применения.

Дальнейшее совершенствование безредукторная конструкция приводов сепараторов получила в СССР. В начале 60-х годов по инициативе Краморова Ю.И. были разработаны и изготовлены первые экспериментальные образцы сепараторов с асинхронным электроприводом повышенной частоты тока [61].

В настоящее время в качестве источника повышенной частоты применяются преобразователи частоты для питания асинхронного двигателя сепаратора. При применении нерегулируемых тиристорных преобразователей для снижения нагрева двигателя при прямом пуске применяют гидродинамическую разгонную муфту. При этом, ввод гидромукты в состав высокоскоростного электропривода сепараторов способствует повышению эффективности сепарирования из-за снижения вибрации барабана [67].

Краморовым Ю. И., и Гайтовым Б. Х. в 70-х годах были разработаны и испытаны первые образцы безредукторных сепараторов типов СПМФ-2000 производительностью 2 м³/ч и ОСП-3М производительностью 3 м³/ч. [19, 61]. Безредукторные сепараторы имеют лучшие массогабаритные показатели, при работе создают меньше шума и вибраций.

В дальнейшем профессором Гайтовым Б.Х. была предложена концепция сепаратора, в которой барабан и ротор асинхронного электродвигателя представляют единое целое, а также была обоснована аксиальная конструкция подобной установки [1, 84]. Были изготовлены несколько экспериментальных образцов, но в дальнейшем работа, как уже было сказано, была прекращена.

Основные проблемы эксплуатации современных сепараторов определяются спецификой их работы и конструкцией. Большинство современных серийно выпускаемых сепараторов имеют кинематическую схему с цилиндрической зубчатой передачей для изменения оси вращения (рис 1.9-1.12) [69], технические характеристики сепараторов приведены в таблице 1.2.

Тенденция современного сепараторостроения, заключающаяся в повышении единичных мощностей и частот вращения, остро ставит вопрос разработки электроприводов мощностью 100 кВт и более [26, 31]. Эти проблемы пытались решить с помощью электропривода с конической передачей и электропривода с шестеренчатой передачей, конструкции с двумя горизонтальными валами и установленными на них демпфирующими устройствами, позволяющими компенсировать неравномерность нагрузки. Однако зубчатая передача имеет высокую виброактивность и шумность и снижает надежность конструкции в целом [42, 84].

Высокий пусковой момент, требующийся для сепараторов, приводит к необходимости завышения номинальной мощности электродвигателя. В результате электродвигатель таких установок работает с низким коэффициентом загрузки (обычно не более 50%). Это приводит к значительному ухудшению энергетических показателей (КПД и коэффициента мощности). Проблема решается установкой гидромукты, но это сразу усложняет и удорожает установку.

Кроме того, высокие пусковые токи создают дополнительную нагрузку на распределительную сеть, питающую сепаратор и, соответственно, потери активной мощности в соответствующих распределительных сетях увеличиваются. Это обстоятельство также ухудшает показатели энергоэффективности

предприятий по переработке молока. Таким образом, нужно по возможности снижать пусковые токи при сохранении пускового момента сепаратора [32].



Рисунок 1.9 - Сепаратор КМА GmbH для молочной промышленности (внешний вид)



Рисунок 1.10 -Сепаратор сливоотделитель Alfa Laval HMRPX 518-74 (внешний вид)



Рисунок 1.11 – Сепаратор-сливкоотделитель Ж5-ОСЦП-1С (внешний вид)



Рисунок 1.12 – Сепаратор-молокоочиститель Ж5-Плава-ОО-30 (внешний вид)

Таблица 1.2 – Технические характеристики сепараторов

Тип сепаратора	Ж5-ОСЦ П-1С	Ж5-Плава -ОО-30	Alfa Lava 1 HMRP4	KMA G mbH
Производительность, $\text{дм}^3/\text{ч}$: в режиме сливкоотделения в режиме очистки молока.	1000 1500	- 30000	- 20000	- 25000
Частота вращения барабана, об/мин	8000	4440±120	-	-
Время набора барабаном рабочего числа оборотов, мин.	5	12..15	-	-
Объем шламowego пространства, л.	0.4	9	-	-
Давление обезжиренного молока на выходе, МПа ($\text{кг}/\text{см}^2$)	0,18-0,28 (1,8-2,8)	не более 0,29 (3,0)	-	-
Мощность электродвигателя, кВт	2,2	18,5	22	14

Можно констатировать факт, что повышение энергоэффективности сепараторов производится следующими методами:

- совершенствование кинематических схем сепараторов, где наиболее эффективными показали себя безредукторные электроприводы [42, 46, 84].

- совершенствование систем управления электроприводом сепараторов [89, 100, 108], в том числе с применением искусственного интеллекта [110, 117].

- использование тепла электрических потерь, выделяемого в роторе-барабане сепаратора [84].

Из проанализированных источников не выявлены исследования по повышению энергоэффективности электроприводов сепараторов путем передачи тепла от статора электродвигателя молоку.

1.3 Основные направления разработки и исследования безредукторных электроприводов сепараторов

Анализ работ существующих разработок в области сепараторостроения показывает, что в большинстве своем они посвящены либо

совершенствованию конструкций существующих сепараторных установок и систем управления ими, либо совершенствованию технологии переработки молока.

Одним из направлений совершенствования конструкций установок центробежного сепарирования в этих работах предложено создание и исследование конструкций безредукторных сепараторов, которые имеет определенные преимущества перед классическими редукторными.

На данный момент есть несколько разработанных конструкций таких установок. Одним из первых сепаратор подобной конструкции предложил Б.Х. Гайтов в 1983 г. [1]. Работы в этом направлении по разработке, исследованию и внедрению таких сепараторов успешно велись совместно с шведской фирмой Alfa Laval – признанным в мире производителем молочных сепараторов. Результаты были очень обнадеживающими, но последовавший общественно-политический кризис в нашей стране в конце 1980-х – начале 1990-х годов прервал работы в этом направлении.

Конструкция [1], предложенная Б.Х. Гайтовым, предполагает использование тепла электрических потерь ротора для подогрева сепарируемого молока непосредственно в барабане, что должно повысить энергетические показатели всей установки. Однако к этим конструкциям возникает ряд вопросов: недостаточно исследованы вопросы теплообмена между барабаном сепаратора и молоком, не рассмотрены вопросы отбора тепла потерь в статоре. В предложенной конструкции используется АД с массивным ротором, у которого энергетические показатели (КПД порядка 0,6 и коэффициент мощности $\cos \varphi$ – порядка 0,5 [63], как известно, намного хуже, чем у АД с короткозамкнутым ротором КПД 0,75-0,9 и коэффициент мощности 0,7-0,8 [57].

Эти вопросы практически не были исследованы в силу того, что как указано выше, работы были прекращены, несмотря на перспективность промежуточных результатов [84]. На сегодняшний день установки центробежного сепарирования, серийно выпускаемые промышленностью – это центробежные сепараторы с редуктором-мультипликатором (наиболее востребованный тип в

небольших фермерских хозяйствах в силу относительно низкой стоимости), а также с цилиндрической зубчатой передачей с асинхронным двигателем с частотным управлением, так как процесс сепарирования требует повышенной частоты вращения барабана [95]. Сепараторные установки с ручной выгрузкой, как правило, редукторные, с автоматической выгрузкой, как правило, с частотным управлением. Подобные установки имеют ряд недостатков, основные из которых: низкие энергетические показатели [84].

В настоящее время также применяются сепараторы с безредукторным электроприводом с асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором (АДКЗ) повышенной частоты с прямой передачей вращающего момента от вала двигателя к барабану сепаратора без зубчатой передачи, питаемым от регулируемого (или нерегулируемого) преобразователя частоты. Однако это техническое решение является полумерой, так как не в полной степени использует возможности электропривода, имея ввиду свойство асинхронного двигателя (АД) конструктивно сочетаться с рабочей машиной в едином корпусе, что предельно упрощает кинематическую схему электропривода, удешевляет сепаратор в целом и улучшает его пусковые и рабочие характеристики [84].

В этой работе Пахомовым С.В. предложено также использовать тепло потерь массивного ротора для дополнительного подогрева молока в барабане сепаратора, однако использование потерь тепла в статоре в его работах не рассматривалось. При оценке дополнительного подогрева молока в роторе-барабане в работе Пахомова С.В. учитывалось только стационарное положение жидкости в барабане сепаратора без учета скорости ее прохождения по элементам конструкции барабана сепаратора. В указанной работе не учтено движение жидкости, проходящей через барабан сепаратора. В работе автора потери в барабане сепаратора (электрические и в стали) полностью отнесены к полезной (греющей) мощности, что является не совсем корректным. Точной оценки энергетических характеристик предложенной конструкции (КПД, $\cos\varphi$) Пахомовым С.В. также проведено не было.

В работе [46] показана актуальность дальнейшего развития безредукторных сепараторов повышенной частоты. Обоснованы основные параметров системы «статический ферромагнитный преобразователь частоты встроенный - асинхронный двигатель», приведены приводные характеристики безредукторного электропривода сепаратора. Однако вопросам энергоэффективности сепараторов в этой работе внимание не уделено.

Конструкции сепараторов, в которых барабан сепаратора является ротором асинхронного электродвигателя рассмотрена в работе [84] (рис 1.13). Аксиальная конструкция, при очевидных достоинствах (высокий пусковой момент, большая производительность) имеет неудовлетворительные энергетические характеристики.

Асинхронные двигатели с массивным ротором априорно имеют низкий КПД – порядка 0,6 и коэффициент мощности порядка 0,5 [63], чем двигатели с короткозамкнутым ротором КПД 0,75-0,9 и коэффициент мощности 0,7-0,8 [57]. Возможно, в 80-х годах прошлого века это было не актуально. Упор делался на технологичность и массогабаритные параметры. В этой работе также для уменьшения колебаний вала и уменьшения воздушного зазора предложена конструкция самоцентрирующегося сепаратора со сферическим воздушным зазором. Однако такая конструкция представляется технологически сложной в изготовлении.

В работе [84] выведен некоторый интегральный энергетический коэффициент подобных установок, но никаких практических оценок энергоэффективности (КПД, коэффициента мощности) в работе сделано не было. В настоящее время установка с такими энергетическими характеристиками (КПД порядка 0,6 cosφ порядка 0,5) не будет востребована на рынке. Кроме того, аксиальная конструкция приводит к необходимости большего воздушного зазора. Так как вал закреплен только с одной стороны, люфт подшипников может привести к соприкосновениям магнитопроводов статора и ротора [111, 119]. Для компенсации этого необходимо увеличивать воздушный зазор либо усложнять конструкцию. Увеличение воздушного зазора приводит к увеличению тока

намагничивания, и как следствие, увеличению потерь в меди статора, а также к снижению коэффициента мощности.

Кроме того, подогрев молока непосредственно в барабане сепаратора за счет тепловых потерь в роторе приводит к невозможности точно регулировать температуру сепарируемого молока, что, по мнению технологов молочной промышленности приводит к снижению качества сепарирования молока.

Потери мощности в электродвигателе рассчитываются по общеизвестной формуле:

$$\Delta P = \Delta P_{\text{ст}} + \Delta P_{\text{р}} = \Delta P_{\text{ст1}} + \Delta P_{\text{м1}} + \Delta P_{\text{ст2}} + \Delta P_{\text{м2}} + \Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{доб}}, \quad (1.1)$$

где: $\Delta P_{\text{ст}}$ и $\Delta P_{\text{р}}$ – потери мощности в статоре и роторе соответственно,

$\Delta P_{\text{ст1}}$ и $\Delta P_{\text{ст2}}$ – потери мощности в магнитопроводах статора и ротора соответственно,

$\Delta P_{\text{м1}}$ и $\Delta P_{\text{м2}}$ – потери мощности в обмотках статора и ротора соответственно,

$\Delta P_{\text{мех}}$ – механические потери,

$\Delta P_{\text{доб}}$ – сумма добавочных потерь.

Потери в статоре электродвигателя с короткозамкнутым ротором значительно превышают потери в роторе. Так, например, составляющие потерь в двигателе АИР100S2 составляют : электрические потери в статорной обмотке – 255 Вт (6,37 % от $P_{\text{н}}$), в магнитопроводах статора и ротора – 155 Вт (3,87 % от $P_{\text{н}}$), механические – 75 Вт (1,87 % от $P_{\text{н}}$), электрические в роторной обмотке - 135 Вт (3,37 % от $P_{\text{н}}$) и добавочные - 23 (0,57 % от $P_{\text{н}}$) [13, 57]. Таким образом суммарные потери в роторной и статорной обмотке составляют 410 Вт (10,25 % от $P_{\text{н}}$), мощность которых потенциально возможно использовать на нагрев молока. В случае использования электродвигателя с массивным ротором, потери в роторе могут быть выше на 10-20 % от потребляемой мощности. Поэтому представляется перспективным использование потерь в статоре для улучшения энергоэффективности сепараторной установки как для одного, так и для другого типа электродвигателей.

Однако использовать все тепловые потери в статоре (10-12%) невозможно, так как часть тепла неизбежно будет передаваться на корпус сепаратора, поэтому можно ориентироваться на использование от 3 до 6 % этих тепловых потерь. С другой стороны, подогреваемое сепарируемое молоко является хладагентом для электродвигателя, так как при прохождении через систему охлаждения снижает его температуру. Следовательно, возможно использовать в АДКЗ витки обмотки с меньшим сечением и улучшить массогабаритные показатели.

Одним из основных показателей эффективности использования электроустановок (сепараторной установки) является удельная материалоемкость M_c , которая определяется по известной формуле

$$M_c = m_c / P_y \quad (1.2)$$

где: m_c – масса сепараторной установки,

P_y – мощность, потребляемая сепараторной установкой.

Таким образом оценить улучшение массо-габаритных показателей возможно сравнительным расчетом удельной материалоемкости сепараторных установок. Согласно формуле (1.2) при снижении массы установки пропорционально будет уменьшаться удельная материалоемкость. При этом для оценки энергоэффективности электроустановки (сепараторной установки) необходимо исследовать изменение КПД и коэффициента мощности.

В рассмотренных работах [46, 84, 112] упор делался на снятие ограничения производительности сепараторов, пусковых токов и улучшения массогабаритных и виброшумовых характеристик зачастую за счет сознательного снижения энергоэффективности, однако энергетические характеристики в этих работах практически не исследовались. Отсюда можно сделать вывод, что перспективным направлением является создание электропривода для сепараторной установки, который бы объединял в себе положительные качества серийных электроприводов с АДКЗ (лучшие энергетические характеристики) и аксиальных электроприводов с АДМР (большой пусковой момент, большая производительность). При этом сепараторные установки с такими

электроприводами были бы лишены слабых сторон (низкие энергетические характеристики, высокие пусковые токи) известных серийных и разрабатываемых ранее другими исследователями сепараторных установок [25, 28].

Для малых и средних фермерских хозяйств оптимальным является сепаратор производительностью 3 дм³/ч. На такие сепараторы приходится большая часть реализуемых промышленностью сепараторов для фермерских хозяйств. Поэтому в работе рассчитаны параметры электроприводов сепараторов именно такой производительности, которые приведены в приложениях А, Б.

Для обоснования параметров исследуемого и разрабатываемого безредукторного электропривода сепаратора за основу взяты параметры (производительность сепаратора и мощность электропривода) серийного сепаратора Г9-ОСП-3 производства Махачкалинского завода сепараторов (рисунок 1.13).

Сепаратор-сливкоотделитель марки Г9-ОСП-3 с ручной периодической выгрузкой осадка предназначен для непрерывного разделения молока на сливки и обезжиренное молоко (обрат) с одновременной очисткой их от механических примесей и молочной слизи, а также для нормализации молока [69].

Технические характеристики сепаратора марки Г9-ОСП-3 представлены в таблице 1.3 [93].

Мощность электродвигателя, необходимая для данного сепаратора 4 и 7,5 кВт, поэтому мощность разрабатываемого безредукторного электропривода сепаратора также рассчитывается на эти значения.

Характеристики электропривода зависят от параметров электродвигателя, в большей степени – от величины активного сопротивления ротора. Поэтому для изготовления и исследования натурального образца безредукторного электропривода сепаратора мощностью 4 кВт необходимо рассчитать его параметры (геометрические размеры, обмоточные данные, электромагнитные параметры, параметры рабочего режима и энергетические параметры) и исследовать влияние этих параметров на работу электропривода в различных режимах его работы.

Как было показано ранее, неизбежно возникающие при работе электродвигателя тепловые потери в статоре и роторе составляют от 10 до 15 % от потребляемой электродвигателем мощности [57]. Таким образом, можно предположить, что подогрев молока путем отбора тепла от статора позволит повысить общий КПД сепараторной установки на 3-5 %, что в свою очередь позволит снизить потребление электроэнергии на одну сепараторную установку производительностью 3 т/час на 10000-15 000 кВт/час в год.



Рисунок 1.13 – Сепаратор Г9-ОСП-3 (внешний вид)



Рисунок 1.14– Сепаратор ОСЦП-3 (внешний вид)

Таблица 1.3 – Технические характеристики сепараторов

Тип сепаратора	Г9-ОСП-3	ОСЦП-3
Производительность, дм ³ /ч	3000	3000
Частота вращения барабана, об/мин	6500±120	6500±120
Время набора барабаном раб. числа оборотов, мин.	3...5	5...8
Давление на выходе обрата, МПа (кг/см ²)	до 0,25 (2,5)	0,4 (4,0)
Продолжительность непрерывной работы, ч.	2	2
Масса, кг.	395	761
Мощность электродвигателя, кВт	4	7,5

Вопросами разработки и исследования безредукторных электроприводов сепараторов занимались в Кубанском государственном технологическом университете [1, 2, 3, 4, 20, 82]. Например, сепаратор [21] (рис. 1.15) содержит корпус 1, смонтированный в нем аксиальный статор 2 электродвигателя с обмоткой 3, вокруг лобовых частей которой установлены трубки 4, ведущие от емкости 11, замоноличенные компаундом 5 и барабан 6, являющийся одновременно ротором электродвигателя, жестко связанный с валом 7. Вал установлен в двух подшипниковых опорах – горловой 8 и упорной 9. Выход трубок соединен с внутренней частью сепаратора трубопроводом 10 [21].

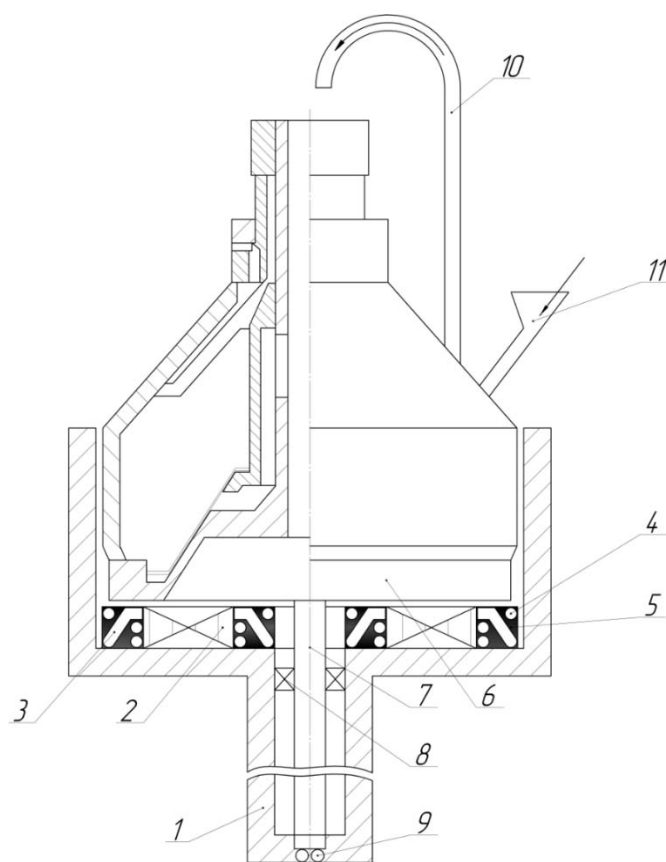


Рисунок 1.15 – Конструкция сепаратора с отбором тепла от обмотки статора

Статор электродвигателя в сепараторе для молока расположен под нижней торцевой поверхностью барабана сепаратора. Это позволяет частично использовать выделяемое в роторе тепло для подогрева сепарируемой жидкости, подогрев которой происходит в нижней части сепаратора, расположенной над торцевой поверхностью аксиального статора электродвигателя за счет нагрева части барабана вихревыми токами. Однако сепарируемый продукт находится

в нижней части барабана сравнительно непродолжительное время. В связи с этим, нагрев сепарируемого продукта за счет его соприкосновения с нагреваемой торцовой поверхностью барабана сепаратора происходит сравнительно непродолжительное время.

Основной отбор тепла для предварительного подогрева сепарируемого продукта осуществляется прокачкой его через трубки 4, расположенные в статоре. Затем этот продукт подается в штатный подогреватель. Предварительный подогрев сепарируемого продукта за счет тепла потерь статора в таком сепараторе снижает расход энергии в подогревателе.

Кроме того, асинхронный электропривод с массивным ротором имеет значительно большие на 30-40% установившиеся токи по сравнению с электроприводом короткозамкнутым ротором за счет низкого КПД и высокого тока намагничивания [63]. Поэтому вышеупомянутые исследователи пытались снизить пусковые токи, снять проблему ограничения производительности и улучшить виброшумовые характеристики электроприводов сепараторов за счет заведомого ухудшения их энергетических характеристик.

Следует отметить, что в приведенных выше сепараторах процесс сепарирования молока осуществляется в стандартных барабанах, при стандартной скорости вращения данного типа барабана, при определенной температуре сепарирования. При этом технология сепарирования молока предусматривает разделение его на составляющие под воздействием центробежных сил в барабане. Легкая часть, обладающая меньшей плотностью, отходит ближе к оси вращения барабана сепаратора, а более тяжелая часть, обладающая большей плотностью, движется к внешней границе корпуса барабана сепаратора. Скорость разделения согласно закону Стокса [102]:

$$v(t) = \frac{2}{9} \cdot \left(\frac{2\pi}{60}\right)^2 \cdot R \cdot n^2(t) \cdot r^2 \cdot \frac{\rho_{\text{п}} - \rho_{\text{ж}}}{\mu}, \quad (1.2)$$

где $v(t)$ – скорость выделения жировых шариков, R – средний радиус рабочей части тарелки сепаратора, n – частота вращения барабана сепаратора, r –

радиус жирового шарика, $\rho_{\text{п}}$ – плотность плазмы, $\rho_{\text{ж}}$ – плотность жира, μ – вязкость сепарируемого продукта.

Как видно из (1.2) изменение схемных кинематических и технологических решений в сепараторных установках (рис. 1.5-1.9, 1.13-1.15) не приводит к изменению стандартной скорости вращения барабана и температурного режима в барабане сепаратора при сепарировании молока.

Анализ открытых источников показывает, что разработок конструкций сепараторов молока, основанных на новых кинематических схемах в современной России нет. Анализ зарубежных источников показывает то же самое, но, возможно какие-то разработки являются экономической тайной и не публикуются.

Также анализ показывает, что исследования в области энергоэффективности сепараторов ведутся в основном в направлении более оптимального частотного управления электроприводом, поисками оптимальных параметров работы электроприводов и т.п.

В рассмотренных работах [46,84] использован научно-методический аппарат, позволяющий рассчитать тепло от потерь в роторе-барабане сепаратора. Однако он не позволяет учесть использование тепла потерь в статоре электродвигателя сепаратора.

В существующем на сегодня научно-методическом аппарате отсутствуют математические модели, которые бы позволяли оценить процессы теплообмена между статором, ротором и сепарируемой жидкостью. Кроме того, методики расчёта энергетических характеристик и параметров электроприводов сепараторов, позволяющие учесть передачу тепла от конструктивных элементов двигателя электропривода молоку, недостаточно проработаны.

На сегодняшний день имеются разработки, посредством которых можно использовать тепловые потери [2, 79, 81, 82,], выделяемые статором, однако исследований энергоэффективности этих установок нет. Научно-методический аппарат для определения энергоэффективности таких установок не разработан.

Таким образом, существующий на сегодняшний день научно-методический аппарат для расчета и исследования безредукторных электроприводов сепаратора нуждается в усовершенствовании, а именно: необходима модернизация математических моделей безредукторного электропривода сепаратора молока, позволяющая исследовать и рассчитывать передачу тепла сепарируемой жидкости (молоку); методики определения КПД сепараторной установки, учитывающая передачу энергии тепловых потерь в статоре и роторе сепарируемой жидкости (молоку).

1.4 Выводы по главе и постановка задачи исследования

Проанализировав существующие установки сепарирования молока, можно сделать следующие выводы:

1. В связи с увеличением производства молока требуется увеличение и перерабатывающих мощностей. Возрастающие мощности переработки молока на местах создают дополнительные нагрузки на и так перегруженные сельские распределительные электросети. Кроме того, постоянно повышающиеся тарифы на электроэнергию повышают себестоимость переработки молока, что приводит к необходимости разработки новой более энергоэффективной технологической базы для переработки молока.

2. Серийные сепараторы с безредукторным электроприводом и частотным управлением из-за конической зубчатой передачи в кинематической схеме имеют сниженный КПД электропривода по сравнению с сепараторами без конической зубчатой передачи. Этих недостатков лишена конструкция сепаратора, в которой барабан сепаратора является одновременно ротором электродвигателя.

3. Сепараторы на основе аксиальной конструкции с массивным ротором имеют заведомо более низкие (КПД – порядка 0,6 и коэффициент мощности порядка 0,5), чем у конструкций, серийно выпускающихся с АДКЗ (КПД 0,75-

0,9 и коэффициент мощности 0,7-0,8), энергетические показатели в установившихся режимах при лучших пусковых характеристиках.

4. Создание электропривода для сепараторной установки, который бы объединял в себе положительные качества серийных электроприводов с АДКЗ (лучшие энергетические характеристики) и аксиальных электроприводов с АДМР (большой пусковой момент, большая производительность) позволит повысить энергетические характеристики, снизить пусковые токи в сравнении с известными серийными и разрабатываемыми ранее другими исследователями сепараторными установками.

5. Существующий на сегодняшний день научно-методический аппарат для расчета и исследования безредукторных электроприводов сепаратора нуждается в усовершенствовании, а именно: необходима модернизация математических моделей безредукторного электропривода сепаратора молока, позволяющая исследовать и рассчитывать передачу тепла сепарируемой жидкости (молоку); методику проектирования электропривода сепаратора при охлаждении электрической машины молоком; методики определения энергетических характеристик сепараторной установки, учитывающей передачу энергии тепловых потерь в статоре и роторе сепарируемой жидкости (молоку).

6. Для малых и средних фермерских хозяйств оптимальным является сепаратор производительностью 3 т/ч. На такие сепараторы приходится большая часть реализуемых промышленностью сепараторов для фермерских хозяйств. Поэтому в работе следует опираться на параметры электроприводов сепараторов именно такой производительности.

Научная проблема заключается в следующем. Существует объективная потребность в создании более энергоэффективной молочной сепараторной установки для АПК. В исследованиях по описанию основных физических процессов в статоре электродвигателя безредукторного привода сепаратора не уделялось большого внимания возможностям использованию тепла для подогрева исходной жидкости.

Научная гипотеза: модернизированный научно-методический аппарат, исследования физических процессов, протекающих в сепараторе, позволит оценить потери в статоре приводного двигателя, рассчитать и создать конструкцию безредукторного электропривода с передачей тепловых потерь от статора электродвигателя к молоку, что позволит повысить энергоэффективность (КПД) сепараторной установки на 3-6%.

Цель работы: обоснование параметров и режимов работы безредукторного электропривода сепаратора молока с передачей части тепловых потерь от электрической машины молоку, для повышения энергоэффективности сепараторной установки и улучшения ее массогабаритных показателей.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи.

1. Разработать технологическую схему сепарирования молока с безредукторным электроприводом сепаратора и его конструкцию на основе теории обобщённого электромеханического преобразователя энергии (ОЭМПЭ) и теории теплопередачи, обеспечивающие передачу тепла от электрической машины молоку.

2. Модернизировать математическую модель безредукторного электропривода сепаратора молока, введя в неё уравнения, характеризующие процесс передачи тепла от электродвигателя к сепарируемой жидкости.

3. Провести исследование безредукторного электропривода сепаратора молока, используя его математическую модель, реализованную в программном комплексе MATLAB, обосновать параметры и режимы работы безредукторного электропривода сепаратора молока и определить его энергоэффективность.

4. Изготовить экспериментальный образец, провести физический эксперимент и сопоставить его результаты с теоретическими данными.

5. Определить экономическую эффективность внедрения безредукторного электропривода сепаратора молока на предприятиях АПК.

2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ БЕЗРЕДУКТОРНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА СЕПАРАТОРА МОЛОКА

2.1 Обоснование и разработка конструктивно-технологической схемы безредукторного электропривода сепаратора молока

Технологический процесс в сепараторной установке предусматривает предварительный подогрев продукта сепарирования до определённой температуры во внешнем подогревателе от исходной температуры (5-7 °С) до температуры сепарирования (в зависимости от типоразмера сепаратора). Предварительно подогретое молоко поступает в барабан сепаратора, где происходит процесс сепарирования (разделение исходного продукта сепарирования на сливки и обрат) [28].

Для повышения энергоэффективности процесса сепарирования молока исследователями Гайтов Б.Х., Нестеров А.В., Андреев Ю.П., Карамзин В.А. и др. [1, 2, 3, 4, 20, 82] предлагалась использовать преобразование энергии в следующей последовательности: источник электрической энергии - преобразователь частоты – статор асинхронного электродвигателя – ротор – барабан сепаратора. Исключение редуктора из кинематической схемы (рис. 1.7, 1.8), позволяет повысить КПД электропривода сепаратора молока.

Предлагаемая технологическая схема сепарирования молока на базе БЭСМ изображена на рис. 2.1 и отличается от ранее существующих тем, что сепарируемая жидкость (молоко) в соответствии с этой схемой первоначально подается в трубки насосом потребляя мощность $P_{лфр}$, опоясывающие обмотку и магнитопровод статора электродвигателя, затем подается во внешний подогреватель определенной мощности P_{lh} , после чего жидкость подается в ротор-барабан. Протекая по трубкам, опоясывающие обмотку и магнитопровод статора электродвигателя, сепарируемая жидкость нагревается за счет тепловых потерь в обмотке и магнитопроводе статора $\Delta P_{ст}$, одновременно охлаждая элементы обмотки и магнитопровода статора, тем самым повышая удельную мощность машины [25].



P_{1fp} – потребляемая мощность насоса, подающего сепарируемую жидкость в сепаратор; P_{1sm} – потребляемая мощность электродвигателя БЭСМ, приводящего во вращение барабан сепаратора молока с безредукторным электроприводом; P_{1h} – потребляемая мощность внешним подогревателем; η_{fc} – КПД преобразователя частоты; $P_{2fp.sp}$ – мощность потока сепарируемой жидкости; P_{2sm} – мощность на валу барабана сепаратора; $\Delta P_{ст}$ и ΔP_p – потери мощности в статоре и роторе соответственно.

Рисунок 2.1 – Технологическая схема сепарирования молока на базе БЭСМ.

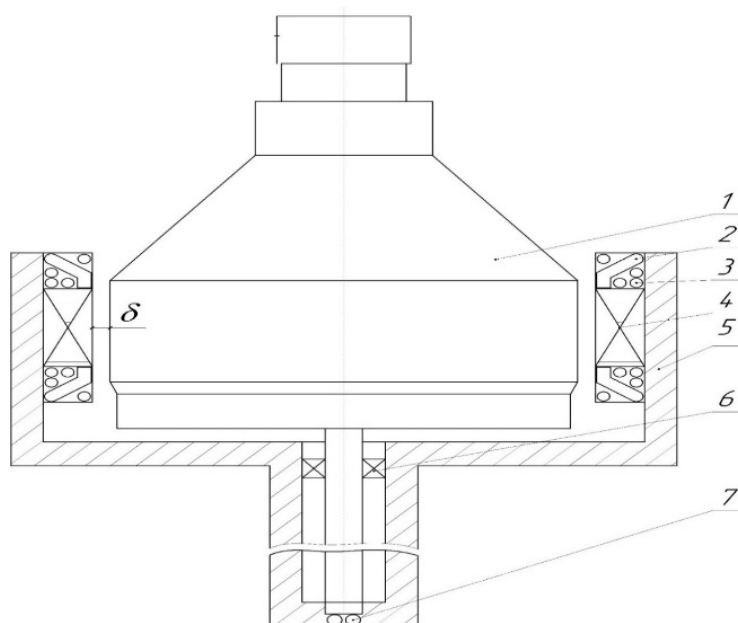
Так как сепарируемая жидкость частично подогрелась в статоре электродвигателя, то подогрев во внешнем подогревателе будет осуществляться на меньшую разность температур, что позволит сэкономить энергию на подогрев жидкости. «Добор» необходимого подогрева сепарируемой жидкости (молока) производится и в роторе-барабане за счет потерь ΔP_r , что также позволяет снизить затраты энергии для подогрева жидкости во внешнем подогревателе [25, 27].

Необходимо отметить, что БЭСМ, кинематическая схема которого изображена на рис. 2.2 также имеет ряд недостатков, в том числе необходимость большого воздушного зазора (2,0-2,5 мм) между магнитопроводами статора и ротора, приводящая к увеличению магнитного сопротивления, а, следовательно, к увеличению токов, необходимых для создания требуемого магнитного потока (тока намагничивания), то есть к увеличению требуемого сечения проводов обмоток и, соответственно, к ухудшению массогабаритных показателей БЭСМ [25].

Устранить указанные выше недостатки предложено в [81] путём выполнения в основании барабана и корпусе сепаратора кольцевых канавок полукруглого сечения, посредством которых барабан устанавливают на диэлектрические тела качения с возможностью вращения. Предложенная конструкция практически исключает «качание» барабана, что даёт возможность уменьшить воздушный зазор между статором и ротором–барабаном БЭСМ не в ущерб его надёжности. На рис. 2.3 приведена кинематическая схема БЭСМ с уменьшенным воздушным зазором, который составляет 0,3-0,5 мм [84].

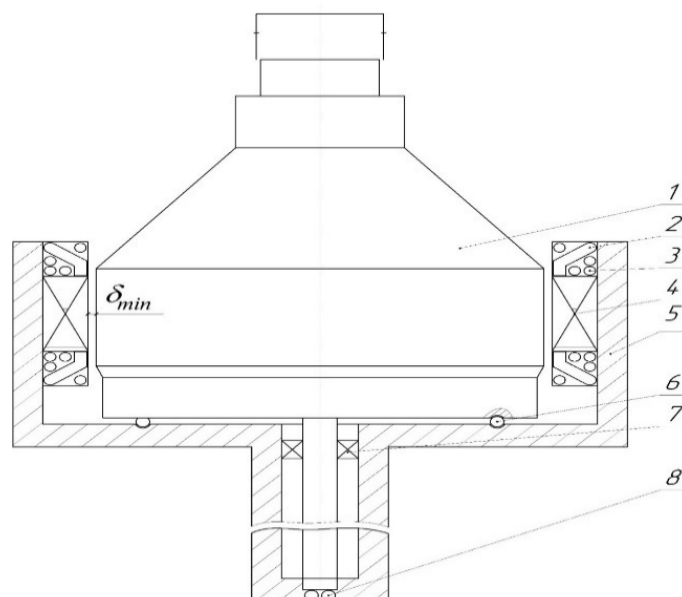
Термин «уменьшенный воздушный зазор» по рис. 2.3 (обозначен как $\delta_{\min}$) обозначает, что величина воздушного зазора электродвигателя исследуемого БЭСМ соответствует стандартной величине воздушного зазора для асинхронных двигателей данного типоразмера (0,3-0,5 мм) [60].

Объектом исследования является безредукторный электропривод сепаратора молока [83], причём как с воздушным зазором (2,0-2,5 мм) для БЭСМ по рис. 2.2, так и с уменьшенным воздушным зазором (0,3-0,5 мм) по рис. 2.3.



1 – барабан сепаратора, 2 – обмотка статора, 3 – охлаждающие трубки, 4 – магнитопровод статора, 5 – корпус, 6,7 – подшипниковые опоры

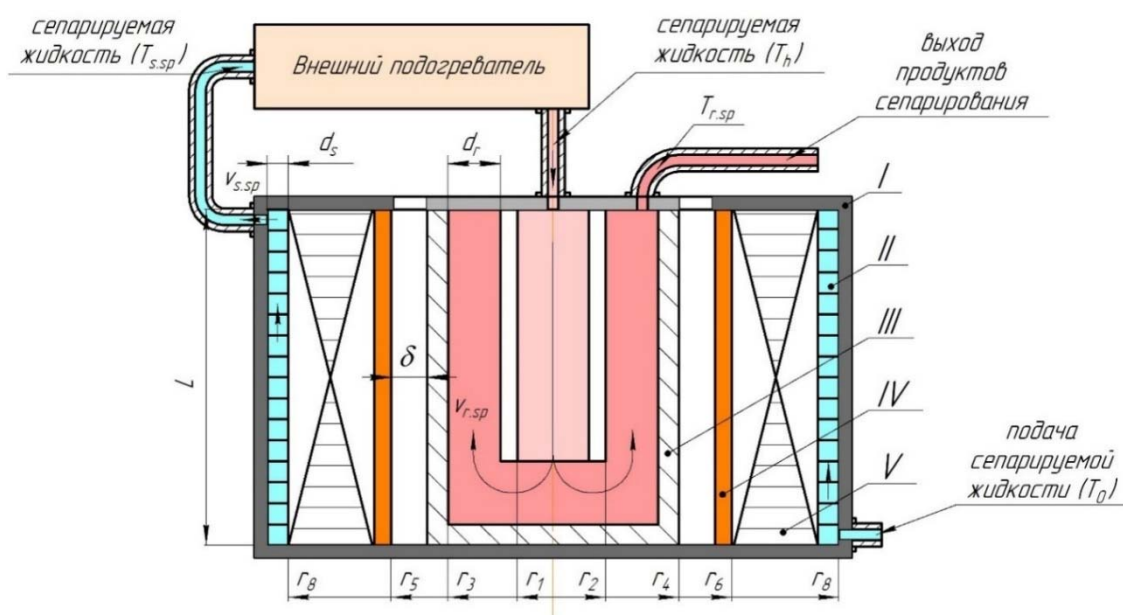
Рисунок 2.2 – Кинематическая схема БЭСМ с воздушным зазором 2-2,5 мм



1 – барабан сепаратора, 2 – обмотка статора, 3 – охлаждающие трубки, 4 – магнитопровод статора, 5 – корпус, 6, 7 - подшипниковые опоры, 8 – диэлектрические тела качения

Рисунок 2.3– Кинематическая схема БЭСМ с уменьшенным воздушным зазором (0,3-0,5 мм)

На рис.2.4 схематично показан исследуемый БЭСМ. У исследуемого БЭСМ гладкий массивный ротор является рабочим органом, в каналах которого протекает продукт, являющийся одновременно хладагентом [24]. Лобовые части обмотки статора IV и наружная часть сердечника статора V обвиты трубопроводом II, по которому протекает продукт (хладоагент). Тепло потерь массивного ротора III используется для дополнительного подогрева молока в барабане сепаратора. На рис.2.4 стрелками схематично показано движение хладагента жидкости с напором G по маршруту статор-ротор. При этом сечение проводников статорной обмотки можно уменьшить, что позволит снизить массогабаритные показатели. Двигатель будет работать в режиме перегрузки, КПД уменьшится, но повышенные потери будут использованы для большего нагрева молока, а двигатель охлаждается до допустимой температуры, определенной классом нагревостойкости.



I – корпус сепаратора с теплоизоляционным слоем, II – трубки, опоясывающие магнитопровод статора, по которым протекает сепарируемая жидкость, III – барабан- ротор сепаратора, IV – обмотка статора, V – магнитопровод статора, δ - воздушный зазор между статором и барабаном-ротором.

Рисунок 2.4 – Разрез фрагмента БЭСМ как базовая модель для исследования тепловых процессов

Преобразователь частоты поддерживает требуемую производительность, формируя момент электродвигателя согласно закону регулирования

частоты тока и напряжения. Принудительный обдув, используемый в серийных электродвигателях, будет уменьшать эффект нагрева молока, поэтому в конструкции БЭСМ крыльчатка отсутствует.

2.2 Математическое моделирование безредукторного электропривода сепаратора молока

Безредукторный электропривод сепаратора молока с точки зрения электромеханики представляет собой асинхронный двигатель с массивным ротором, где ротор выполняет роль проводника магнитного потока, передаёт вращающий момент и обеспечивает технологический процесс, оказывая на последний определённое электромагнитное воздействие. В свою очередь, протекающие в роторе технологические процессы оказывают влияние на тепловое и электромагнитное состояние статора и ротора машины. На основании вышеизложенного, при исследовании БЭСМ необходимо комплексно подходить к электромашинной и технологической частям установки для сепарирования молока, учитывать взаимное влияние электромагнитных, тепловых и технологических факторов. Установка для сепарирования молока включает в себя электромашинную часть (статор асинхронного электродвигателя и ротор-барабан) и технологическую часть (ротор-барабан, внешний подогреватель).

В связи с тем, что ротор БЭСМ является многофункциональным органом, выполняющим функцию собственно ротора АДМР и функцию рабочего органа, в котором происходит технологический процесс, встаёт ряд вопросов, связанных с подогревом продукта в роторе-барабане с одновременным охлаждением элементов конструкции БЭСМ. Практика эксплуатации АДМР показывает, что он, по сравнению с АДКЗ той же мощности, более длительное время находится в состоянии, соответствующем электромагнитным и особенно тепловым переходным процессам.

В этих режимах работы возникает перегрев некоторых элементов конструкций БЭСМ, что вызывает изменение многих электрических, магнитных и тепловых параметров этих элементов и снижение развиваемого момента БЭСМ. В свою очередь изменение параметров оказывает влияние на изменение интенсивности рабочих токов в обмотке статора и роторе-барабане БЭСМ и, как следствие, на изменение потерь в БЭСМ. Следует также заметить, что использование АДМР приводит к снижению КПД БЭСМ по сравнению АДКЗ [64]. Таким образом, исследование теплопередачи в БЭСМ должно включать вопросы распределения температуры по узлам БЭСМ, охлаждение узлов БЭСМ и пути повышения КПД установки.

Проведение математического моделирования в сочетании с вычислительным экспериментом позволяет получить полное представление об исследуемом объекте (БЭСМ). Это особенно эффективно для разработки БЭСМ, который является сложной многопараметрической нелинейной системой, так как его ротор-барабан является многопараметрическим элементом БЭСМ, параметры которого зависят от режима работы и изменяются по нелинейному закону. Исследование параметров БЭСМ путём проведения физического эксперимента затруднено или вообще невозможно [53, 54, 56].

Задачей математического моделирования БЭСМ является получение ее динамических характеристик и на базе этих характеристик – получение рабочих и регулировочных характеристик (как зависимостей энергетических характеристик БЭСМ, электромагнитных характеристик от величины и частоты питающего напряжения) с учетом режимов пуска и режима работы под нагрузкой с передачей тепла молоку.

Математическая модель безредукторного электропривода сепаратора молока разрабатывается на основе теории обобщённого электромеханического преобразователя энергии (ОЭМПЭ), позволяющей записать уравнения для бесконечного спектра гармоник и любого числа контуров на статоре и роторе. Математическая модель безредукторного электропривода сепаратора

молока в соответствии с теорией ОЭМПЭ построена на базе дифференциальных уравнений, описывающих электромагнитные и электромеханические процессы в электроприводах центробежных сепараторов, что в отличие от математической модели построенной на базе теории поля, позволяющей решить только задачи статики, позволяет получить функциональные связи между динамическими характеристиками и параметрами электроприводов центробежных сепараторов различных конструкций [12, 53]. Математическая модель на базе дифференциальных уравнений позволяет получить картину электромагнитных и электромеханических процессов не только при работе в установившемся режиме, но и в переходном (в режиме пуска) [17, 18].

Для проведения исследования в условиях несинусоидальности питающего напряжения и исследования с учетом пространственных гармоник или несимметрии электрической машины, математическая модель составлена в трехфазной системе координат α , β , γ .

На рис. 2.5 представлена модель обобщённого электромеханического преобразователя энергии с тремя группами обмоток по осям α , β , γ в заторможенной системе координат: собственно обмотка статора w_{swi} (соответствует поз. 2 рис. 2.2, 2.3), эквивалентная обмотка для учета потерь на вихревые токи в магнитопроводе статора w_{smi} (поз. 4 рис. 2.2, 2.3), эквивалентная обмотка барабана-ротора w_{ri} (поз. 1 рис. 2.2, 2.3).

При математическом моделировании безредукторного электропривода сепаратора молока, выводе формул для определения масс и момента инерции элементов конструкции, для уточнения выражений статического момента сопротивления и динамического момента были приняты следующие допущения:

- реакция гибких связей валопроводов не учитывается;
- машина симметрична, имеет синусные обмотки;
- ротор считаем с идеально гладкой поверхностью, потери в концевых частях электрической машины, которая является составной частью электропривода не учитываются;

- коэффициент взаимной индуктивности между обмотками на статоре и роторе по осям ЭМПЭ для всех обмоток одинаков и равен M ;
- поверхностные потери распределены равномерно и по радиусу к центру сохраняется реальное распределение источников тепла;
- параметры λ (коэффициент теплопроводности) и C (удельная теплоемкость вещества) считаются независимыми от температуры;
- многофазный сепарируемый продукт, протекающий через ротор-барабан, распределён однородно по всему объёму технологических полостей ротора-барабана.
- все части машины, подлежащие рассмотрению, характеризуются сильными термическими связями;
- обмотка и сердечник статора представлены коаксиальными цилиндрами;
- задача симметрична относительно оси машины;
- лобовые части обмотки статора выполнены без загиба;
- в начальный момент времени температура охлаждающей среды равна температуре во всех точках электропривода;
- распределение температуры в витках обмотки равномерное по всему объёму;
- распределение температуры в магнитопроводе статора равномерное по всему объёму;
- в роторе-барабане жидкость, протекающая внутри барабана, в радиальном отношении неподвижна относительно ротора-барабана;
- обмотка статора и магнитопровод статора в тепловом отношении представлены как единый объект (общее тепловыделение, коэффициенты теплопроводности, теплоёмкость, плотность единого тела представлены как средневзвешенные величины с учётом величин объёмов обмотки и магнитопровода, соответственно);

- элементы асинхронного двигателя с массивным ротором, как основу БЭСМ, можно представить в виде полых толстостенных концентрических цилиндров;
- температура в основании ротора-барабана распределена равномерно по всему объему;
- статор асинхронного двигателя БЭСМ опоясан тонкостенными трубами квадратного сечения со стороной dl , в виде змеевика.

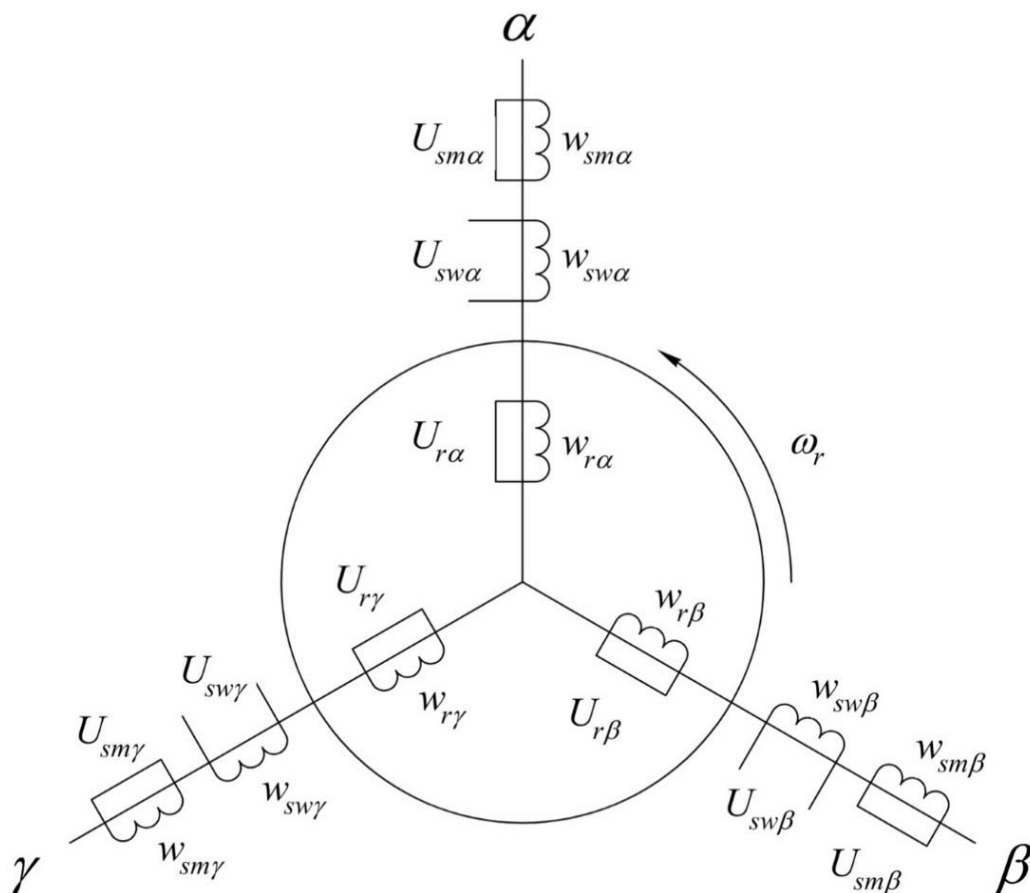


Рисунок 2.5 – Модель обобщённого электромеханического преобразователя энергии с двумя обмотками на статоре и одной на роторе по осям α , β , γ в заторможенной системе координат

В действительности многие из перечисленных коэффициентов (например, коэффициент теплопроводности λ) являются переменными величинами, зависящими или от времени, или от температуры. В связи с тем, что в

исследуемой области температур изменение коэффициента λ составляет всего 5-7 %, а учёт зависимости $\lambda(t)$ при решении приведенной математической модели усложняет алгоритм, то при решении поставленной задачи коэффициент теплопроводности принят постоянным.

Разработанная математическая модель БЭСМ для расчета электромагнитных, электромеханических, тепловых характеристик БЭСМ разбита на несколько подсистем [52]. Для возможности при математическом моделировании учитывать высшие по отношению к промышленной частоте гармоники и несинусоидальность питающего напряжения, выражения многофазного питающего напряжения, которое подаётся на обмотки фаз статора представлено в виде ряда Фурье. Система уравнений, описывающих многофазное питающее напряжение, выглядит следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} U_{sw\alpha}(t) &= A_{\alpha 1} \cdot \sin(h_1 \cdot \omega_f \cdot t) + \dots + A_{\alpha h_i} \cdot \sin(h_i \cdot \omega_f \cdot t) \\ U_{sw\beta}(t) &= A_{\beta 1} \cdot \sin(h_1 \cdot \omega_f \cdot t - 120^\circ) + \dots + A_{\beta h_i} \cdot \sin(h_i \cdot \omega_f \cdot t - 120^\circ) \\ U_{sw\gamma}(t) &= A_{\gamma 1} \cdot \sin(h_1 \cdot \omega_f \cdot t - 240^\circ) + \dots + A_{\gamma h_i} \cdot \sin(h_i \cdot \omega_f \cdot t - 240^\circ) \end{aligned} \right\} (2.1)$$

где $U_{sw\alpha}(t)$, $U_{sw\beta}(t)$, $U_{sw\gamma}(t)$ – фазные напряжения сети в функции времени, $A_{\alpha h}$, $A_{\beta h}$, $A_{\gamma h}$ – амплитудные значения 2-й и последующих гармоник; $\omega_f = 2 \cdot \pi \cdot f_c$ – угловая частота сети, где f_c – частота сети; индекс α , β , γ указывает на принадлежность параметра к одной из трех осей соответственно; индекс h_i указывает на порядковый номер гармоники.

Согласно законам Кирхгофа и электромагнитной индукции уравнения напряжений статора в осях α , β , γ описывают баланс напряжений в обмотках статора с учетом падения напряжения на активном сопротивлении $R_s i_s$ и изменения магнитного потокосцепления. Выразим потокосцепление через ток и индуктивность как Li . Потокосцепления связаны с токами статора, ротора и эквивалентной обмотки магнитопровода через индуктивности и взаимоиндуктивность M . Таким образом уравнения напряжений статора в осях α , β , γ выглядит следующим образом:

$$\left. \begin{aligned}
U_{sw\alpha}(t) &= R_{sw}i_{sw\alpha}(t) + L_{sw}\frac{di_{sw\alpha}(t)}{dt} + M\frac{di_{sm\alpha}(t)}{dt} + M\frac{di_{r\alpha}(t)}{dt} - \\
&\quad - \frac{M}{2}\frac{d}{dt}\left(i_{sw\beta}(t) + i_{sm\beta}(t) + i_{r\beta}(t) + i_{sw\gamma}(t) + i_{sm\gamma}(t) + i_{r\gamma}(t)\right) \\
U_{sw\beta}(t) &= R_{sw}i_{sw\beta}(t) + L_{sw}\frac{di_{sw\beta}(t)}{dt} + M\frac{di_{sm\beta}(t)}{dt} + M\frac{di_{r\beta}(t)}{dt} - \\
&\quad - \frac{M}{2}\frac{d}{dt}\left(i_{sw\gamma}(t) + i_{sm\gamma}(t) + i_{r\gamma}(t) + i_{sw\alpha}(t) + i_{sm\alpha}(t) + i_{r\alpha}(t)\right) \\
U_{sw\gamma}(t) &= R_{sw}i_{sw\gamma}(t) + L_{sw}\frac{di_{sw\gamma}(t)}{dt} + M\frac{di_{sm\gamma}(t)}{dt} + M\frac{di_{r\gamma}(t)}{dt} - \\
&\quad - \frac{M}{2}\frac{d}{dt}\left(i_{sw\alpha}(t) + i_{sm\alpha}(t) + i_{r\alpha}(t) + i_{sw\beta}(t) + i_{sm\beta}(t) + i_{r\beta}(t)\right)
\end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

где $i_{sw\alpha}(t)$, $i_{sw\beta}(t)$, $i_{sw\gamma}(t)$, $i_{sm\alpha}(t)$, $i_{sm\beta}(t)$, $i_{sm\gamma}(t)$, $i_{r\alpha}(t)$, $i_{r\beta}(t)$, $i_{r\gamma}(t)$ – фазные токи в функции времени, протекающие в цепях обмотки статора, роторе и вихревые токи в магнитопроводе статора, где индексы sw, sm и r указывают на принадлежность функции обмотке статора, магнитопроводу статора, ротору, соответственно; R_{sw} – активное сопротивление фазной обмотки статора; L_{sw} – индуктивность фазной обмотки статора; M – взаимная индуктивность статорных и роторных обмоток.

Система уравнений, описывающих электромагнитные процессы, протекающие в магнитопроводе статора, составляются аналогично системе уравнений 2.2 и выглядит следующим образом:

$$\left. \begin{aligned}
0 &= R_{sm}i_{sm\alpha}(t) + L_{sm}\frac{di_{sm\alpha}(t)}{dt} + M\frac{di_{sw\alpha}(t)}{dt} + M\frac{di_{r\alpha}(t)}{dt} - \\
&\quad - \frac{M}{2}\frac{d}{dt}\left[i_{sm\beta}(t) + i_{sm\gamma}(t) + i_{sw\beta}(t) + i_{sw\gamma}(t) + i_{r\beta}(t) + i_{r\gamma}(t)\right] \\
0 &= R_{sm}i_{sm\beta}(t) + L_{sm}\frac{di_{sm\beta}(t)}{dt} + M\frac{di_{sw\beta}(t)}{dt} + M\frac{di_{r\beta}(t)}{dt} - \\
&\quad - \frac{M}{2}\frac{d}{dt}\left[i_{sm\gamma}(t) + i_{sm\alpha}(t) + i_{sw\gamma}(t) + i_{sw\alpha}(t) + i_{r\gamma}(t) + i_{r\alpha}(t)\right] \\
0 &= R_{sm}i_{sm\gamma}(t) + L_{sm}\frac{di_{sm\gamma}(t)}{dt} + M\frac{di_{sw\gamma}(t)}{dt} + M\frac{di_{r\gamma}(t)}{dt} - \\
&\quad - \frac{M}{2}\frac{d}{dt}\left[i_{sm\alpha}(t) + i_{sm\beta}(t) + i_{sw\alpha}(t) + i_{sw\beta}(t) + i_{r\alpha}(t) + i_{r\beta}(t)\right]
\end{aligned} \right\} \quad (2.3)$$

где R_{sm} – активное сопротивление магнитопровода статора; L_{sm} – индуктивность магнитопровода статора.

В левых частях системы уравнений (2.3) «0» показывает, что к соответствующим эквивалентным обмоткам магнитопровода статора напряжение не подводится [53, 54, 56].

Система уравнений, описывающих электромагнитные процессы, протекающие в роторе, выглядит следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} 0 &= R_r i_{r\alpha}(t) + L_r \frac{di_{r\alpha}(t)}{dt} + M \frac{di_{sw\alpha}(t)}{dt} + M \frac{di_{sm\alpha}(t)}{dt} - \\ &- \frac{M}{2} \frac{d}{dt} [i_{sw\beta}(t) + i_{sw\gamma}(t) + i_{sm\beta}(t) + i_{sm\gamma}(t) + i_{r\beta}(t) + i_{r\gamma}(t)] + \\ &+ \{L_r [i_{r\beta}(t) - i_{r\gamma}(t)] + M [i_{sw\beta}(t) - i_{sw\gamma}(t) + i_{sm\beta}(t) - i_{sm\gamma}(t)] - \\ &- \frac{M}{2} [i_{sw\beta}(t) - i_{sw\gamma}(t) + i_{sm\beta}(t) - i_{sm\gamma}(t) + i_{r\beta}(t) - i_{r\gamma}(t)]\} \frac{\omega_r(t)}{\sqrt{3}} \Big] \\ 0 &= R_r i_{r\beta}(t) + L_r \frac{di_{r\beta}(t)}{dt} + M \frac{di_{sw\beta}(t)}{dt} + M \frac{di_{sm\beta}(t)}{dt} - \\ &- \frac{M}{2} \frac{d}{dt} [i_{sw\gamma}(t) + i_{sw\alpha}(t) + i_{sm\gamma}(t) + i_{sm\alpha}(t) + i_{r\gamma}(t) + i_{r\alpha}(t)] + \\ &+ \{L_r [i_{r\gamma}(t) - i_{r\alpha}(t)] + M [i_{sw\gamma}(t) - i_{sw\alpha}(t) + i_{sm\gamma}(t) - i_{sm\alpha}(t)] - \\ &- \frac{M}{2} [i_{sw\gamma}(t) - i_{sw\alpha}(t) + i_{sm\gamma}(t) - i_{sm\alpha}(t) + i_{r\gamma}(t) - i_{r\alpha}(t)]\} \frac{\omega_r(t)}{\sqrt{3}} \Big] \\ 0 &= R_r i_{r\gamma}(t) + L_r \frac{di_{r\gamma}(t)}{dt} + M \frac{di_{sw\gamma}(t)}{dt} + M \frac{di_{sm\gamma}(t)}{dt} - \\ &- \frac{M}{2} \frac{d}{dt} [i_{sm\alpha}(t) + i_{sm\beta}(t) + i_{sw\alpha}(t) + i_{sw\beta}(t) + i_{r\alpha}(t) + i_{r\beta}(t)] + \\ &+ \{L_r [i_{r\alpha}(t) - i_{r\beta}(t)] + M [i_{sm\alpha}(t) - i_{sm\beta}(t) + i_{sw\alpha}(t) - i_{sw\beta}(t)] - \\ &- \frac{M}{2} [i_{sm\alpha}(t) - i_{sm\beta}(t) + i_{sw\alpha}(t) - i_{sw\beta}(t) + i_{r\alpha}(t) - i_{r\beta}(t)]\} \frac{\omega_r(t)}{\sqrt{3}} \Big] \end{aligned} \right\} \quad (2.4)$$

где R_r – активное сопротивление массивного ротора; L_r – индуктивность массивного ротора; $\omega_r(t)$ – угловая скорость ротора.

Ротор асинхронного двигателя представляет собой короткозамкнутую обмотку, в которой индуцируются токи i_r . Вращение ротора приводит к тому, что магнитное поле статора и ротора взаимодействуют, создавая ЭДС,

связанную с движением относительно друг друга. Напряжение на роторной обмотке равно нулю, так как она короткозамкнута. При вращении ротора с угловой скоростью $\omega_r(t)$ в уравнениях появляются дополнительные слагаемые, связанные с взаимной индукцией M между статором и ротором. Это связано с тем, что магнитное поле статора вращается относительно ротора.

В левых частях уравнений системы (2.4) «0» показывает, что к соответствующим эквивалентным обмоткам ротора напряжение не подводится [53, 54].

Согласно известному уравнению движения (уравнение моментов) электромагнитный момент БЭСМ можно разложить на две составляющие – статический M_C и динамический M_D момент сопротивления:

$$M_{ЭМ}(t) = M_C(t) + M_D(t), \quad (2.5)$$

где $M_{ЭМ}(t)$ – электромагнитный момент асинхронного двигателя безредукторного электропривода сепаратора молока; $M_C(t)$ – статический момент сопротивления безредукторного электропривода сепаратора молока, приведенный к валу электродвигателя безредукторного электропривода сепаратора молока; $M_D(t)$ – динамический момент безредукторного электропривода сепаратора молока, приведенный к его валу.

Электромагнитный момент $M_{ЭМ}(t)$ определяется взаимодействием магнитных полей статора и ротора и выражается через токи, протекающие в обмотке статора, ротора и эквивалентной обмотке магнитопровода разложенными в осях α, β, γ безредукторного электропривода сепаратора молока, с учетом пар полюсов p и взаимоиндуктивности M , выражается формулой:

$$M_{ЭМ}(t) = \frac{p\sqrt{3}M}{2} \left[\begin{aligned} &(i_{sw\alpha}(t) + i_{sm\alpha}(t)) \cdot (i_{r\gamma}(t) - i_{r\beta}(t)) + \\ &+ (i_{sw\beta}(t) + i_{sm\beta}(t)) \cdot (i_{r\alpha}(t) - i_{r\gamma}(t)) + \\ &+ (i_{sw\gamma}(t) + i_{sm\gamma}(t)) \cdot (i_{r\alpha}(t) - i_{r\beta}(t)) \end{aligned} \right] \quad (2.6)$$

Статический момент сопротивления $M_C(t)$ определяется с учетом конструкции сепаратора (диаметр барабана, посадочный диаметр внутреннего

кольца подшипниковой опоры, масса барабана) и массы сепарируемого продукта. Динамический момент сопротивления $M_d(t)$ безредукторного электропривода сепаратора молока, определяется суммой моментов инерций элементов БЭСМ (двигателя, вала, ротор барабана, сепарируемой жидкости). Таким образом получаем систему уравнений, определяющих статический [30, 51] и динамический моменты:

$$\left. \begin{aligned} M_c(t) &= k_{\pi} \cdot f_{\text{тк}} \cdot (m_{\text{в}} + m_{\text{б}}) \cdot g \cdot \frac{d_1}{2} + \frac{m(t) \cdot g \cdot \frac{d_{\text{б}}}{2}}{\eta_{\text{дв.мех}}} \\ M_d(t) &= [J_{\text{дв}} + J_{\text{в}} + J_{\text{б}} + J_{\text{ж}}(t)] \frac{d\omega_r(t)}{dt}, \end{aligned} \right\} \quad (2.7)$$

где k_{π} – коэффициент учета технологических и монтажных погрешностей; $f_{\text{тк}}$ – коэффициент трения качения; $m_{\text{в}}$ – масса валов установки; $m_{\text{б}}$ – масса барабана сепаратора; $m(t)$ – масса сепарируемого продукта; d_1 – посадочный диаметр внутреннего кольца подшипниковой опоры; $d_{\text{б}}$ – диаметр барабана; $\eta_{\text{дв.мех}}$ – механический КПД электродвигателя БЭСМ; $J_{\text{дв}}$ – момент инерции электродвигателя БЭСМ; $J_{\text{в}}$ – момент инерции вала; $J_{\text{б}}$ – момент инерции ротора-барабана; $J_{\text{ж}}(t)$ – момент инерции сепарируемой жидкости.

Уравнения (2.1 – 2.7) в совокупности представляют собой математическую модель электромагнитных и электромеханических процессов безредукторного электропривода сепаратора молока.

Система уравнений 2.1 в обобщенном виде:

$$U_m(t) = A_{xh_1} \cdot \sin(h_1 \cdot \omega_f \cdot t + \varphi_1) + \dots + A_{xh_i} \cdot \sin(h_i \cdot \omega_f \cdot t + \varphi_i), \quad (2.8)$$

где $U_m(t)$ – фазное напряжение сети в функции времени, для возможности при моделировании учитывать несинусоидальность питающего напряжения, представлено в виде ряда Фурье; A_{xh_i} – амплитудные значения 2-й и последующих гармоник; $\omega_f = 2 \cdot \pi \cdot f_c$ – угловая частота сети, где f_c – частота сети; индекс x может принимать значение 1, 2 или 3 что указывает на принадлежность параметра к одной из трех осей α , β , γ , соответственно, идущих последовательно; индекс h_i указывает на порядковый номер гармоники.

Запишем систему уравнений 2.2 в обобщенном виде (индекс x указывает на принадлежность к оси α, β, γ):

$$U_x(t) = R_{sw}i_{swx}(t) + L_{sw}\frac{di_{swx}(t)}{dt} + M\frac{di_{smx}(t)}{dt} + M\frac{di_{rx}(t)}{dt} - \frac{M}{2}\frac{d}{dt}[i_{swy}(t) + i_{swz}(t) + i_{smy}(t) + i_{smz}(t) + i_{ry}(t) + i_{rz}(t)] \quad (2.9)$$

где $i_{swx}(t)$, $i_{smx}(t)$, $i_{rx}(t)$ – фазные токи в функции времени, протекающие в цепях обмотки статора, роторе и вихревые токи в магнитопроводе статора, где индексы sw , sm и r указывают на принадлежность функции обмотке статора, магнитопроводу статора, ротору, соответственно; индексы $y=x+1$ и $z=x+2$ указывают на принадлежность параметра к одной из трех осей α, β, γ (если индексы y или z принимают значение больше 3, то из значения индекса вычитается 3).

Система уравнений 2.3 в обобщенном виде:

$$0 = R_{sm}i_{smx}(t) + L_{sm}\frac{di_{smx}(t)}{dt} + M\frac{di_{swx}(t)}{dt} + M\frac{di_{rx}(t)}{dt} - \frac{M}{2}\frac{d}{dt}[i_{smy}(t) + i_{smz}(t) + i_{swy}(t) + i_{swz}(t) + i_{ry}(t) + i_{rz}(t)] \quad (2.10)$$

Система уравнений 2.4 в обобщенном виде:

$$0 = R_r i_{rx}(t) + L_r \frac{di_{rx}(t)}{dt} + M \frac{di_{swx}(t)}{dt} + M \frac{di_{smx}(t)}{dt} - \frac{M}{2} \frac{d}{dt} [i_{swy}(t) + i_{swz}(t) + i_{smy}(t) + i_{smz}(t) + i_{ry}(t) + i_{rz}(t)] + \{ L_r [i_{ry}(t) - i_{rz}(t)] + M [i_{swy}(t) - i_{swz}(t) + i_{smy}(t) - i_{smz}(t)] - \frac{M}{2} [i_{swy}(t) - i_{swz}(t) + i_{smy}(t) - i_{smz}(t) + i_{ry}(t) - i_{rz}(t)] \} \frac{\omega_r(t)}{\sqrt{3}} \quad (2.11)$$

В 2.2-2.4, 2.9-2.11 при сопротивлениях обмоток статора и ротора в качестве сомножителей приведены температурные коэффициенты, учитывающие материал обмотки (α) и ее температуру. То есть, в уравнениях 2.2 - 2.4, 2.9-2.11 множители в качестве сопротивлений принимаются в виде: $R_{sw}(1+\alpha_{sw}T_s)$ - сопротивление обмотки статора, $R_{sm}(1+\alpha_{sm}T_s)$ – сопротивление магнитопровода статора, $R_r(1+\alpha_rT_r)$ – сопротивление ротора.

При составлении уравнений описывающих тепловые процессы БЭСМ, в

теплотехническом отношении условно разбили на части [97, 101,103, 113]: статор - уравнение рассчитывается как средневзвешенная температуры обмотки и магнитопровода статора с температурой T_s ; ротор-барабан – уравнение рассчитывается как средневзвешенная температура ротора T_r .

Протекающую через узлы БЭСМ сепарируемую жидкость условно разбили также на части: сепарируемая жидкость, протекающая по трубкам опоясывающими статор, с температурой $T_{s.sp}$; сепарируемая жидкость, протекающая по ротору-барабану, опоясывающими статор, с температурой $T_{r.sp}$.

Уравнения описывают изменение температуры и тепловое состояние конструктивных частей БЭСМ за время ($\Delta\tau$) выглядит следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} c_s \cdot \rho_s \cdot \frac{\Delta T_s}{\Delta \tau} &= \frac{q_s}{V_s} \\ c_r \cdot \rho_r \cdot \frac{\Delta T_r}{\Delta \tau} &= \frac{q_r}{V_r} \cdot e^{r\sqrt{2 \cdot \mu_R \cdot \gamma_R \cdot f_1 \cdot s}} + \frac{q_s}{V_s} \cdot a_{s-r} \\ c_{sp} \cdot \rho_{sp} \cdot S_{s.sp} \cdot \left(\frac{\Delta T_{s.sp}}{\Delta \tau} + \omega_{s-sp} \cdot \frac{\Delta T_{s.sp}}{\Delta L} \right) &= a_{s-sp} \cdot \Pi_{s-sp} \cdot (T_s - T_{s.sp}) \\ c_{sp} \cdot \rho_{sp} \cdot S_{r.sp} \cdot \left(\frac{\Delta T_{r.sp}}{\Delta \tau} + \omega_{r-sp} \cdot \frac{\Delta T_{r.sp}}{\Delta L} \right) &= a_{r-sp} \cdot \Pi_{r-sp} \cdot (T_r - T_{r.sp}) \end{aligned} \right\} \quad (2.12)$$

где c_s, c_r, c_{sp} – удельные теплоемкости статора, ротора, сепарируемой жидкости, соответственно; $\rho_s, \rho_r, \rho_{sp}$ – плотности статора, ротора, сепарируемой жидкости, соответственно; T_0 – начальная температура; $T_s, T_r, T_{s.sp}, T_{r.sp}$ – температура статора, ротора, сепарируемой жидкости на выходе из статора (размер L), сепарируемой жидкости на выходе из ротора-барабана (размер L), соответственно, температуры определяются через время τ , которое равно или больше постоянной времени теплового переходного процесса (принято $\tau_{уст}=1200$ с.); q_s, q_r – тепловыделение в статоре, роторе, соответственно; V_s, V_r – объем статора и массивной части барабана-ротора ($r_5-\delta-r_3$); μ_R, γ_R – магнитная проницаемость и проводимость материала ротора-барабана, соответственно; f_l – частота сети; s – скольжение при установившемся режиме; $S_{s.sp}, S_{r.sp}$ – сечения опоясывающей статор трубки, канала для жидкости в барабане-роторе; $\Pi_{s.sp}, \Pi_{r.sp}$ – периметры соприкосновения (отмывания) сепарируемой жидкости

статора и барабана-ротора, соответственно; ω_{s-sp} , ω_{r-sp} – скорость протекания сепарируемой жидкости в трубках, опоясывающих статор, барабане-роторе, соответственно ($\omega_{s-sp} = Q_{sp} / S_{s.sp}$, $\omega_{r-sp} = Q_{sp} / S_{r.sp}$, где Q_{sp} – объем подачи сепарируемой жидкости); a_{s-sp} , a_{r-sp} – коэффициенты теплоотдачи статор – сепарируемая жидкость, ротор – сепарируемая жидкость, соответственно; a_{s-r} – коэффициенты теплопередачи статор – воздушный зазор – барабан-ротор.

«Источниковый член» в (2.12) в уравнении для ротора записан с учетом затухания электромагнитной волны в глубине массива [16, 63].

Тепловыделение в статоре (q_s) определяется как средневзвешенное значение тепловыделений магнитопровода статора (q_{II}) и обмотки статора (q_{III}). Уравнение получено путем усреднения тепловых потерь в разных частях обмотки статора (q_{II} и q_{III}) с учетом их объемов (V_{II} и V_{III}). Тепловыделение в роторе (q_r) определяется на основе эквивалентного активного сопротивления ротора (R_r) [19, 63] и действующего значения тока ротора ($I_{r.cp}$). Система уравнений, описывающая тепловыделения q_s , q_{II} , q_{III} , q_r , выглядит следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} q_s &= \frac{q_{II} \cdot V_{II} + q_{III} \cdot V_{III}}{V_{II} + V_{III}} \\ q_{II} &= 3 \cdot R_{sm} \cdot I_{sm.cp}^2 \\ q_{III} &= 3 \cdot R_{sw} \cdot I_{sw.cp}^2 \\ q_r &= 3 \cdot R_r \cdot I_{r.cp}^2 \end{aligned} \right\} \quad (2.13)$$

где R_{sm} , R_{sw} , R_r – активные сопротивления магнитопровода статора, обмотки статора, ротора-барабана (эквивалентное), соответственно; $I_{sm.cp}$, $I_{sw.cp}$, $I_{r.cp}$ – средние значения вихревых токов в магнитопроводе статора, обмотке статора, ротора-барабана, соответственно; V_{II} , V_{III} – объёмы магнитопроводов статора и обмотки статора, соответственно.

С учётом геометрических размеров (рис. 2.9) уравнение описывающее тепловыделение статора запишется в следующем виде:

$$q_s = \frac{q_{II} \cdot (r_7^2 - r_6^2) + q_{III} \cdot (r_6^2 - r_5^2)}{r_7^2 - r_5^2}. \quad (2.14)$$

Удельная теплоёмкость и плотность статора определяются как средне-взвешенные значения магнитопровода и обмотки статора, соответственно, и запишутся в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} c_s &= \frac{c_{II} \cdot V_{II} + c_{III} \cdot V_{III}}{V_{II} + V_{III}} \\ \rho_s &= \frac{\rho_{II} \cdot V_{II} + \rho_{III} \cdot V_{III}}{V_{II} + V_{III}} \end{aligned} \right\} \quad (2.15)$$

где c_{II} , c_{III} – удельная теплоемкость магнитопровода статора и обмотки статора, соответственно; ρ_{II} , ρ_{III} – плотность магнитопровода статора и обмотки статора, соответственно; с учетом геометрических размеров (рис. 2.9).

Удельная теплоемкость и плотность статора запишутся в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} c_s &= \frac{c_{II} \cdot (r_7^2 - r_6^2) + c_{III} \cdot (r_6^2 - r_5^2)}{r_7^2 - r_5^2} \\ \rho_s &= \frac{\rho_{II} \cdot (r_7^2 - r_6^2) + \rho_{III} \cdot (r_6^2 - r_5^2)}{r_7^2 - r_5^2} \end{aligned} \right\} \quad (2.16)$$

Объем статора вычисляется по формуле:

$$V_s = V_{II} + V_{III}. \quad (2.17)$$

С учетом геометрических размеров (рис. 2.9) объем статора запишется в следующем виде:

$$V_s = (r_7^2 - r_5^2) \cdot \pi \cdot l_\delta. \quad (2.18)$$

Уравнения описывающие коэффициенты теплопередачи между различными частями электрической машины: статором и поверхностью (a_{s-sp}), статором и ротором (a_{s-r}), ротором и поверхностью (a_{r-sp}) получены на основе теории теплообмена при вынужденной и свободной конвекции. Коэффициенты теплопередачи выглядят следующим образом:

$$\left. \begin{aligned}
a_{s-sp} &= 0,21 \cdot \left(\frac{4 \cdot Q_{sp} \cdot \rho_{sp}}{d_s \cdot \mu_{s-sp}} \right)^{0,8} \cdot \left(\frac{\mu_{s-sp} \cdot c_{sp}}{\lambda_{sp}} \right)^{0,43} \cdot \left(\frac{\mu_{s-sp} \cdot c_{sp} \cdot \lambda_s}{\lambda_{sp} \cdot \mu_s \cdot c_s} \right)^{0,25} \cdot \varepsilon_{ls} \cdot \frac{\lambda_{sp}}{d_s} \cdot \left(1 + 1,77 \frac{d_s}{R_{sc}} \right) \\
a_{s-r} &= \frac{0,095 \cdot \left[\left(\frac{R_r \cdot \omega_r \cdot \delta}{v_a} \right)^2 \cdot 2 + \frac{g \cdot L^3 \cdot \beta \cdot (t_1 - t_a)}{v_a^2} \right]^{0,35} \cdot \lambda_a}{2 \cdot \delta} \\
a_{r-sp} &= 0,21 \cdot \left(\frac{4 \cdot Q_{sp} \cdot \rho_{sp}}{d_r \cdot \mu_{r-sp}} \right)^{0,8} \cdot \left(\frac{\mu_{r-sp} \cdot c_{sp}}{\lambda_{sp}} \right)^{0,43} \cdot \left(\frac{\mu_{r-sp} \cdot c_{sp} \cdot \lambda_r}{\lambda_{sp} \cdot \mu_r \cdot c_r} \right)^{0,25} \cdot \varepsilon_{lr} \cdot \frac{\lambda_{sp}}{d_s} \cdot \left(1 + 1,77 \frac{d_r}{R_{rc}} \right)
\end{aligned} \right\} (2.19)$$

где Nu_{ds-sp} , Nu_{dr-sp} – число Нуссельта, характеризующее соотношение между интенсивностью теплообмена за счёт конвекции и интенсивностью теплообмена за счёт теплопроводности между статором и сепарируемым продуктом, ротором и сепарируемым продуктом, соответственно; λ_s , λ_r , λ_{sp} , λ_a – коэффициент теплопроводности статора, ротора, сепарируемого продукта и воздуха, соответственно; d_s, d_r – диаметр трубы, опоясывающей статор, и канала в барабане-роторе сепаратора, соответственно; ε_{Rs} , ε_{Rr} – поправочный коэффициент расчёта теплоотдачи в изогнутых трубах, опоясывающих статор, и каналов барабана-ротора, соответственно; Re_{ds-sp} , Re_{dr-sp} – число Рейнольдса, характеризующее отношение инерционных сил к силам вязкого трения в сепарируемой жидкости в трубах, опоясывающих статор, и каналах барабана-ротора, соответственно; Pr_{s-sp} , Pr_{r-sp} , Pr_s , Pr_r – число Прандтля, учитывающее влияние физических свойств теплоносителя на теплоотдачу в сепарируемой жидкости в трубках, опоясывающих статор, сепарируемой жидкости в каналах барабана-ротора, статоре и роторе, соответственно; ε_{ls} , ε_{lr} – поправочный коэффициент расчёта теплоотдачи в изогнутых трубах, опоясывающих статор, и в каналах ротора-барабана, соответственно; R_{sc} , R_{rc} – радиус изгиба труб, опоясывающих статор, и канала ротора-барабана, соответственно; ω_{s-sp} , ω_{r-sp} – скорость протекания сепарируемой жидкости в трубках, опоясывающих статор, и каналах барабана-ротора, соответственно; ρ_{sp} – плотность сепарируемой жидкости; μ_{s-sp} , μ_s , μ_a , μ_{r-sp} , μ_r – динамический коэффициент вязкости сепарируемой жидкости в трубках, опоясывающих материала статор, статора, воздуха, сепарируемой жидкости в каналах барабана-ротора, материала барабана-ротора,

соответственно; c_{sp} – удельная теплоёмкость сепарируемой жидкости при постоянном давлении; $R_r=r_5-\delta=r_4$ – радиус барабана-ротора; ω_r – скорость вращения барабана-ротора; δ – величина воздушного зазора, ν_a – кинематический коэффициент вязкости воздуха; Gr_a – число Грасгофа, определяющее процесс подобия теплообмена в воздушном зазоре при конвекции в поле тяжести; ρ_a – плотность воздуха; g – ускорение свободного падения; t_l – температура поверхности теплообмена; t_a – температура воздуха; β – температурный коэффициент объёмного расширения воздуха.

Температура сепарируемой жидкости на выходе из охлаждающей трубки, опоясывающей статор, $T_{s.sp}$ складывается из начальной температуры T_0 и изменения температуры $\Delta T_{s.sp}$, вызванного тепловыми процессами (в том числе нагревом от потерь в статоре). Температура сепарируемой жидкости на выходе из охлаждающей трубки будет определяться по формуле:

$$T_{s.sp} = T_0 + \Delta T_{s.sp} \quad (2.20)$$

Температура сепарируемой жидкости на выходе из ротора-барабана, будет составляется аналогично 2.20 и запишется как:

$$T_{r.sp} = T_h + \Delta T_{r.sp} \quad (2.21)$$

где $\Delta T_{s.sp}$, $\Delta T_{r.sp}$ – температуры нагрева сепарируемой жидкости в статоре и роторе-барабане, соответственно.

Так как сепарируемая жидкость после трубок, опоясывающих статор, должна по технологии поступать во внешний подогреватель, то температура сепарируемой жидкости на выходе из внешнего подогревателя, поступающей в ротор-барабана, определяется по формуле:

$$T_h = \Delta T_h + \Delta T_{s.sp}, \quad (2.22)$$

где ΔT_h – температура нагрева сепарируемой жидкости во внешнем подогревателе, определяется как:

$$\Delta T_h = \frac{q_h}{c_{sp} \cdot \rho_{sp} \cdot \eta_h}, \quad (2.23)$$

где q_h – потребляемая мощность подогревателем, η_h – КПД подогревателя.

Для реализации модернизированной математической модели (2.24) необходимо в уравнения 2.1-2.23 подставить значения следующих параметров:

– электромагнитные параметры (активные сопротивления фазной обмотки статора, магнитопровода статора, массивного ротора, индуктивности фазной обмотки статора, магнитопровода статора, массивного ротора, взаимная индуктивность статорных и роторных обмоток – рассчитаны в приложении Б);

– электромеханические параметры (момент сопротивления) (рассчитываются по формуле (2.7) исходя из паспортных и габаритных параметров БЭСМ);

– значения величины и частоты питающего напряжения (задаются этими параметрами питающей сети);

– теплотехнические параметры (удельные теплоемкости статора, ротора, сепарируемой жидкости, соответственно; плотности материалов статора, ротора, сепарируемой жидкости, соответственно) [109].

Объединив (2.5, 2.8- 2.12) получим модернизированное математическое описание БЭСМ:

$$\left. \begin{aligned} U_m(t) &= f(\omega_f, t) \\ U_{sw}(t) &= f(R_{sw}, L_{sw}, M, i_{sw}, t) \\ U_{sm}(t) &= f(R_{sm}, L_{sm}, M, i_{sm}, t) \\ \Delta T_s &= f(c_s, \rho_s, q_s, V_s, \tau) \\ \Delta T_r &= f(c_r, \rho_r, q_r, V_r, \mu_r, f_1, s, \alpha_{s-r}, \tau) \\ \Delta T_{s.sp} &= f(c_{sp}, \rho_{sp}, S_{s.sp}, \Delta L, \Pi_{s-sp}, T_s, \alpha_{s-sp}, \omega_{s-sp}, \tau) \\ T_{r.sp} &= f(c_{sp}, \rho_{sp}, S_{r.sp}, \Delta L, \Pi_{r-sp}, T_r, \alpha_{r-sp}, \omega_{r-sp}, \tau) \end{aligned} \right\} \quad (2.24)$$

где " $U_m(t)$ " – система уравнений, описывающих многофазное питающее напряжение (в развернутом виде " $U_m(t)$ " представлена в (2.1), в свернутом виде – в (2.8)); " $U_{sw}(t)$ " – система уравнений, описывающих

электромагнитные процессы, протекающие в обмотке статора (в развернутом виде " $U_{sw}(t)$ " представлена в (2.2), в свернутом виде – в (2.9)); " $U_{sm}(t)$ " – система уравнений, описывающих электромагнитные процессы, протекающие в магнитопроводе статора (в развернутом виде " $U_{sm}(t)$ " представлена в (2.3), в свернутом виде – в (2.10)); " $U_r(t)$ " – система уравнений, описывающих электромагнитные процессы, протекающие в роторе (в развернутом виде " $U_r(t)$ " представлена в (2.4), в свернутом виде – (2.11)); " $M_{эм}(t)$ " – система уравнений, описывающих движение (" $M_{эм}(t)$ " представлена в (2.5); " $\Delta T_s, \Delta T_r, \Delta T_{s.sp}, \Delta T_{s.sp}, \Delta T_{r.sp}$ " – система уравнений, описывающих тепловое состояние БЭСМ (" $\Delta T_s, \Delta T_r, \Delta T_{s.sp}, \Delta T_{s.sp}, \Delta T_{r.sp}$ " представлена в (2.12)).

Математическое описание БЭСМ (формуле 2.24) решается алгоритмами программной среды MatLab, компьютерная модель приведена в приложение В. Таким образом, модернизированная математическая модель 2.24 отличается от существующих тем, что в неё введены уравнения, описывающие совместно протекающие электромагнитные, электромеханические и тепловые процессы, что позволяет проанализировать эти процессы с учетом их взаимовлияния друг на друга, а также учесть передачу энергии тепловых потерь в статоре и роторе молока и определить температуру нагрева молока за счет тепловыделений в обмотке статора, магнитопроводе статора, в роторе-барабане и получить динамические электромагнитные и электромеханические характеристики ($i_{стат}(t) = \varphi(t)$; $i_{рот}(t) = \varphi(t)$; $n_{бар} = \varphi(t)$; $M_{эм} = \varphi(t)$), на основании которых можно получить рабочие, регулировочные и энергетические характеристики БЭСМ. В разработанном научно-методическом аппарате (при определении температур нагрева сепарируемой жидкости) учтена связь электромагнитных и тепловых параметров исследуемого БЭСМ, учтены «греющие» потери обмотки и магнитопровода статора.

2.3 Реализация математической модели БЭСМ и обоснование параметров и режимов его работы

Система уравнений 2.1-2.4 (в свернутом виде 2.8 - 2.11), 2.5, 2.12, 2.24 с учетом 2.6, 2.7, 2.13-2.23 является математическим описанием БЭСМ, которое описывает электромагнитные, электромеханические и тепловые процессы в БЭСМ с учетом изменения формы задающего напряжения, его величины и частоты, типа и скорости протекания жидкости.

Целью вычислительного эксперимента являются:

- получение картины электромагнитных, электромеханических и тепловых переходных процессов в БЭСМ при пуске, реверсе, “набросе” нагрузки на валу и несимметрии питающего напряжения;
- нахождение функциональных зависимостей между выходными параметрами БЭСМ (скорость вращения барабана, момент на валу барабана, КПД установки, $\cos\varphi_1$) и его входными параметрами, оказывающие влияние на режим работы БЭСМ (параметры сети (напряжение и частота сети), марка материала ротора – барабана (его сопротивление), плотность исходной жидкости).

Численное решение данной задачи представляет значительные вычислительные сложности. Перечислим основные причины этих сложностей.

Задача состоит из плохо стыкующихся подзадач:

- токи в проводниках описываются системой обыкновенных дифференциальных уравнений по времени, уравнения для токов и даны в неявной форме;
- имеется несколько тел, контактирующих друг с другом и окружающей средой, распределение температуры в этих телах описывается нестационарным уравнением теплопроводности;
- наличие токов порождает в уравнениях теплопроводности источники членов;

- в теле происходят два различных физических процесса: во-первых, нагрев тела в силу источников членов, которые связаны с токами в проводнике; во-вторых, диффузионные процессы, приводящие в конечном итоге к теплотерям через границы. Начальные моменты времени характеризуются очень быстрыми изменениями источников членов, в то время как диффузионные процессы протекают намного медленнее;
- внешние границы каждого проводника обмотки могут контактировать друг с другом, с окружающим воздухом, с охлаждающей жидкостью;
- каждый контакт подразумевает свой тип краевых условий.

Несмотря на сложность задачи, исходная система не была упрощена. Был найден эффективный алгоритм решения задачи в полном виде. Общей сложностью, независимо от метода, является неявный вид обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) относительно $\frac{di_k}{dt}$ (где i_k – токи, протекающие в частях БЭСМ, $k=1 \dots n$ – номер обмотки по рис. 2.1:

$$\begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix} x \begin{pmatrix} \frac{di_1}{dt} \\ \dots \\ \frac{di_n}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_1 \\ \dots \\ f_n \end{pmatrix} \quad (2.25)$$

где матрица $|a_{ij}|$ находится на каждом шаге интегрирования с учетом значений матрицы $|f_i|$ правых частей.

Для решения вышеперечисленных задач проанализирован ряд методов [96, 105, 106]: методы интегрирования ОДУ (явная схема), конечно-разностные методы решения (неявная схема).

Метод интегрирования ОДУ наиболее экономичен во времени и легко программируется для постоянного шага по времени. Шаг во времени, как показывают предварительные грубые прикидки, может меняться до 100 раз. Возникают сложности программирования переменного шага [48].

Анализ вышеперечисленных методов и программных пакетов MATLAB выполнен на основании следующих критериев:

1) «Простота грамматики» (отсутствие необходимости углубленного изучения перечня команд для построения математической модели объекта);

2) Точность и быстрота вычислений (точность и быстрота вычислений зависят от минимального количества уравнений необходимых для решаемости системы уравнений, математически описывающих объект).

С учётом критериев и анализа методов программа расчёта, разработанная в среде «MATLAB» с пакетом инженерного программного обеспечения «Simulink», позволяет рассчитать переходные процессы в БЭСМ с получением картины этих процессов, определить функциональные зависимости между электромагнитными и энергетическими параметрами БЭСМ. Скриншоты программы расчёта математической модели БЭСМ приведены в приложении В. Исследование характеристик БЭСМ было разбито на два этапа: исследование БЭСМ со стандартным воздушным зазором между статором БЭСМ и его ротором-барабаном (кинематическая схема (рис. 2.2), и исследование БЭСМ с уменьшенным воздушным зазором (рис. 2.3) [82].

Стандартный воздушный зазор в конструкциях, подобных представленной на рис.2.2 (2,0-2,5 мм), завышен по сравнению с воздушным зазором в АДКЗ общепромышленного исполнения (0,3-0,5 мм) [60]. Это завышение вызвано необходимостью обеспечения безопасного (с точки зрения механики) воздушного зазора между статором и ротором в БЭСМ при использовании кинематической схемы «качающийся барабан», то есть вал ротора электродвигателя закреплен в подшипниковом узле только с одной стороны (рис. 2.2), с другой стороны уменьшенный зазор позволит повысить энергетические показатели (КПД и $\cos\varphi$) установки. В вычислительном эксперименте исследуемые параметры БЭСМ расчёт которых приведён в разделе 2.6 (I_1 , $\omega_{\text{бар}}$, T_1 , $T_{\text{ж}}$, $M_{\text{эм}}$, $\dot{\eta}$ и $\cos\varphi$) в соответствии с методом планирования эксперимента [11, 54, 70, 71, 74, 86, 91] представляются в виде функциональных зависимостей между ними в определенном диапазоне, которые приведены в главе 3.

При проведении исследования были исследованы следующие режимы БЭСМ: режимы пуска, установившийся режим с отбором тепла молоку, режим торможения. Исследования тепловых режимов были рассмотрены только при работе БЭСМ при обеспечении режима сепарирования, так как сепарируемая жидкость поступает в барабан сепаратора только после «выхода» последнего на номинальный режим или режим близкий к номинальному. Режим торможения БЭСМ осуществлялся свободным выбегом ротора-барабана. Осциллограммы свободного выбега ротора-барабана приведены в п.3 (рис.3.29). Параметры режимов БЭСМ при пуске и при установившемся режиме, приведенные в табл. 2.8, получены на основе зависимостей по рис. 2.6-2.13. Указанные зависимости получены на основе данных, проведенного численного эксперимента при реализации математической модели БЭСМ. В п.3 (рис. 3.1 а, 3.1 в, 3.1 г) приведены зависимости пускового момента, пускового тока и времени пуска БЭСМ в зависимости от величины напряжения и величины частоты сети. Были проведены исследования влияния материала ротора-барабана (марки легированной стали) на регулировочные и энергетические характеристики БЭСМ.

На рис. 2.6–2.9 приведены кривые, характеризующие переходный процесс и функциональную связь между различными факторами, определяющие этот процесс в БЭСМ с завышенным и стандартным воздушным зазором, а также аналогичные характеристики при несинусоидальном питании.

Анализ кривых, приведённых на рис. 2.6–2.9 показывает, что токи в статоре и роторе изменяются по несинусоидальному закону с содержанием экспоненциальной составляющей, что объясняется протекающими в статоре и роторе переходными процессами. Сравнительный анализ кривых, приведённых на рис. 2.6–2.9, показывает, что при уменьшении воздушного зазора между статором и ротором величина пускового тока статора, токов статора и ротора при установившемся режиме снижается до 5 % и до 10%, соответственно, время переходного процесса уменьшается на 18%.

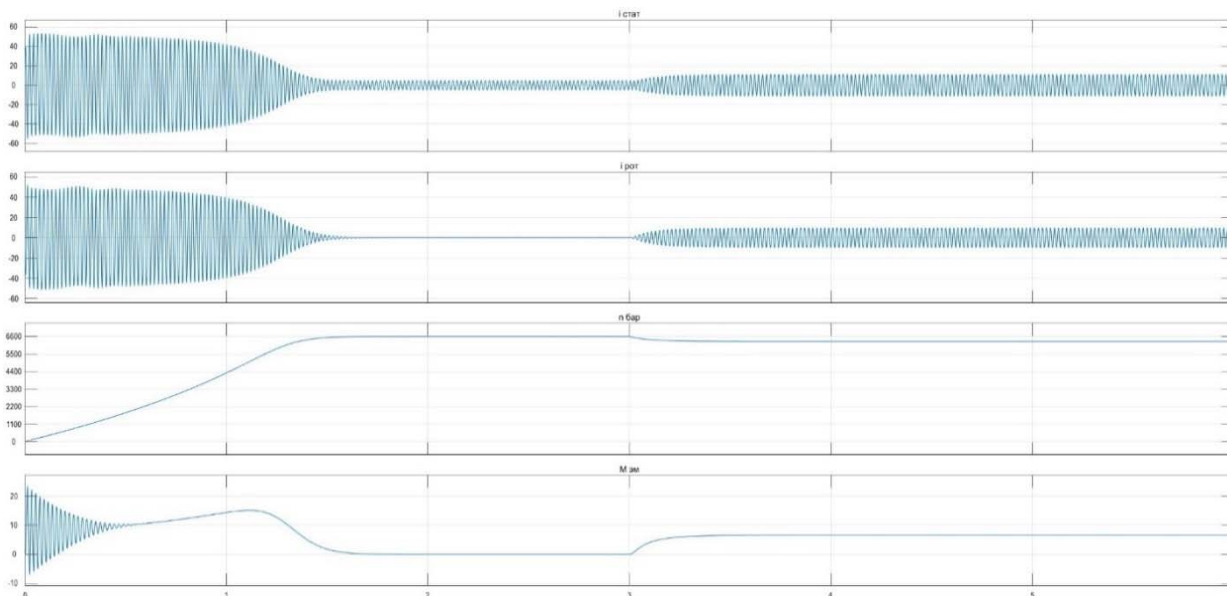


Рисунок 2.6 – Скриншот зависимостей $i_{\text{стат}}(t) = \varphi(t)$; $i_{\text{рот}}(t) = \varphi(t)$; $n_{\text{бар}} = \varphi(t)$; $M_{\text{эм}} = \varphi(t)$ для сепаратора при прямом пуске и синусоидальной форме питающего напряжения (на рис. по осям абсцисс указано время (t) в сек., по осям ординат указаны ток статора ($i_{\text{стат}}$) - в А, ток ротора ($i_{\text{рот}}$) - в А, частота вращения ротора-барабана ($n_{\text{бар}}$) - в об/мин, момент ($M_{\text{эм}}$) - в Нм)

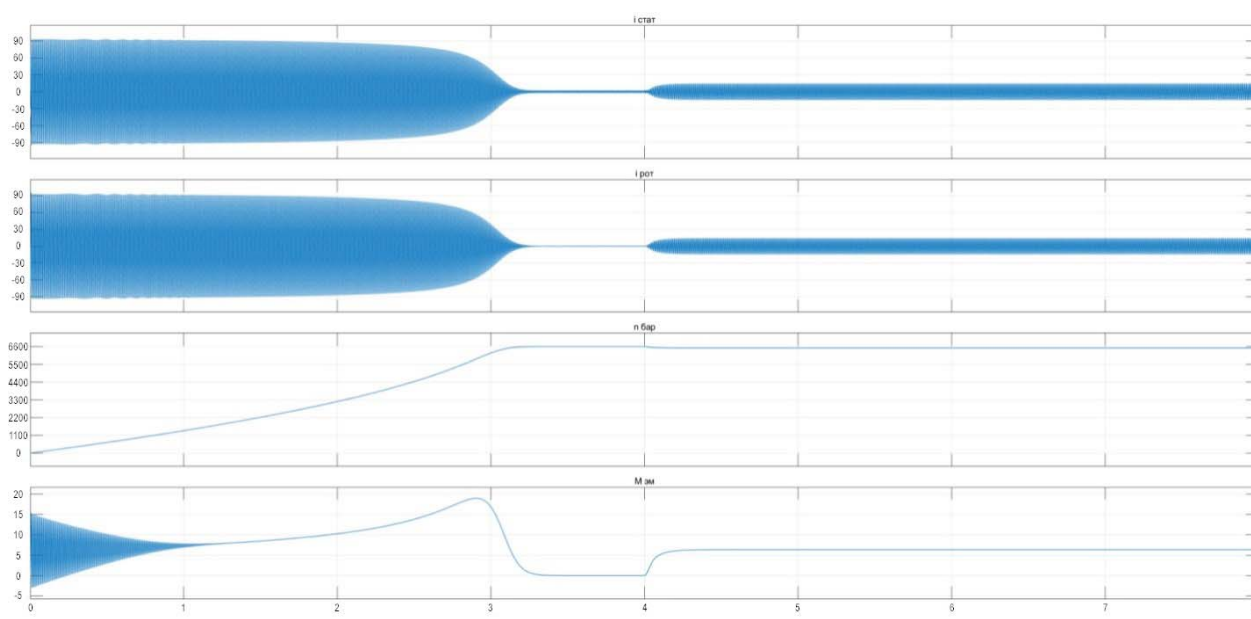


Рисунок 2.7 – Скриншот зависимостей $i_{\text{стат}}(t) = \varphi(t)$; $i_{\text{рот}}(t) = \varphi(t)$; $n_{\text{бар}} = \varphi(t)$; $M_{\text{эм}} = \varphi(t)$ для БЭСМ при завышенном воздушном зазоре между статором и ротором ($R_{\text{рот}} = 2,0 \text{ Ом}$ – марка стали Х13) при синусоидальной форме питающего напряжения (на рис. по осям абсцисс указано время (t) в сек., по осям ординат указаны ток статора ($i_{\text{стат}}$) - в А, ток ротора ($i_{\text{рот}}$) - в А, частота вращения ротора-барабана ($n_{\text{бар}}$) - в об/мин, момент ($M_{\text{эм}}$) - в Нм)

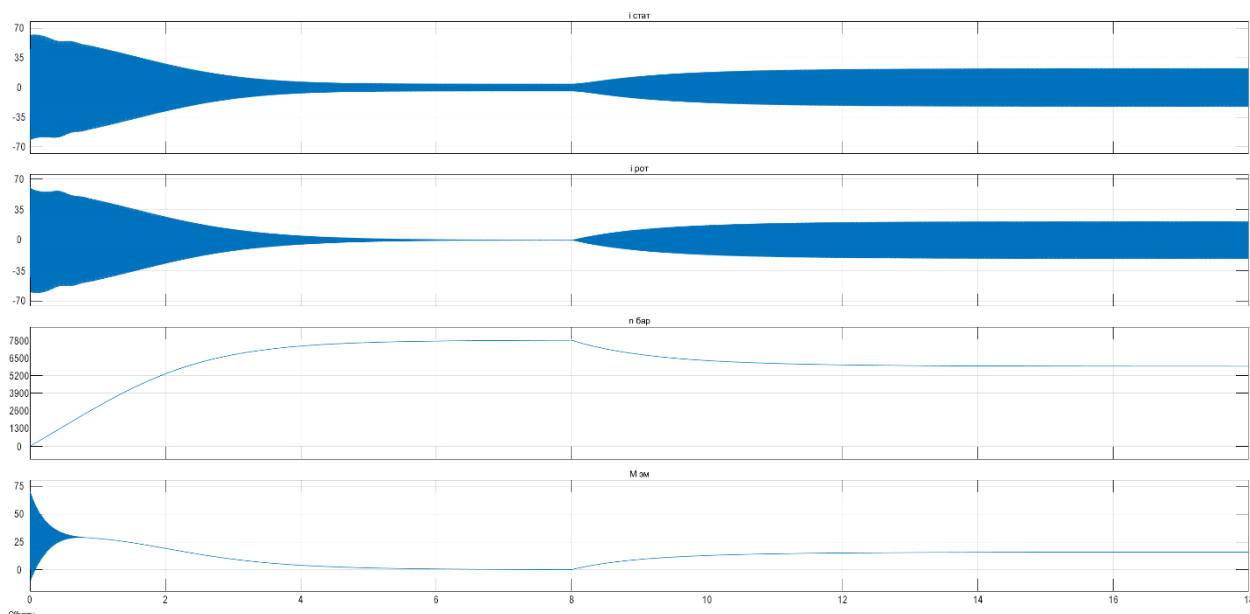


Рисунок 2.8 – Скриншот зависимостей $i_{\text{стат}}(t) = \varphi(t)$; $i_{\text{рот}}(t) = \varphi(t)$; $n_{\text{бар}} = \varphi(t)$; $M_{\text{эм}} = \varphi(t)$ для БЭСМ при уменьшенном воздушном зазоре между статором и ротором при синусоидальной форме питающего напряжения (на рис. по осям абсцисс указано время (t) в сек., по осям ординат указаны ток статора ($i_{\text{стат}}$) - в А, ток ротора ($i_{\text{рот}}$) - в А, частота вращения ротора-барабана ($n_{\text{бар}}$) - в об/мин, момент ($M_{\text{эм}}$) - в Нм)

Колебания характеристик величин $n_p(t) = \varphi(t)$ и $M(t) = \varphi(t)$ до выхода на установившиеся значения также объясняется протекающими переходными процессами и механическими колебаниями ротора. Изменения величин $n_p(t) = \varphi(t)$ и $M(t) = \varphi(t)$ носит экспоненциальный характер так как является решением дифференциальных уравнений первого порядка. Диапазон изменения момента составляет от 1,3 Нм до 17,2 Нм.

На рис. 2.10, 2.11 приведены характеристики БЭСМ при изменении величины сопротивления ротора-барабан (изменение марки легированной стали). Анализ приведённых характеристик показывает, что изменение марки легированной стали не оказывает существенного влияние на рабочие и регулировочные характеристики БЭСМ. В процессе численного эксперимента были проведены опыты (рис. 2.12, 2.13) с определением характеристик БЭСМ с двухслойным ротором (двухслойный ротор: внешний слой – это массивный ротор, внутренний слой – это короткозамкнутый ротор).

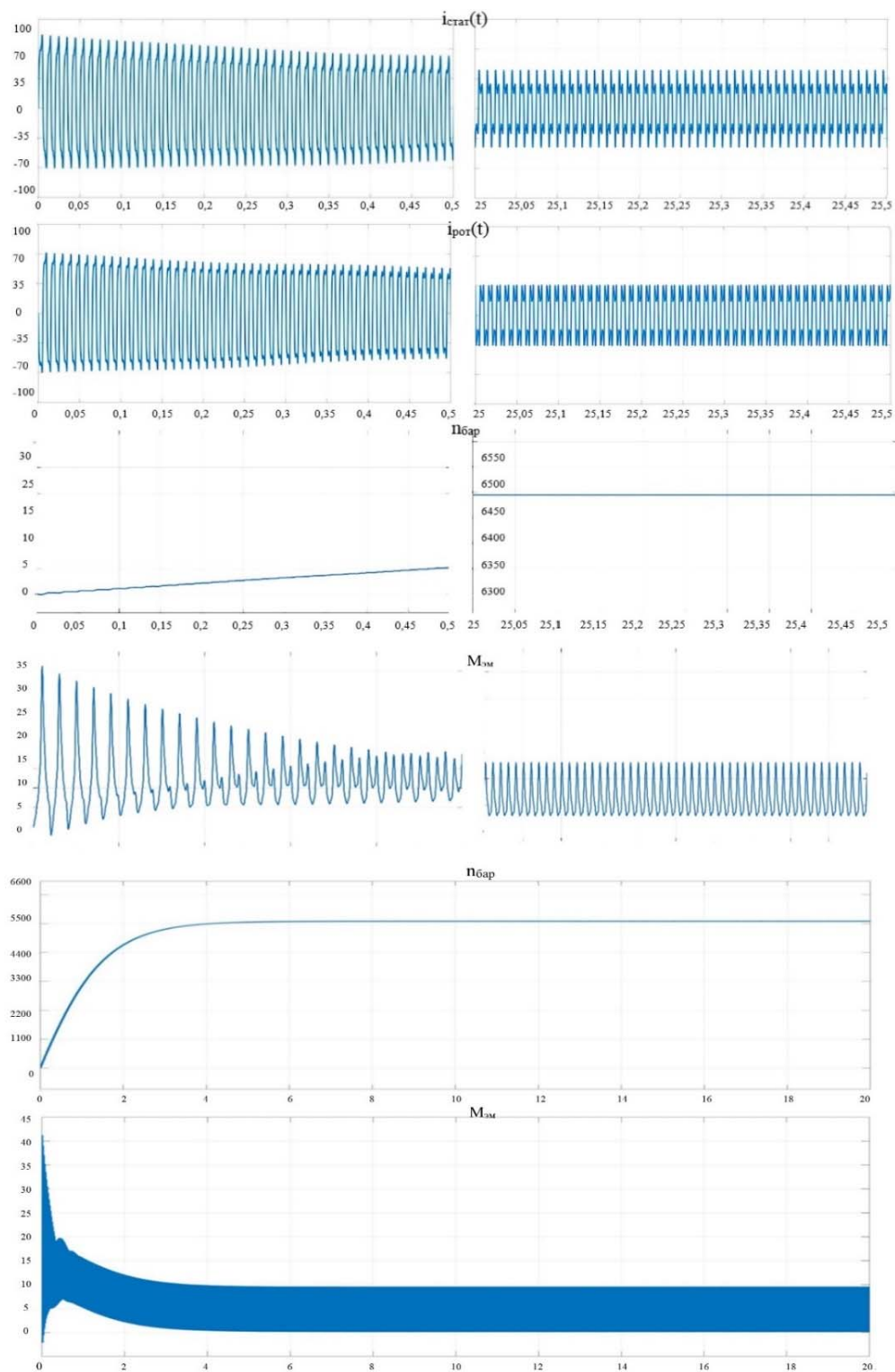


Рисунок 2.9 – Скриншот зависимостей $i_{\text{стат}}(t) = \varphi(t)$; $i_{\text{рот}}(t) = \varphi(t)$; $n_{\text{бар}} = \varphi(t)$; $M_{\text{эм}} = \varphi(t)$ для БЭСМ при завышенном воздушном зазоре между статором и ротором при не-синусоидальной форме питающего напряжения (на рис. по осям абсцисс указано время t в сек., по осям ординат указаны ток статора ($i_{\text{стат}}$) - в А, ток ротора ($i_{\text{рот}}$) - в А, частота вращения ротора-барабана ($n_{\text{бар}}$) - в об/мин, момент ($M_{\text{эм}}$) - в Нм)

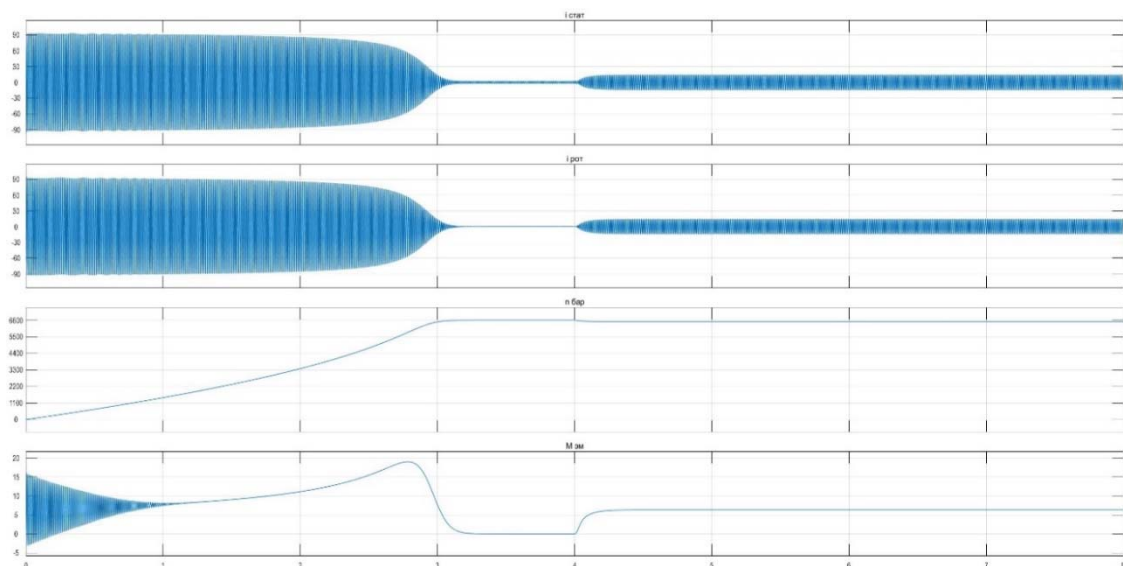


Рисунок 2.10 – Скриншот зависимостей $i_{\text{стат}}(t) = \varphi(t)$; $i_{\text{рот}}(t) = \varphi(t)$; $n_{\text{бар}} = \varphi(t)$; $M_{\text{эм}} = \varphi(t)$ для БЭСМ при завышенном воздушном зазоре между статором и ротором ($R_{\text{рот.}} = 2,05 \text{ Ом}$ – марка стали X13) при синусоидальной форме питающего напряжения для (на рис. по осям абсцисс указано время (t) в сек., по осям ординат указаны ток статора ($i_{\text{стат}}$) - в А, ток ротора ($i_{\text{рот}}$) - в А, частота вращения ротора-барабана ($n_{\text{бар}}$) - в об/мин, момент ($M_{\text{эм}}$) - в Нм)

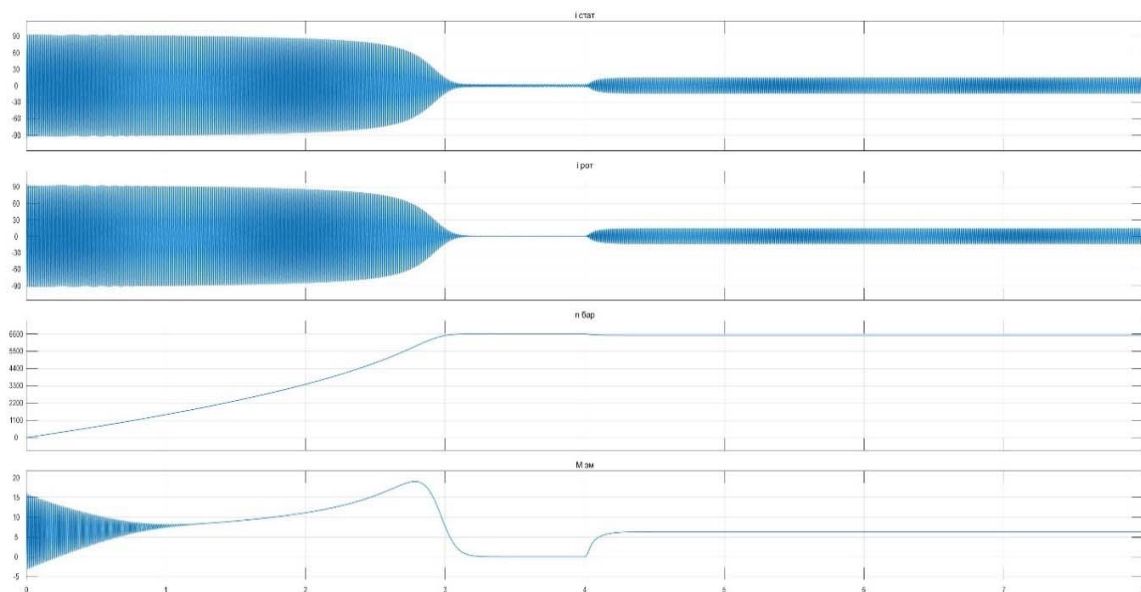


Рисунок 2.11 – Скриншот зависимостей $i_{\text{стат}}(t) = \varphi(t)$; $i_{\text{рот}}(t) = \varphi(t)$; $n_{\text{бар}} = \varphi(t)$; $M_{\text{эм}} = \varphi(t)$ для БЭСМ при завышенном воздушном зазоре между статором и ротором ($R_{\text{рот.}} = 1,95 \text{ Ом}$ – марка стали X13) при синусоидальной форме питающего напряжения для (на рис. по осям абсцисс указано время (t) в сек., по осям ординат указаны ток статора ($i_{\text{стат}}$) - в А, ток ротора ($i_{\text{рот}}$) - в А, частота вращения ротора-барабана ($n_{\text{бар}}$) - в об/мин, момент ($M_{\text{эм}}$) - в Нм)

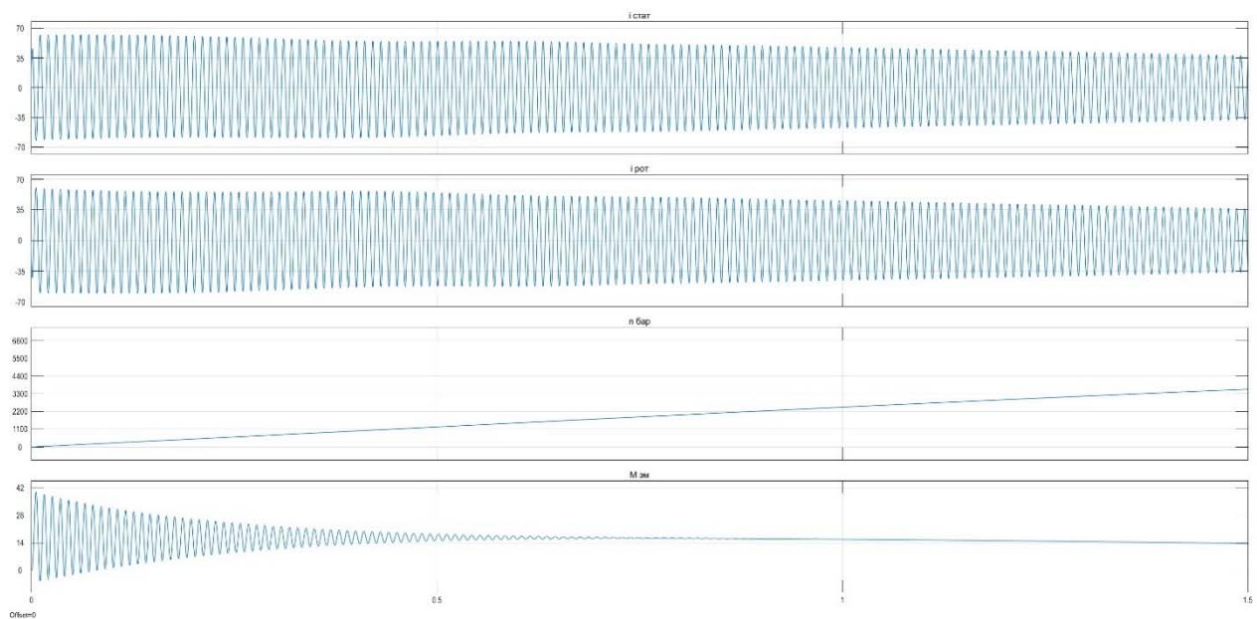


Рисунок 2.12 – Скриншот зависимостей $i_{\text{стат}}(t) = \varphi(t)$; $i_{\text{рот}}(t) = \varphi(t)$; $n_{\text{бар}} = \varphi(t)$; $M_{\text{эм}} = \varphi(t)$ для БЭСМ с двухслойным при синусоидальной форме питающего напряжения при переходном процессе (на рис. по осям абсцисс указано время (t) в сек., по осям ординат указаны ток статора ($i_{\text{стат}}$) - в А, ток ротора ($i_{\text{рот}}$) - в А, частота вращения ротора-барабана ($n_{\text{бар}}$) - в об/мин, момент ($M_{\text{эм}}$) - в Нм)

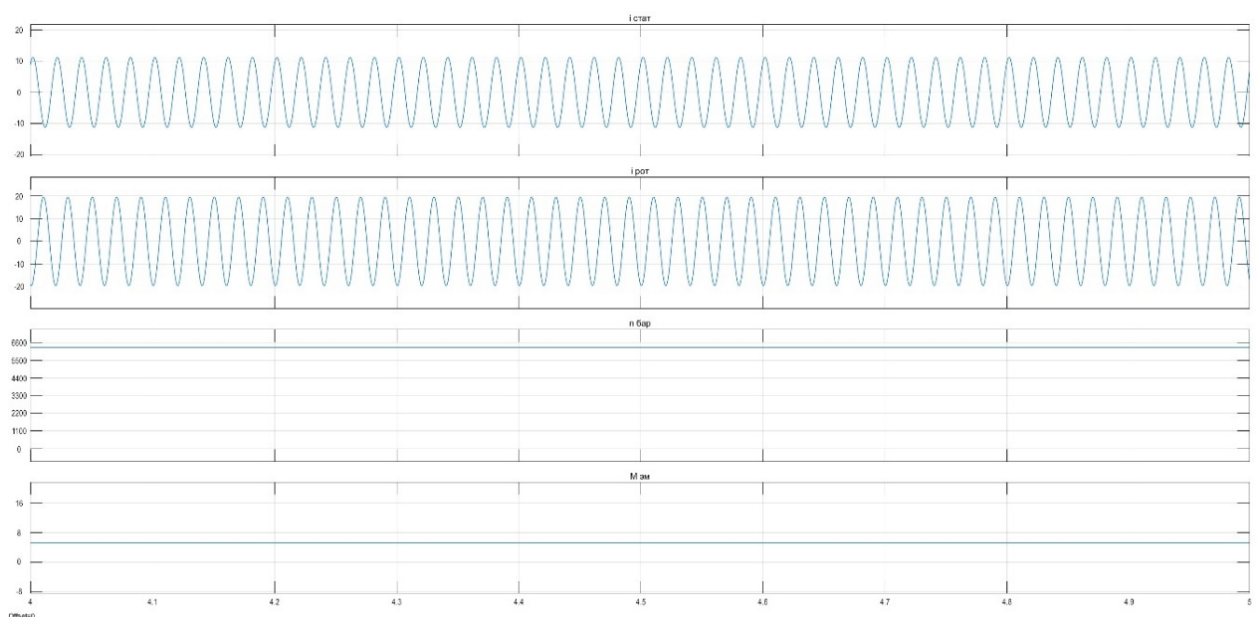


Рисунок 2.13– Скриншот зависимостей $i_{\text{стат}}(t) = \varphi(t)$; $i_{\text{рот}}(t) = \varphi(t)$; $n_{\text{бар}} = \varphi(t)$; $M_{\text{эм}} = \varphi(t)$ для БЭСМ с двухслойным при синусоидальной форме питающего напряжения при установившемся режиме (на рис. по осям абсцисс указано время (t) в сек., по осям ординат указаны ток статора ($i_{\text{стат}}$) - в А, ток ротора ($i_{\text{рот}}$) - в А, частота вращения ротора-барабана ($n_{\text{бар}}$) - в об/мин, момент ($M_{\text{эм}}$) - в Нм)

Снижение как пускового тока, так и тока, потребляемого обмоткой статора в процессе сепарирования, влечет за собой снижение энергопотребления электроприводом сепаратора.

Сравнение осциллограмм для однослойного ротора (рис. 2.6-2.19) и двухслойного ротора (рис. 2.12, 2.13)) позволяет сделать вывод о том, что наличие внутреннего короткозамкнутого слоя ротора приводит к снижению величин установившихся токов статора и ротора на 27 %, повышению установившегося числа оборотов ротора при номинальном моменте на 13%.

Результаты численного эксперимента, представленные на рис. 2.6-2.13, приведены в табл. 2.2. При проведении численного эксперимента за базовые параметры приняты электромеханические параметры сепараторов с мощностью приводного двигателя 4,0 кВт (ручная выгрузка осадка) и 7,5 кВт (автоматическая выгрузка осадка). Пусковой ток у БЭСМ значительно выше, чем у классического сепаратора (при завышенном воздушном зазоре: 91,4 – 94,5 А, при уменьшенном воздушном зазоре: 65,3 – 66,6 А, при увеличении мощности до 7,5 кВт: 123,2 – 172,4 А). Во всех случаях частота вращения составляет 6500 об/мин. Уменьшение воздушного зазора позволяет снизить пусковой ток, однако при этом уменьшается и максимальный момент. Кроме того, это усложняет конструкцию сепаратора. Максимальный момент у БЭСМ выше, чем у классического сепаратора (при завышенном воздушном зазоре: 16,56–19,35 Н·м, при уменьшенном воздушном зазоре: 16,17–29,85 Н·м, при мощности 7,5 кВт: 29,85–30,52 Н·м). Уменьшение воздушного зазора незначительно снижает максимальный момент.

Изменение сопротивления ротора (195–205 Ом) незначительно влияет на характеристики. Использование БЭСМ позволяет получить более высокие моменты с учетом повышенных пусковых токов, которые возможно снизить с применением функции плавного пуска преобразователя частоты. Несинусоидальное напряжение ухудшает характеристики, хотя и приводит к незначительному увеличению пускового тока и максимального момента.

Таблица 2.2 – Результаты численного эксперимента

Тип привода	Исходные данные				Численный эксперимент				
	U, В	f, Гц	P ₂ , кВт	Форма напряжения	i _{пуск} , А	i _{уст} , А	n _{уст} , об/мин	M _{max} , Нм	M _{уст} , Нм
Сепаратор классической конструкции	220	50	4,0	Синусоидальное	51,0	7,4	6500	12,71	5,53
БЭСМ при завышенном воздушном зазоре (R _{рот.} = 200 Ом – марка стали Х13)	220	114,6	4,0	Синусоидальное	91,4	15,4	6500	16,56	7,20
БЭСМ при уменьшенном воздушном зазоре (R _{рот.} = 200 Ом – марка стали Х13)	220	114,6	4,0	Синусоидальное	65,3	11,8	6500	16,17	7,03
БЭСМ при завышенном воздушном зазоре (R _{рот.} = 200 Ом – марка стали Х13)	220	114,6	7,5	Синусоидальное	172,4	28,8	6500	30,52	13,27
БЭСМ при уменьшенном воздушном зазоре (R _{рот.} = 200 Ом – марка стали Х13)	220	114,6	7,5	Синусоидальное	123,2	22,1	6500	29,85	12,98
БЭСМ при завышенном воздушном зазоре (R _{рот.} = 200 Ом – марка стали Х13)	220	114,6	4,0	Несинусоидальное	94,5	20,4	6500	19,35	8,41
БЭСМ при завышенном воздушном зазоре (R _{рот.} = 205 Ом – марка стали Х13)	220	114,6	4,0	Синусоидальное	91,5	15,2	6500	16,66	7,24
БЭСМ при завышенном воздушном зазоре (R _{рот.} = 195 Ом – марка стали Х13)	220	114,6	4,0	Синусоидальное	91,4	15,2	6500	16,66	7,24
БЭСМ с двухслойным ротором	220	114,6	4,0	Синусоидальное	66,6	7,5	6500	16,56	5,53

*отличия сопротивлений ротора объясняются разными удельными сопротивлениями нержавеющей стали марки Х13 при производстве ее на различных предприятиях

Результаты численного эксперимента, позволяющие определить и оценить влияние параметров сети (действующего значения напряжения сети, частоты напряжения сети) и плотности сепарируемой жидкости на частоту вращения ротора-барабана, момент БЭСМ, энергетические параметры БЭСМ приведены в разделе 3.

2.4 Энергетические характеристики безредукторного электропривода сепаратора молока

Для определения эффективности применения, исследуемого БЭСМ (рис. 2.1, 2.2, 2.3) проведена сравнительная оценка энергетических характеристик (η , $\cos\varphi_1$) этого БЭСМ с энергетическими характеристиками электроприводов серийных сепараторов.

КПД (η) БЭСМ определяется:

$$\eta = \frac{P_{2fp.sp} + P_{2sm} + P_{2h}}{P_{1fp} + P_{1sm}/\eta_{fc} + P_{1h}} \quad (2.25)$$

где P_{1fp} – потребляемая мощность насоса, подающего сепарируемую жидкость в сепаратор; P_{1sm} – потребляемая мощность электродвигателя БЭСМ, приводящего во вращение барабан сепаратора молока с безредукторным электроприводом; P_{1h} – потребляемая мощность внешним подогревателем; η_{fc} – КПД преобразователя частоты (при наличии); $P_{2fp.sp}$ – мощность потока сепарируемой жидкости; P_{2sm} – мощность на валу барабана сепаратора; P_{2h} – мощность подогрева сепарируемой жидкости за счет тепловыделений в БЭСМ.

В отличие от существующих формул для расчета КПД электроприводов [46, 84] в формуле 2.25 в качестве полезной мощности при расчете КПД БЭСМ мощность тепловыделений в обмотке статора, магнитопроводе статора, роторе-барабане, рассматривается не как мощность потерь, а как полезная

мощность, поскольку она идет на подогрев сепарируемого продукта, и поэтому она перенесена в числитель.

Компоненты потребляемой мощности БЭСМ по (2.25) определяются следующими выражениями:

$$P_{1fp} = \frac{P_{2fp.sp}}{\eta_p \cdot \eta_{pm}}, \quad (2.26)$$

где $P_{2fp.sp}$ – мощность потока сепарируемой жидкости на выходе из барабана сепаратора; η_p – КПД данного насоса; η_{pm} – КПД электродвигателя, приводящего в движение насос для подачи сепарируемой жидкости в барабан сепаратора.

$$P_{1sm} = \frac{P_{2sm}}{\eta_{sm} \cdot \eta_{red}}, \quad (2.27)$$

где P_{2sm} – мощность на валу барабана сепаратора; η_{sm} – КПД электродвигателя БЭСМ; η_{red} – КПД конической передачи (только для классического центробежного сепаратора).

$$P_{1sm} = 3 \cdot I_{s.cp} \cdot U_p \cdot \cos \varphi_{1cp} \quad (2.28)$$

где $I_{s.cp}$ – среднее значение фазных токов в обмотке статора; U_p – среднее значение фазных напряжений; $\cos \varphi_{1cp}$ – среднее значение коэффициента мощности по фазам.

$$P_{1h} = \frac{c_{sp} \cdot \rho_{sp} \cdot V_{sp} \cdot \Delta T_h}{\eta_h}, \quad (2.29)$$

c_{sp} – удельная теплоемкость сепарируемой жидкости; ρ_{sp} – плотность сепарируемой жидкости; V_{sp} – объем сепарируемой жидкости, проходящей через подогреватель; $\Delta T_h = T_{sep} - T_{ih}$ – разность температур, на которую нужно предварительно подогреть сепарируемую жидкость во внешнем подогревателе перед процессом сепарирования (T_{sep} – температура сепарирования жидкости, T_{ih} – начальная температура сепарируемой жидкости на входе в подогреватель); η_h – КПД внешнего подогревателя (принято в размере 0,95).

Для серийных сепараторов ΔT_h определяется исходя из того, что $T_{ih}=T_0$ (исходная температура сепарируемой жидкости).

Для исследуемого БЭСМ $T_{ih}=T_{s.sp}$, т.е. температура сепарируемой жидкости на входе в подогреватель соответствует температуре на выходе из труб, опоясывающих статор, после ее частичного подогрева.

В связи с тем, что в роторе-барабане сепаратора с безредукторным электроприводом происходит частичный подогрев сепарируемой жидкости, поэтому для БЭСМ $\Delta T_h=T_{sep}-\Delta T_{r.sp}-T_{s.sp}$.

Компоненты полезной мощности по (2.25) определяются следующими выражениями.

$$P_{2sm} = M_C \cdot \omega_{r.nom}, \quad (2.30)$$

где M_C – момент сопротивления роторе-барабане; $\omega_{r.nom}$ – номинальная частота вращения ротора-барабана сепаратора.

$$P_{2fp.cp} = \rho_{sp} \cdot Q_{sp} \cdot H_{sp} \cdot g, \quad (2.31)$$

где ρ_{sp} – плотность сепарируемой жидкости; Q_{sp} – объем подачи сепарируемой жидкости; H_{sp} – напор насоса; g – ускорение свободного падения.

$$P_{2h} = c_{sp} \cdot \rho_{sp} \cdot V_{sp} \cdot \Delta T_h, \quad (2.32)$$

где ΔT_h – разность температур, на которую нужно предварительно подогреть сепарируемую жидкость во внешнем подогревателе перед процессом.

Для сравнительной оценки энергетических характеристик электроприводов сепараторов выполнены расчеты параметров асинхронных электродвигателей различной конструкции [55] при условии: одинаковой мощности на валу и одинаковой частоты вращения барабана сепаратора. Рассчитаны параметры асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором с нормальным воздушным зазором и воздушным зазором, увеличенным вдвое. Также рассчитаны параметры асинхронных двигателей с массивным ротором с нормальным воздушным зазором и увеличенным вдвое при частоте питающего напряжения 100 Гц для асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором и 114 Гц для асинхронного двигателя с массивным ротором. Расчеты параметров

приведены в приложении А. Расчет параметров электропривода, исследуемого БЭСМ приведен в приложении Б.

В таблице 2.3 приведены расчеты основных и массогабаритных параметров электродвигателей мощностью 4 кВт (вариант без учета охлаждения статора молоком двигателя – сепаратора (Д - С) и с конструкцией разработанного БЭСМ) и 7,5 кВт. Результаты расчета показывают, что вариант с использованием БЭСМ имеет лучшие массо-габаритные показатели в сравнении с Д-С за счет снижения сечения проводников, уменьшения длины магнитопровода.

Таблица 2.3 – Результаты расчета основных параметров БЭСМ

Параметр электродвигателя	Мощность приводного электродвигателя		
	4 кВт (Д-С)	4 кВт (БЭСМ)	7,5 кВт (БЭСМ)
Внутренний диаметр статора: D , м	0,403	0,403	0,403
Расчетная длина магнитопровода: l_{δ} , м	0,033	0,03	0,045
индукция в воздушном зазоре: B_{δ} , Тл	0,77	0,76	0,81
Номинальный ток статора, А	12,7	12,3	18,2
Сопротивление обмотки статора, Ом	1,09	1,19	0,45
Индуктивное сопротивление обмотки статора, Ом	11,5	11,0	13,5
Сопротивление ротора, приведенное к обмотке статора Ом	0,416	0,432	0,27
Индуктивное сопротивление ротора, приведенное к обмотке статора, Ом	0,45	0,43	0,58
Длина проводников фазы обмотки: L_1 , м.	93,2	91,2	118,1
Средняя длина витка: l_{cp} , м	1,48	1,42	1,87
Удельная материалоемкость, кг/кВт	8	7,07	4,88
Масса, кг	32	28,3	36,6

Таким образом для разрабатываемого БЭСМ необходимо меньше обмоточного провода, что удешевляет стоимость установки. Кроме того, в конструкции БЭСМ отсутствует крыльчатка для дополнительного охлаждения.

В табл. 2.3, 2.4 и на рис. 2.14 а и 2.14 б приведены, в сравнении, значения КПД, $\cos \varphi$ и $K_{\text{эн}}$ ($K_{\text{эн}} = \text{КПД} \times \cos \varphi$ – энергетический коэффициент) для сепараторных установок на базе серийных электроприводов классической конструкции, сепараторных установок на базе серийных безредукторных электроприводов, сепараторной установки на базе исследуемого БЭСМ (на основе результатов расчетов, сведенных в табл. 2.3, 2.4). На рис. 2.14 а, 2.14 б $\cos \varphi$ принят для электропривода сепаратора.

Таблица 2.4 – Результаты расчета компонентов мощности сепараторных установок с двигателем 4 кВт.

Потребители электроэнергии сепараторной установки	Тип привода сепараторной установки		
	Серийный электропривод классической конструкции	Серийный безредукторный электропривод	Исследуемый БЭСМ
	P_1 , кВт	P_1 , кВт	P_1 , кВт
Привод барабана сепаратора	4,79	4,61	6,01
Привод насоса подачи продукта сепарирования	0,17	0,17	0,17
Электрический подогрев продукта сепарирования	49,32	49,32	47,49
ИТОГО:	54,28	54,1	53,67
Масса, кг.	407	395	391,3
Удельная материалоемкость, кг/кВт	7,50	7,30	7,29
КПД установки	0,948	0,951	0,962

Таблица 2.5 – Результаты расчета компонентов мощности сепараторных установок с двигателем 7,5 кВт.

Потребители электроэнергии сепараторной установки	Тип привода сепараторной установки		
	Серийный электропривод классической конструкции	Серийный безредукторный электропривод	Исследуемый БЭСМ
	P_1 , кВт	P_1 , кВт	P_1 , кВт
Привод барабана сепаратора	8,25	8,06	10,04
Привод насоса подачи продукта сепарирования	0,17	0,17	0,17
Электрический подогрев продукта сепарирования	49,32	49,32	47,01
ИТОГО:	57,74	57,55	57,22
Масса, кг.	772	761	749,6
Удельная материалоемкость, кг/кВт	13,37	13,22	13,10
КПД установки	0,948	0,951	0,983

Таким образом численный эксперимент показал:

- применение сепараторных установок на базе серийных безредукторных электроприводов (с приводным электродвигателем мощностью 4,0 кВт) по сравнению с применением сепараторных установок на базе серийных электроприводов классической конструкции позволяет повысить энергетические показатели КПД и $\cos \varphi$ на 0,34 % и 13,1%, соответственно (табл. 2.3, 2.4, рис. 2.14 а и б);

- применение сепараторных установок на базе серийных безредукторных электроприводов БЭСМ (с приводным электродвигателем мощностью 4,0 кВт) по сравнению с применением сепараторных установок на базе серийных электроприводов классической конструкции позволяет повысить энергетические показатели КПД на 1,46 % и $\cos \varphi$ на 13,1%, а по сравнению с

применением сепараторных установок на базе серийных безредукторных электроприводов – КПД на 1,12 % при неизменном $\cos \varphi$ (табл. 2.3, 2.4, рис. 2.14 а и б);

Таблица 2.6 - Результаты расчета потерь энергии в элементах конструкции исследуемого электропривода БЭСМ

Виды потерь	Мощность приводного электродвигателя					
	4 кВт			7,5 кВт		
	ΔP		ΔT град	ΔP		ΔT град
	% от потр. мощн.	кВт		% от потр. мощн.	кВт	
Потери в обмотке статора	12,04	0,73	0,211	10,18	1,05	0,3
Потери в магнитопроводе статора (потери на вихревые токи и на перемагничивание сердечника статора)	1,6	0,1	0,028	3,0	0,31	0,089
Потери в роторе-барабане	19,55	1,18	0,34	11,53	1,18	0,34
Итого:		2,01	0,58		2,54	0,73

- замена в сепараторных установках серийного электропривода классической конструкции (с приводным электродвигателем мощностью 4,0 кВт) на исследуемый БЭСМ позволяет получить прирост КПД сепараторных установок в 4,36 раз больше, чем прирост КПД при замене электропривода классической конструкции на серийный безредукторный электропривод;

- применение сепараторных установок на базе серийных безредукторных электроприводов (с приводным электродвигателем мощностью 7,5 кВт) по сравнению с применением сепараторных установок на базе серийных электроприводов классической конструкции позволяет повысить энергетические

показатели КПД и $\cos \varphi$ на 0,34 % и 13,1%, соответственно (табл. 2.3, 2.4, рис. 2.14 а и б);

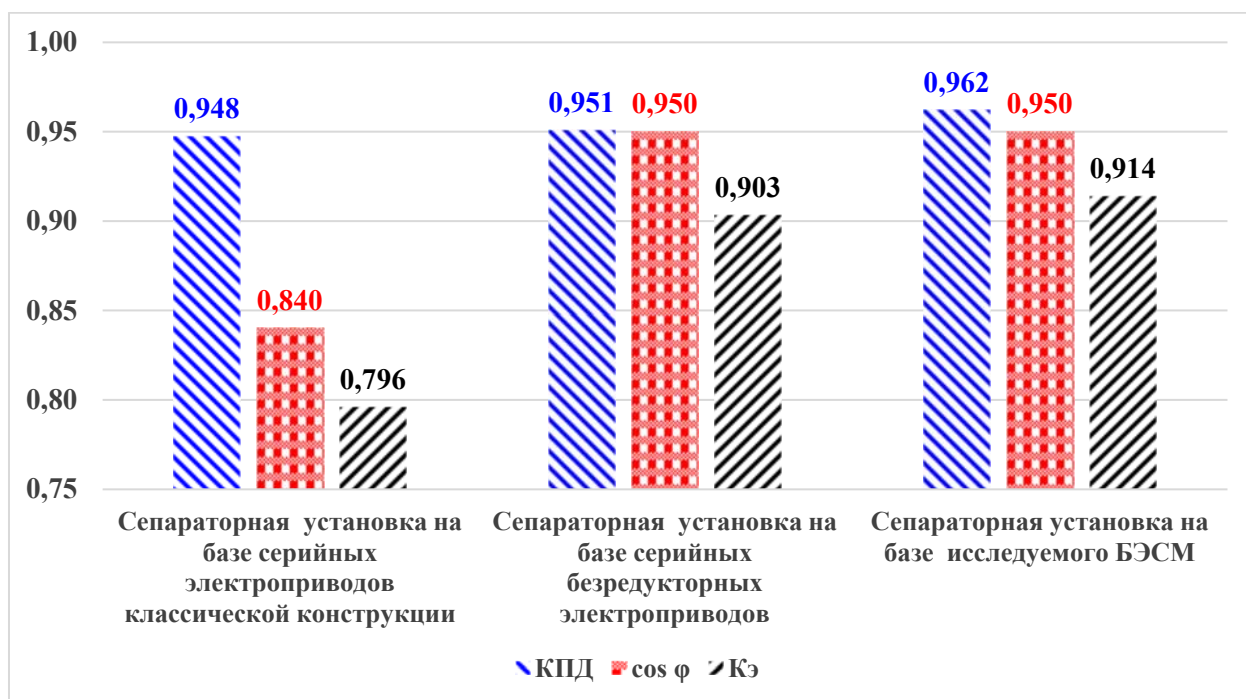


Рисунок 2.14 а – Энергетические показатели сепараторных установок на базе приводного электродвигателя мощностью 4 кВт

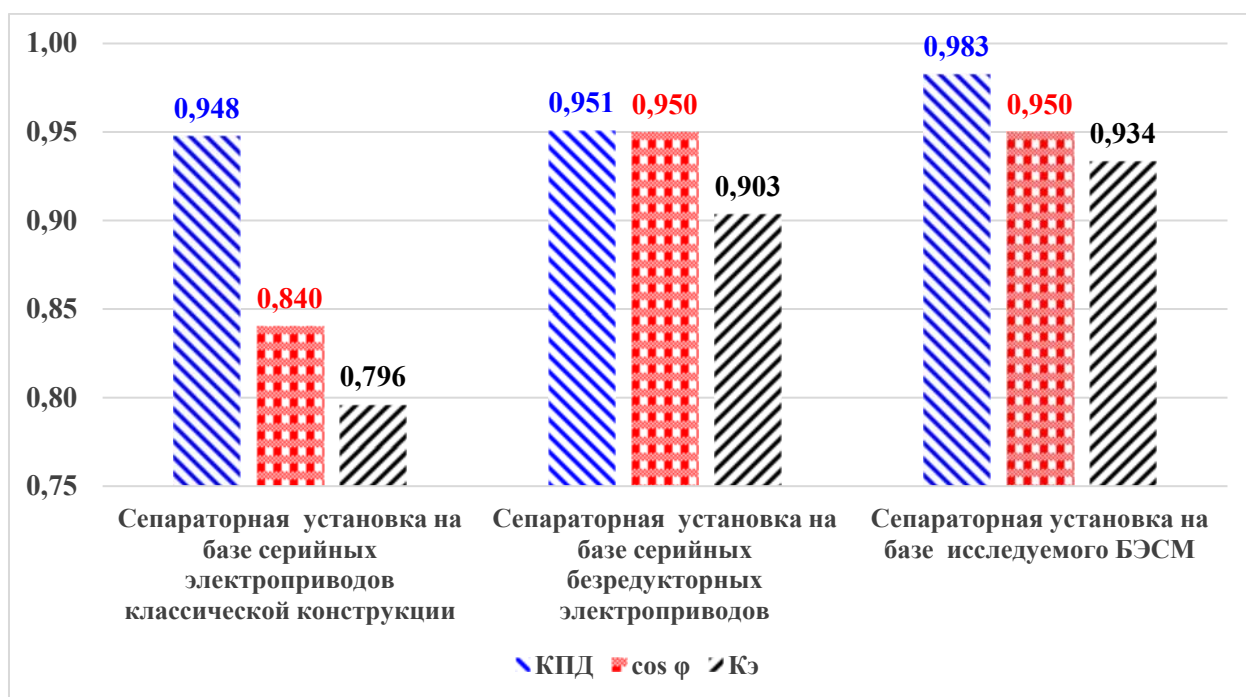


Рисунок 2.14 б – Энергетические показатели сепараторных установок на базе приводного электродвигателя мощностью 7,5 кВт

- применение сепараторных установок на базе серийных безредукторных электроприводов БЭСМ (с приводным электродвигателем мощностью 7,5 кВт) по сравнению с применением сепараторных установок на базе серийных электроприводов классической конструкции позволяет повысить энергетические показатели КПД на 3,53 % и $\cos \varphi$ на 13,1, а по сравнению с применением сепараторных установок на базе серийных безредукторных электроприводов – КПД на 3,19 % при неизменном $\cos \varphi$ (табл. 2.3, 2.4, рис. 2.14 а и б);

- замена в сепараторных установках серийного электропривода классической конструкции (с приводным электродвигателем мощностью 7,5 кВт) на исследуемый БЭСМ позволяет получить прирост КПД сепараторных установок в 10,5 раз больше, чем прирост КПД при замене электропривода классической конструкции на серийный безредукторный электропривод.

В разработанной методике определения КПД сепараторной установки (формулы 2.26 а -2.32) учтены температуры подогрева сепарируемой жидкости как в элементах БЭСМ (значения $\Delta T_{г.sp}, T_{с.sp}$), так и подогрев жидкости во внешнем подогревателе (ΔT_h), а также учтена мощность оттока жидкости, проходящей через барабан сепаратора ($P_{2fp.sp}$).

2.5 Разработка конструкции перспективного сепаратора с безредукторным электроприводом на базе двигателя с двухслойным ротором-барабаном

Для уменьшения диапазона изменения скорости вращения ротора-барабана двигателя сепаратора при изменении момента его нагрузки при одновременном сохранении высокого пускового момента, присущего асинхронным двигателям с массивным ротором, и увеличения КПД и $\cos \varphi_1$ двигателя для

электропривода сепаратора разработана конструкция, общий вид которой представлен на рис. 2.15.

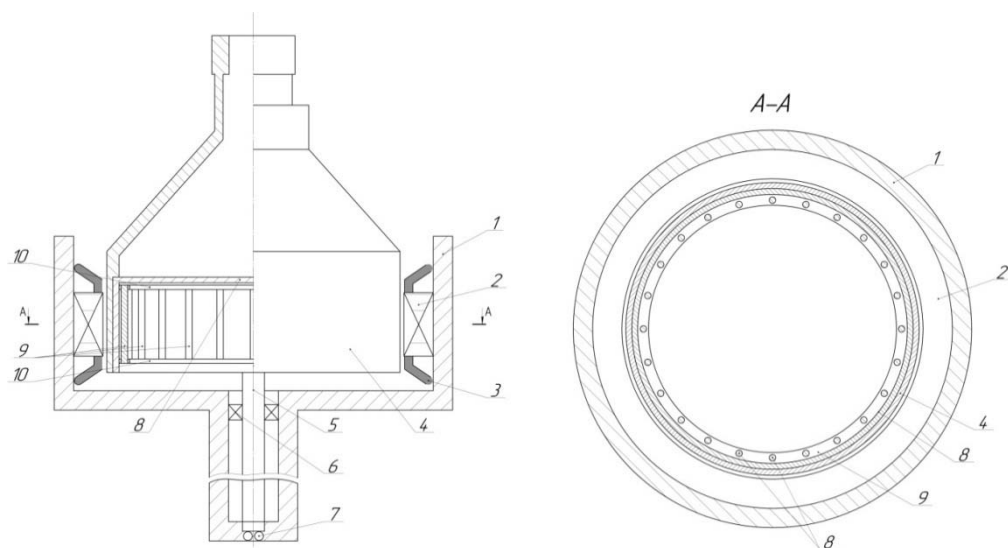


Рисунок 2.15 – Конструкция сепаратора с безредукторным электроприводом на базе двигателя с двухслойным ротором-барабаном

Сепаратор содержит корпус 1, статор и ротор 6 двигателя сепаратора из электропроводящего, немагнитного материала, выполненный в виде барабана сепаратора. Статор содержит цилиндрический магнитопровод 2, в пазы которого уложена обмотка 3. В лобовых частях обмотки 3 размещены трубки 4 для охлаждения статора и подогрева сепарируемого продукта, замоноличенные компаундом 5. Ротор 6 жестко закреплен на оси 7, установленной в подшипниковых опорах 8 и 9, с возможностью вращения.

С внутренней стороны барабана сепаратора, в нижней его части параллельно оси его вращения установлены на равном расстоянии токопроводящие ферромагнитные стержни 11, соединённые сверху и снизу токопроводящими короткозамыкающими ферромагнитными кольцами 10, образующими короткозамкнутый ротор. Таким образом, ротор двигателя сепаратора представляет собой двухслойный ротор-барабан, содержащий массивную часть и короткозамкнутую часть.

Количество токопроводящих ферромагнитных стержней n_2 должно быть равно количеству пазов ротора Z_2 . Согласно [55] допускается, чтобы количество пазов ротора Z_2 было равно количеству пазов статора Z_1 ($Z_2=Z_1$).

В соответствии с [55] количество пазов статора Z_1 определяется по формуле:

$$Z_1 = \pi \cdot D / t_{z1} \quad Z_1 = \pi \cdot D t_{z1} \quad (2.33)$$

где D – внутренний диаметр статора, t_{z1} – зубцовое деление статора, определяемое по [55, рис. 9.26.]. Внутренний диаметр статора D отличается от диаметра ротора-барабана D_r только на двойную величину воздушного зазора δ (рис. 2.15, сечение А-А). Так как величина воздушного зазора δ по [55] не превышает 2 мм, то принимаем что $D=D_r$. Тогда формула для определения количества токопроводящих ферромагнитных стержней примет вид:

$$N_2 = \pi \cdot D_r / t_{z1} \quad n_2 = \pi \cdot D_r t_{z1} \quad (2.34)$$

Так, к примеру, при диаметре нижней части ротора-барабана сепаратора $D_r = 0,402$ м и зубцовом делении статора $t_{z1}=0,015$ м, определенному по [55, рис. 9.26], количество токопроводящих ферромагнитных стержней $N_2 = 84$ стержней. Количество токопроводящих ферромагнитных стержней должно быть не менее 6 стержней. Так как для трехфазной обмотки минимальное количество пазов на полюс и фазу равно 1 ($q = 1$), то при количестве фаз – 3 ($m = 3$) и количестве пар полюсов – 1 ($p = 1$), минимальное количество токопроводящих ферромагнитных стержней определяем согласно [55] по формуле:

$$Z_1 = N_{2\min} = q \cdot m \cdot 2p = 1 \cdot 3 \cdot 2 = 6 \text{ стержней.} \quad (2.35)$$

Электропривод на базе двигателя с двухслойным ротором-барабаном работает следующим образом. При подаче напряжения на обмотку 3, уложенную в пазы цилиндрического магнитопровода 2, в ней протекает электрический ток, создающий вращающееся магнитное поле. Это поле наводит вихревые токи в массивной части установленного в корпусе 1 в подшипниковых опорах 8 и 9 ротора-барабана 6. Взаимодействие вращающегося магнитного поля, созданного током, протекающим в обмотке 3, и магнитного поля, созданного

вихревыми токами в массивной части ротора-барабана 6, приводит к возникновению вращающего момента, под действием которого ротор-барабан 6, приходит во вращение вокруг своей центральной оси. С увеличением скорости вращения ротора-барабана 6 происходит уменьшение скольжения s , определяемого по формуле:

$$s = (n_1 - n) / n_1, \quad (2.36)$$

где n – частота вращения ротора асинхронного двигателя, об/мин; n_1 – синхронная частота вращения магнитного поля.

Это приводит к уменьшению частоты f_2 вихревых токов, протекающих в роторе-барабане 6, определяемой по формуле:

$$f_2 = f_1 \cdot s \quad (2.37)$$

где f_1 – частота питающей сети, s – скольжение.

Это в свою очередь приводит к увеличению глубины проникновения электромагнитной волны, определяемой по формуле [27]:

$$\Delta = \sqrt{\frac{2}{\mu \cdot \gamma \cdot 2\pi \cdot f}}, \quad (2.38)$$

где μ – магнитная проницаемость материала, γ – удельная проводимость материала, f_2 – частота вихревых токов, протекающих в массивной части ротора-барабана.

Механическая характеристика двигателя с двухслойным ротором-барабаном для безредукторного электропривода сепаратора представлена на рис. 2.16.

На рис. 2.16 обозначено: 1 – механическая характеристика асинхронного двигателя с массивным ротором, 2 – механическая характеристика асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором; 3 – механическая характеристика асинхронного двигателя с двухслойным ротором-барабаном; ΔM – изменение момента нагрузки двигателя; Δn_1 – изменение скорости вращения массивного ротора асинхронного двигателя при изменении момента нагрузки ΔM ;

Δn_2 – изменение скорости вращения короткозамкнутого ротора асинхронного двигателя при изменении момента нагрузки ΔM ; Δn_3 – изменение частоты вращения двухслойного ротора-барабана двигателя разработанного сепаратора при изменении момента нагрузки ΔM .

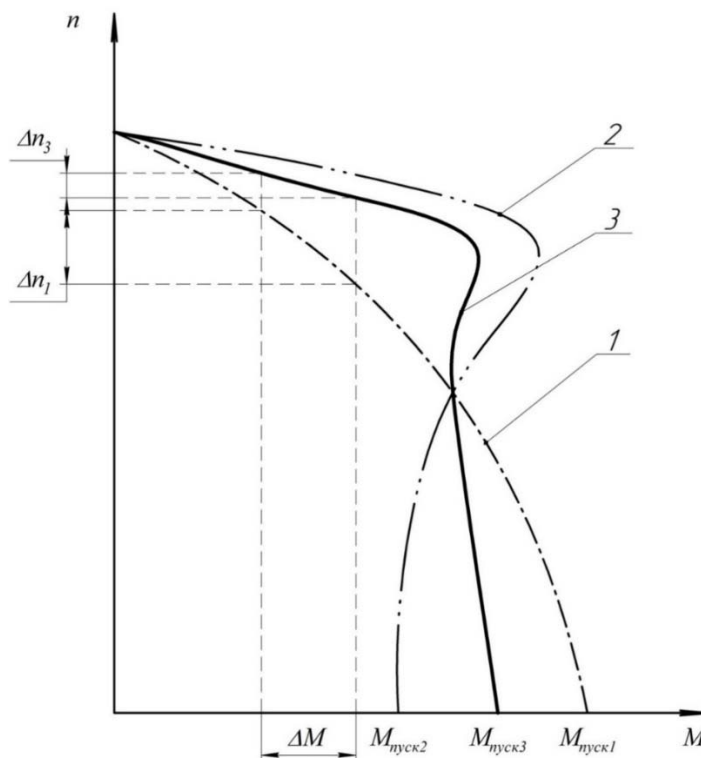


Рисунок 2.16 – Механическая характеристика двигателя с двухслойным ротором-барабаном для безредукторного электропривода сепаратора

В результате увеличения глубины проникновения электромагнитной волны вращающееся магнитное поле, создаваемое током, протекающим в обмотке 3 (рис. 2.15), уложенной в пазы цилиндрического магнитопровода 2 статора, наводит ЭДС и в токопроводящих ферромагнитных стержнях 11. Так как эти стержни короткозамкнуты токопроводящими ферромагнитными кольцами 10, то в токопроводящих ферромагнитных стержнях 11 будет протекать электрический ток.

Таким образом, электромагнитный момент двигателя сепаратора с двухслойным ротором-барабаном (рис. 2.15) определяется по формуле:

$$M = k_1 M_1 + k_2 M_2, \quad (2.39)$$

где M_1 – электромагнитный момент, создаваемый массивной (пусковой) частью двухслойного ротора-барабана (рис. 2.16, кривая 1); M_2 – электромагнитный момент, создаваемый короткозамкнутой (рабочей) частью двухслойного ротора-барабана (рис. 2.16, кривая 2); k_1, k_2 – переменные коэффициенты, зависящие от глубины проникновения электромагнитной волны и степени насыщения массивной части двухслойного ротора-барабана [53].

Если ротор асинхронного двигателя является двухслойным (массивный внешний слой и короткозамкнутый внутренний слой), то при увеличении скорости вращения ротора увеличение глубины проникновения электромагнитной волны ввиду неоднородности двухслойного ротора существенно скажется на коэффициенте мощности $\cos \varphi_1$, увеличивая его. Это обусловлено тем, что индуктивное сопротивление внутренней короткозамкнутой части двухслойного ротора асинхронного двигателя сепаратора при малых скольжениях будет меньше индуктивного сопротивления однослойного массивного ротора [58]. Коэффициент мощности разработанного двигателя с двухслойным ротором-барабаном для электропривода сепаратора выше, чем $\cos \varphi_1$ известных из [80] и других двигателей с однослойным массивным ротором-барабаном для электропривода сепараторов.

2.6 Выводы по главе 2

1. Разработана технологическая схема сепарирования молока с безредукторным электроприводом сепаратора и его конструкция, обеспечивающая возможность передачи тепла от электрической машины молоку.

2. Модернизирована математическая модель безредукторного электропривода сепаратора молока (БЭСМ), созданная на базе теории обобщённого электромеханического преобразователя энергии (ОЭМПЭ) и теории теплопередачи, отличается от существующих тем, что в неё введены уравнения,

описывающие совместно протекающие электромагнитные, электромеханические и тепловые процессы, что позволяет проанализировать эти процессы с учетом их взаимовлияния друг на друга, а также учесть передачу энергии тепловых потерь в статоре и роторе молоко и определить температуру нагрева молока за счет тепловыделений в обмотке статора, магнитопроводе статора, в роторе-барабане и получить динамические электромагнитные и электромеханические характеристики, на основании которых можно получить рабочие, регулировочные и энергетические характеристики БЭСМ. В разработанном научно-методическом аппарате (при определении температур нагрева сепарируемой жидкости) учтена связь электромагнитных и тепловых параметров исследуемого БЭСМ, учтены «греющие» потери обмотки и магнитопровода статора.

3. Посредством модернизированной математической модели проведены исследования БЭСМ с использованием программного обеспечения MathLab. Установлено, что наличие дополнительно к массивной части ротора-барабана короткозамкнутой части позволяет снизить величину установившихся токов на 22,5 %. Изменение действующего значения напряжения и частоты приводит к изменению скорости вращения ротора-барабана и момента на валу БЭСМ, а именно: при изменении величины действующего значения напряжения в диапазоне ± 5 % приводит к изменению частоты вращения барабана от 3,5 % до 6,5 %, при изменении частоты питающего напряжения в диапазоне $\pm 2,5$ % приводит к изменению частоты вращения барабана до 2,4 %.

4. При изменении действующего значения напряжения сети, частоты напряжения сети в соответствии с ГОСТ 32144-2013 и при изменении плотности (в пределах 1027 - 1033 кг/м³) сепарируемой жидкости. Отклонения частоты вращения ротора-барабана БЭСМ при указанном изменении плотности сепарируемой жидкости составили от 0,3 % до 0,5 %. Отклонения скорости вращения ротора-барабана БЭСМ при изменении действующего значения

напряжения сети и частоты напряжения сети составили 3,5% – 7 %, и 1,4% – 1,7 %, соответственно.

5. С уменьшением воздушного зазора БЭСМ на 80% максимальный и пусковой моменты, развиваемые БЭСМ, увеличиваются (в среднем, в зависимости от частоты питающего напряжения) на 3 %, пусковой ток снижается (в среднем, в зависимости от частоты питающего напряжения) до 5 %, потребление мощности из сети снижается (в среднем, в зависимости от частоты питающего напряжения) до 20%.

6. Рассчитаны энергетические показатели (КПД, $\cos \varphi$) сепараторных установок на базе серийных электроприводов классической конструкции, сепараторных установок на базе серийных безредукторных электроприводов и сепараторной установки на базе исследуемого БЭСМ, построены энергетические характеристики безредукторного электропривода сепаратора молока. КПД БЭСМ на базе электродвигателей 4 кВт и 7,5 кВт составят 0,96 и 0,98, соответственно $\cos \varphi$ – 0,95.

7. Обоснованы режимы работы БЭСМ: пусковой и установившийся с отбором тепла. Определены параметры БЭСМ. Номинальная мощность принята исходя из серийного сепаратора_производительностью 3 т/ч, который является оптимальным для малых и средних фермерских хозяйств. Этой мощности соответствуют активное сопротивление ротора-барабана $R_{\text{рот.}} = 195 - 205$ Ом для марки стали Х13, из которой изготовлен ротор-барабан, максимальный момент 16,56 - 16,66 Нм, номинальный момент 7,24 Нм и номинальная частота питающего напряжения 114,6 Гц для поддержания номинальной частоты вращения барабана 6500 об/мин.

8. Получены функциональные связи между динамическими характеристиками и параметрами разработанного БЭСМ, которые позволяют получить регулировочные и энергетические характеристики проектируемых БЭСМ до их натурного изготовления.

9. Выведена формула КПД сепараторной установки, учитывающая передачу энергии тепловых потерь в статоре и роторе молоку.

10. Сепараторная установка на базе исследуемого БЭСМ по сравнению с серийной сепараторной установкой на базе серийных электроприводов классической конструкции имеет КПД на 1,46% выше (при мощности приводного электродвигателя 4 кВт), $\cos\varphi$ на 13,1 %, и на 3,53 % выше (при мощности приводного электродвигателя 7,5 кВт).

11. Сепараторная установка на базе исследуемого БЭСМ по сравнению с серийными сепараторными установками на базе безредукторных электроприводов имеет КПД на 1,14% выше (при мощности приводного электродвигателя 4 кВт) при неизменном $\cos\varphi$ и на 3,25% выше (при мощности приводного электродвигателя 7,5 кВт).

12. Разработана конструкция электрической машины БЭСМ. Определены параметры БЭСМ с помощью модернизированной методики расчета параметров приводной электрической машины номинальной мощности 4 кВт: внутренний диаметр статора 0,403 м, расчетная длина магнитопровода 0,03 м, длина проводников фазы обмотки 91,2 м; номинальной мощности 7,5 кВт: внутренний диаметр статора 0,403 м, расчетная длина магнитопровода 0,045 м, длина проводников фазы обмотки 118,1 м.

13. Использование эффекта охлаждения статора жидкостью позволило улучшить массогабаритные показатели приводного электродвигателя мощностью 4 кВт по сравнению с базовым БЭСМ: высоту магнитопровода статора на 9,1 %, удельную материалоемкость на 11,5 %, длину обмоточного провода на 2,1%.

14. Разработана конструкция перспективного двигателя с двухслойным ротором-барабаном (массивный внешний слой и короткозамкнутый внутренний слой) для безредукторного электропривода сепаратора молока. Обоснована целесообразность применения двухслойного ротора-барабана для увеличения энергетических показателей БЭСМ: при такой конструкции при

увеличении частоты вращения ротора происходит увеличение глубины проникновения электромагнитной волны ввиду неоднородности двухслойного ротора. Это обусловлено тем, что индуктивное сопротивление внутренней короткозамкнутой части двухслойного ротора асинхронного двигателя сепаратора при малых скольжениях меньше индуктивного сопротивления однослойного массивного ротора, что позволит увеличить коэффициент мощности ($\cos \varphi$).

3. МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1 Программа и методика экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования состоят из двух этапов: вычислительный эксперимент, исследование натурального образца. Задачами вычислительного эксперимента являются:

- расчёт параметров БЭСМ;
- получение картины электромагнитных и электромеханических переходных процессов в БЭСМ;
- оценка влияния параметров ротора-барабана БЭСМ на величину скорости вращения барабана БЭСМ и величину развиваемого момента;
- оценка влияния величины воздушного зазора между статором и ротором БЭСМ на величину скорости вращения ротора-барабана БЭСМ и величину развиваемого момента;
- сравнение энергетических показателей БЭСМ, серийной сепараторной установки и сепараторной установки на основе прямого привода.

Для решения задач вычислительного эксперимента был применён метод планирования эксперимента [5, 44, 50, 75]. В качестве переменных факторов приняты:

- величина амплитуды напряжения сети (U , В);
- частота напряжения сети (f , Гц);
- плотность сепарируемой жидкости (J , кг/м³);
- активное сопротивление ротора (R_2 , о.е., где $R_2(\text{о.е.}) = R_2 \frac{I_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}}$).

Питающее напряжение U_0 и частота тока f_0 в соответствии с ГОСТ 32144-2013 [36] являются показателями качества электроэнергии и могут колебаться вследствие загруженности сети, устаревшего силового электрооборудования и т.д. Для сепарации молоко поступает с определенной плотностью J , которая зависит от биологических (периода лактации коровы, породы

коров), технологических (условия содержания и кормления животных, температурный режим хранения) и других факторов. Величина активного сопротивления ротора R_2 влияет на характеристики БЭСМ.

В качестве выходных параметров были выбраны: КПД двигателя (η), $\cos\varphi$, ток статора ($I_{ст}$, А) и энергетический коэффициент ($K_n = \eta \cdot \cos\varphi$). В таблице 3.1 указаны начальные показатели изменяемых факторов и области их варьирования.

Таблица 3.1 – Интервалы варьирования переменных факторов

Параметр	Базовое значение	Максимальное отклонение от базового значения	+1	-1
J , кг/м ³	1030	$\pm 0,145\%$	1031,5	1028,5
R_2 , о.е.	0,107	$\pm 4,5\%$	0,112	0,102
f_0 , Гц	114,6	$\pm 2,5\%$	117,5	111,7
U_0 , В	220	$\pm 5\%$	231,0	209,0

В соответствии с п. 4.2.2 ГОСТ 32144-2013 [36] питающее фазное напряжение равно 220 В, поэтому оно принято за базовое значение. Предельно допустимое значение отклонение напряжения равно $\pm 10\%$, на основании [36] и руководствуясь [74] максимальное отклонение от базового значения уменьшены вдвое, чтобы приблизиться к точке оптимума. Для обеспечения требуемой производительности сепаратора частота вращения вала должна составлять 6500 об/мин, поэтому при использовании асинхронной машины с одной парой полюсов преобразователь частоты формирует частоту тока f_0 в 114 Гц. Интервал варьирования величины частоты напряжения принят $\pm 2,5\%$ от f_0 .

Плотность натурального цельного молока находится в пределах 1027 - 1033 кг/м³ или в пределах 27-33° лактоденсиметра, принято значение плотности 1030 кг/м³. На основании [62] и руководствуясь [74] отклонение плотности натурального цельного молока были уменьшены вдвое и составляет $\pm 0,145\%$, чтобы приблизиться к точке оптимума.

За базовое значение активного сопротивления многофункционального ротора-барабана, изготовленного из легированной стали, принято значение 0,107 о.е. (где $R_2^* = R_2 \times \frac{I_{1\text{ном}}}{U_{1\text{ном}}} = 2,0 \times \frac{11,8}{220} = 0,107$ о.е.) [19, 63], (где $R_2^* = R_2 \times I_{1\text{ном}} U_{1\text{ном}} = 0,43 \times 9,122 = 0,0178$ о.е.). Согласно [41, 74] отклонения базового значения активного сопротивления $\pm 4,5\%$ были уменьшены вдвое, чтобы приблизиться к точке оптимума.

В табл. 3.2 представлена матрица планирования эксперимента.

Таблица 3.2 – Матрица планирования эксперимента

№ опыта	Воздействующие факторы				Выходные параметры			
	U_0 $\pm 5\%$, В	f_0 $\pm 2,5\%$, Гц	J $\pm 0,145\%$, кг/м ³	R_2 $\pm 4,5\%$, о.е.	$\cos \varphi$	η	$I_{\text{ст}}$, А	K_n
1	231	116,85	1031,5	0,472	0,820	0,690	10,6	0,566
2	209	116,85	1031,5	0,472	0,790	0,694	12,6	0,548
3	231	111,15	1031,5	0,472	0,826	0,687	10,2	0,568
4	209	111,15	1031,5	0,472	0,799	0,692	12,1	0,553
5	231	116,85	1028,5	0,472	0,820	0,690	10,5	0,566
6	209	116,85	1028,5	0,472	0,790	0,694	12,6	0,548
7	231	111,15	1028,5	0,472	0,826	0,687	10,1	0,568
8	209	111,15	1028,5	0,472	0,799	0,692	12,1	0,553
9	231	116,85	1031,5	0,427	0,824	0,690	10,6	0,569
10	209	116,85	1031,5	0,427	0,796	0,694	12,6	0,552
11	231	111,15	1031,5	0,427	0,830	0,687	10,2	0,570
12	209	111,15	1031,5	0,427	0,805	0,692	12,1	0,557
13	231	116,85	1028,5	0,427	0,824	0,690	10,5	0,569
14	209	116,85	1028,5	0,427	0,798	0,694	12,6	0,553
15	231	111,15	1028,5	0,427	0,830	0,687	10,1	0,570
16	209	111,15	1028,5	0,427	0,805	0,692	12,1	0,557

В табл. 3.2 приняты следующие обозначения:

- U_0 - действующее значение напряжения;
- f_0 – частота напряжения;
- j – плотность исходного продукта;

- R_2 - активное сопротивление ротора-барабана;
- η – КПД БЭСМ;
- $I_{ст}$ – ток статора;
- $K_n = \eta \cdot \cos \varphi$ - энергетический коэффициент.
- $(K_n = \eta \cdot \cos \varphi)$.

На рис. 3.1 - 3.14 приведены зависимости вращающего момента, скорости вращения барабана сепаратора, энергетических показателей (КПД, $\cos \varphi_1$), температур нагрева сепарируемой жидкости в статоре и барабане-роторе от параметров сети (действующего значения напряжения и частоты сети), плотности исходного продукта сепарирования, сопротивления ротора-барабана (марки материала), полученные в ходе вычислительного эксперимента. Приведенные в данной главе зависимости получены на основании расчетов системы уравнений 2.1 – 2.12 (п.2).

Из рис. 3.1 а и 3.1 б видно, что с увеличением напряжения питающей сети максимальный и пусковой моменты БЭСМ увеличиваются, с увеличением частоты питающего напряжения (при сохранении неизменности M_c) максимальный и пусковой моменты БЭСМ уменьшаются. При повышении питающего напряжения на 5% растет максимальный (на 13%) и пусковой (на 14%) моменты БЭСМ. В то время как увеличение частоты напряжения на 3% приводит к снижению этих показателей на 5,2% и 5%. На рис. 3.1 в и 3.1 г представлены графики зависимостей пускового тока и времени пуска в зависимости от величины питающего напряжения и частоты сети. Увеличение величины питающего напряжения приводит к увеличению пускового тока и уменьшению времени пуска питающего напряжения (при сохранении неизменности M_c). Увеличение частоты сети приводит к уменьшению пускового тока и увеличению времени пуска. Приведенные соотношения соответствуют основным теоретическим положениям, изложенным в [15].

Так, при увеличении напряжения на 5 % пусковой ток БЭСМ увеличиваются на 7 %, а при увеличении частоты питающего напряжения на 2,5 %

пусковой ток БЭСМ уменьшается на 3,8 %; при увеличении напряжения на 5 % время пуска БЭСМ уменьшается на 4,3 %, а при увеличении частоты питающего напряжения на 2,5 % время пуска БЭСМ увеличивается на 2,6 %.

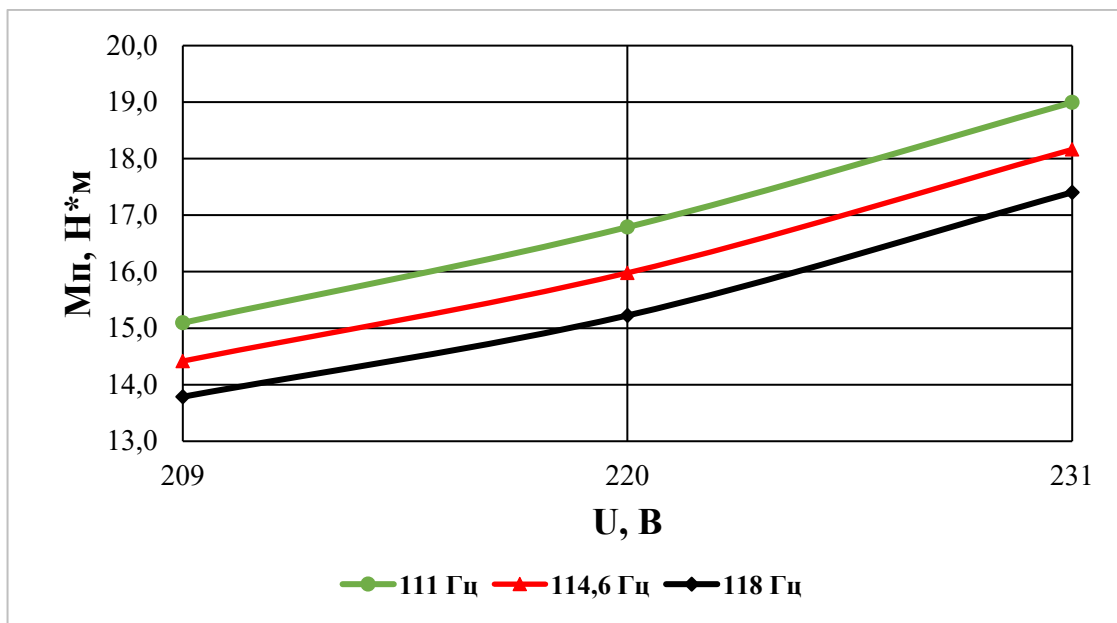


Рисунок 3.1 а – Зависимость пускового момента БЭСМ от величины напряжения сети при изменении частоты питающей сети

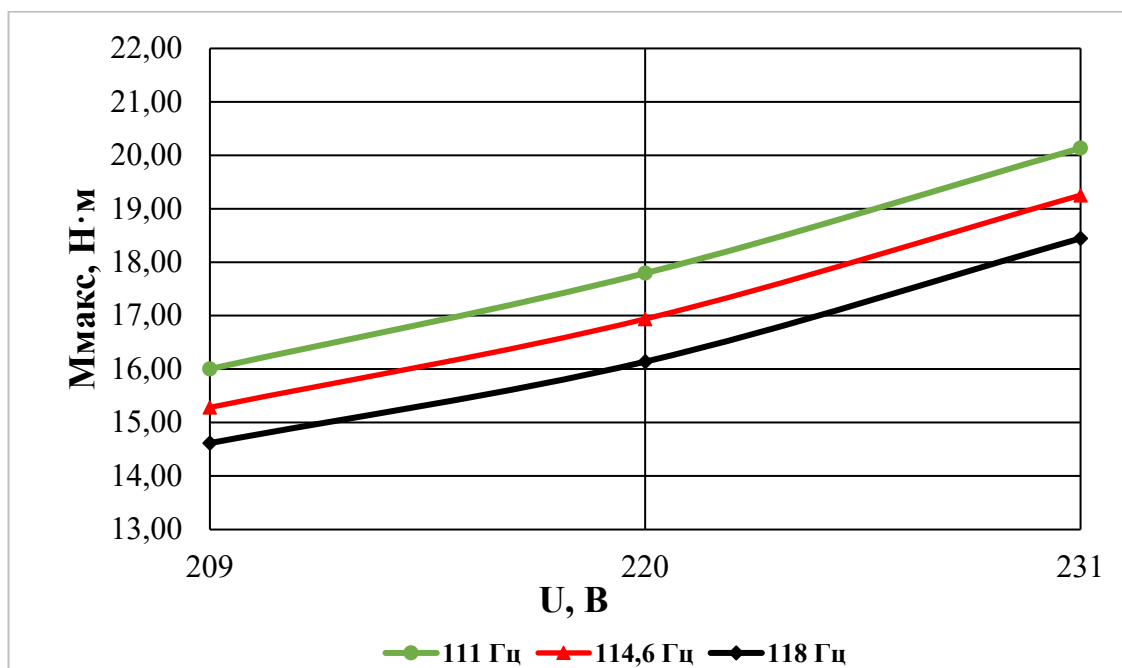


Рисунок 3.1 б – Зависимость максимального момента БЭСМ от величины напряжения сети при изменении частоты питающей сети

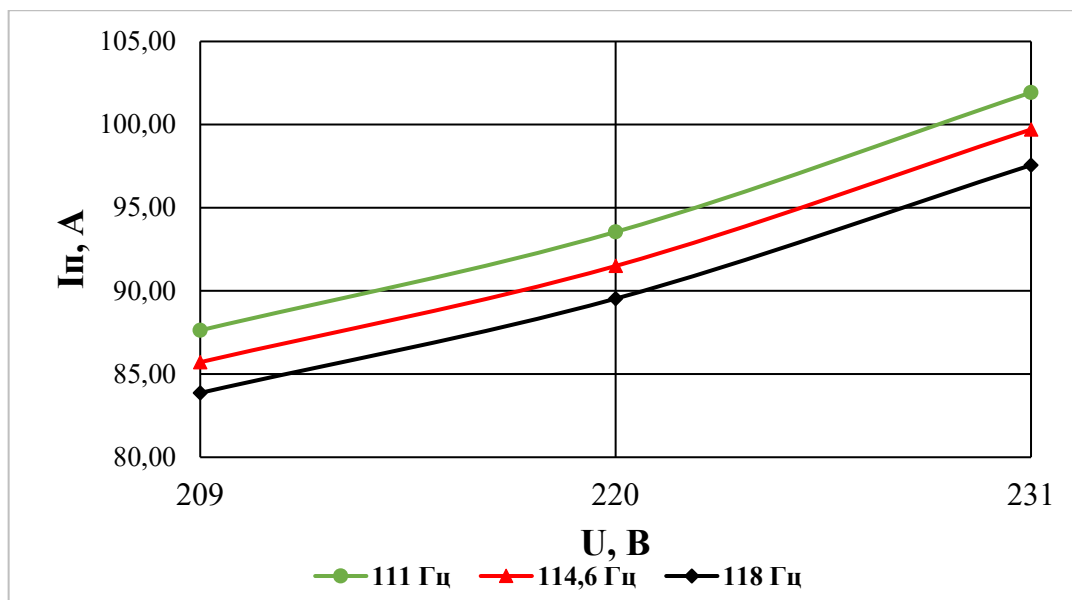


Рисунок 3.1 в – Зависимость пускового тока БЭСМ от величины напряжения сети при изменении частоты питающей сети

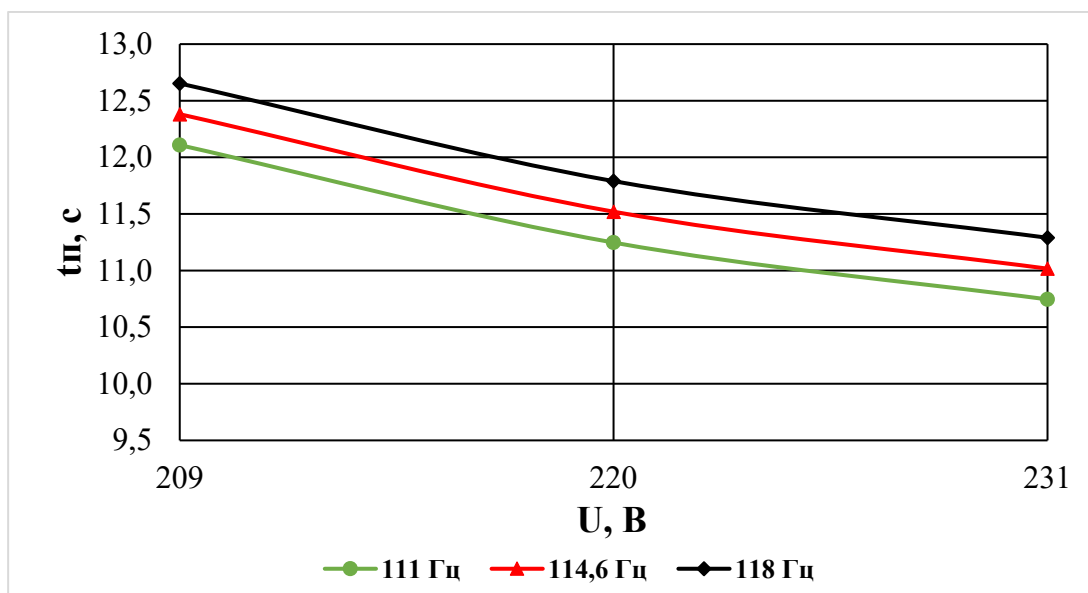


Рисунок 3.1 г – Зависимость времени пуска БЭСМ от величины напряжения сети при изменении частоты питающей сети

На рис. 3.2 представлена зависимость частоты вращения ротора-барабана БЭСМ от напряжения сети при изменении частоты сети. Как видно из графика с увеличением частоты и величины напряжения сети частота вращения ротора-барабана БЭСМ возрастает. Так, при увеличении напряжения на 5 % частота вращения ротора-барабана БЭСМ увеличиваются на 6,5 %, а при

увеличении частоты питающего напряжения на 2,5 % частота вращения ротора-барабана БЭСМ увеличиваются на 2,4 %.

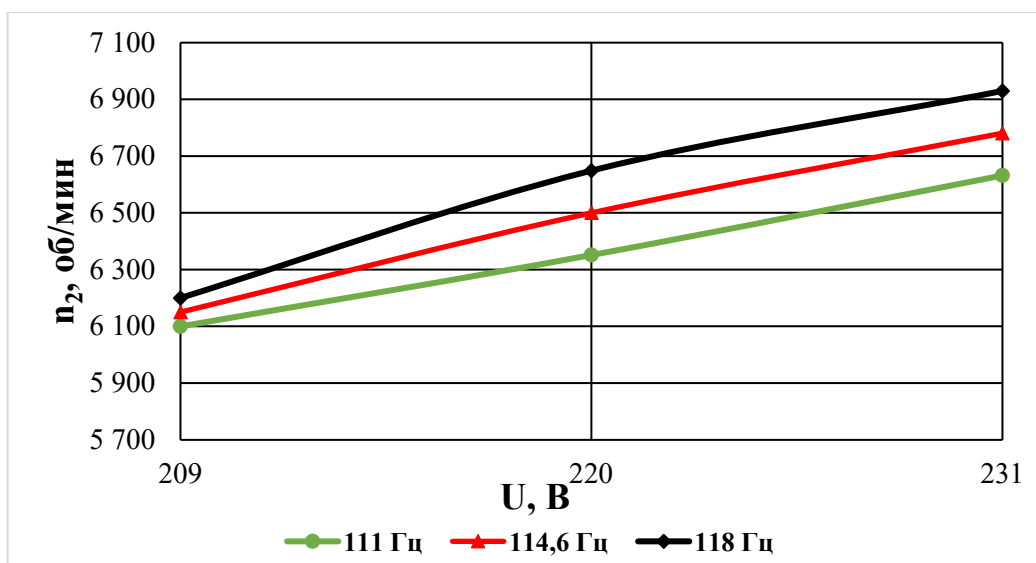


Рисунок 3.2 – Зависимость частоты вращения ротора-барабана БЭСМ от величины напряжения сети при изменении частоты питающей сети

На рис.3.3 и 3.4 представлены зависимости КПД и $\cos \varphi$ БЭСМ от напряжения сети при изменении частоты сети. Повышение напряжения на 5% приводит к уменьшению КПД (на 6%) и $\cos \varphi$ (на 1,45%), а увеличение частоты питающего напряжения (на 3%) вызывает их снижение (на 1,5% и 0,2% соответственно).

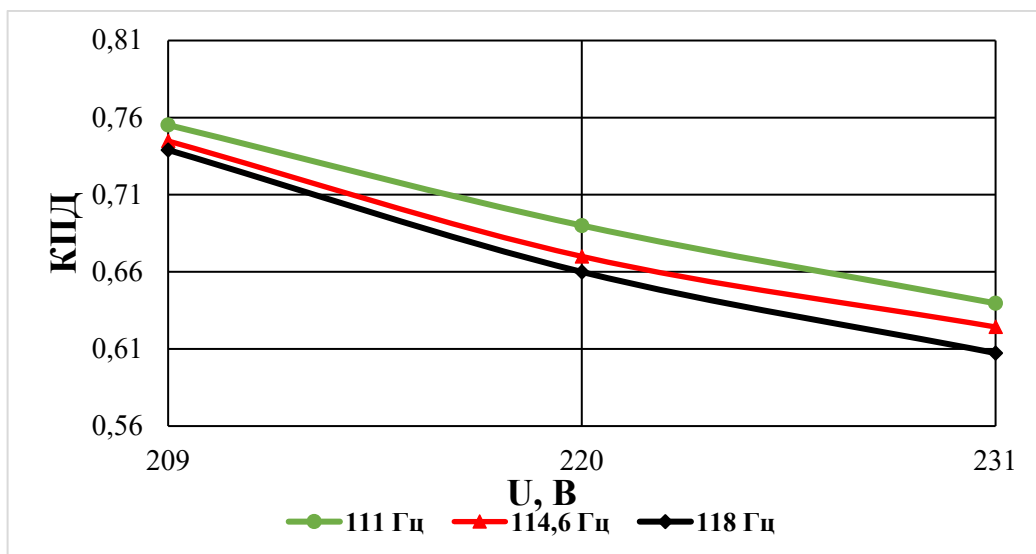


Рисунок 3.3 – Зависимость КПД БЭСМ от величины напряжения сети при изменении частоты питающей сети

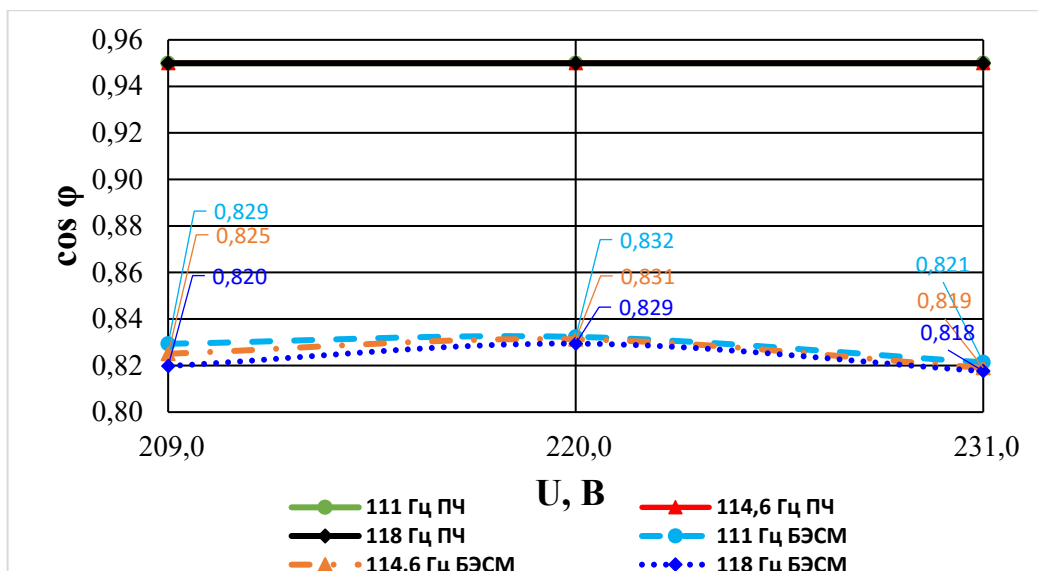


Рисунок 3.4 – Зависимость $\cos \varphi$ преобразователя частоты и БЭСМ от величины напряжения сети при изменении частоты питающей сети

Из рис. 3.3 видно, что из двух параметров питающей сети (частота сети и величина напряжения сети) наибольшее влияние на величину КПД оказывает величина напряжения сети. Это объясняется тем, что согласно (2.23) нагрев сепарируемой жидкости, протекающей по элементам конструкции БЭСМ, в основном определяется величиной питающего напряжения.

Исследования зависимости $\cos \varphi$ БЭСМ (рис. 3.4) проводилось как на входе преобразователя частоты (линия сеть – ПЧ), так и на выходе ПЧ (линия ПЧ-БЭСМ). Из рис. 3.4 видно, что если рассматривать комплекс ПЧ - БЭСМ (линия сеть – ПЧ) в совокупности, то $\cos \varphi$ при изменении напряжения питающей сети остаётся неизменным. Если же рассматривать как влияет изменение величины питающего напряжения и изменение частоты питающего напряжения на изменения $\cos \varphi$, то из рис. 3.4 видно, что коэффициент мощности БЭСМ достигает максимума при номинальном напряжении (что соответствует кривой $\cos \varphi = f(P_2)$ в точке номинальной мощности). При снижении напряжения и одновременном повышении частоты тока $\cos \varphi$ БЭСМ уменьшается. Данное обстоятельство объясняется тем, что кривая характеристики $\cos \varphi$ имеет U-образный характер.

На рис. 3.5 а, 3.5 б (на базе двигателя мощностью 4 кВт) приведены графики изменения температуры нагрева сепарируемой жидкости в статоре, роторе-барабане БЭСМ, мощности, отдаваемой элементами конструкции БЭСМ, при изменении величины и частоты питающего напряжения.

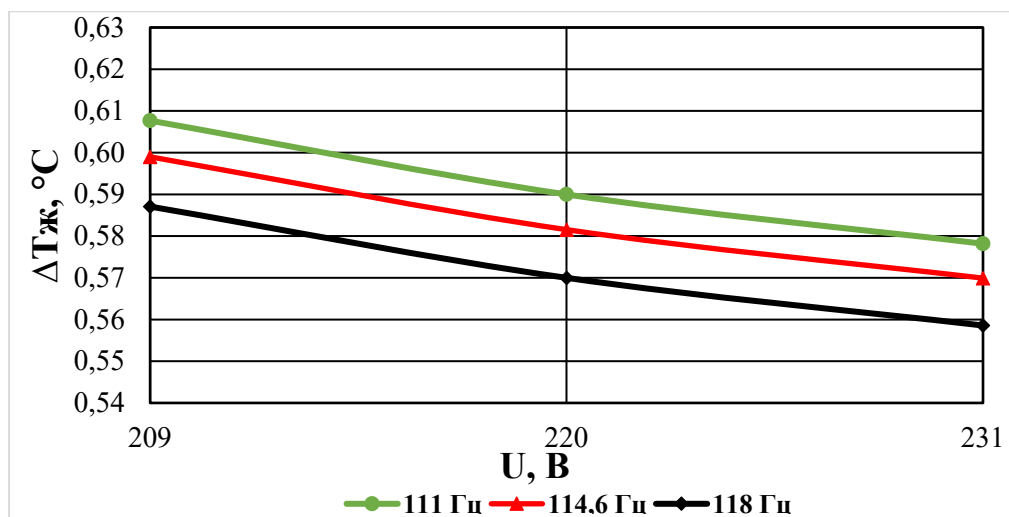


Рисунок 3.5 а – Характеристика изменения температуры нагрева жидкости в статоре и роторе-барабане БЭСМ мощностью 4 кВт, в зависимости от отклонения напряжения и частоты тока

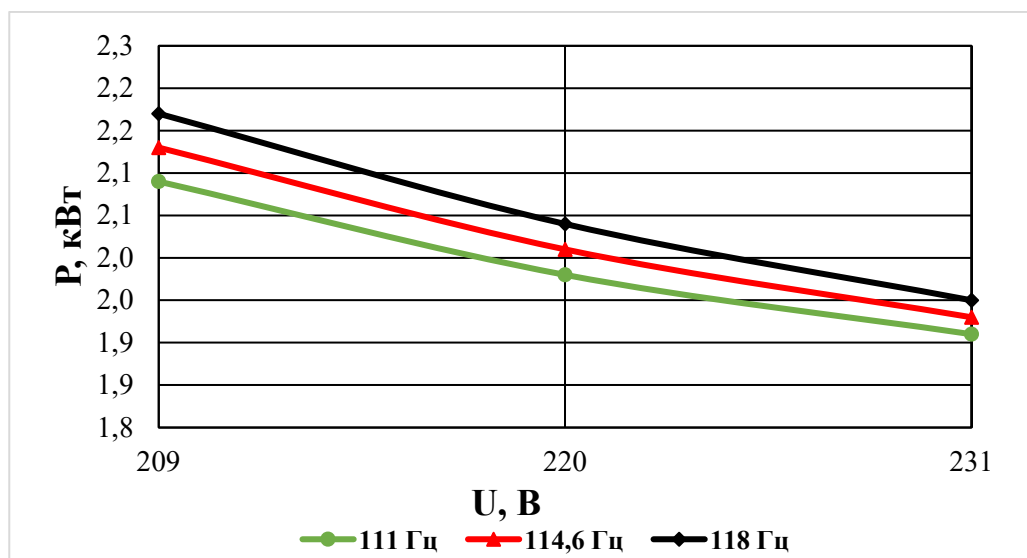


Рисунок 3.5 б – Характеристика изменения мощности, идущей на нагрев жидкости БЭСМ мощностью 4 кВт, в зависимости от отклонения напряжения и частоты тока

Из графиков видно, что с увеличением величины питающего напряжения температура нагрева сепарируемой жидкости, протекающей по трубкам,

опоясывающим обмотку статора, и по ротору-барабану, мощность, отдаваемая элементами конструкции БЭСМ, падают, а с увеличением частоты питающего напряжения исследуемая температура падает, а мощность возрастает. Данное обстоятельство объясняется тем, что при указанных изменениях величины и частоты питающего напряжения ток БЭСМ имеет U-образный характер (убывает).

При повышении напряжения сети на 5% происходит снижение температуры нагрева сепарируемой жидкости в трубках вокруг статора (на 1,8%) и в роторе-барабане (на 3,8%). Мощность, отдаваемая конструктивными элементами машины, также уменьшается. Увеличении частоты тока (на 2,5%) приводит к снижению температуры нагрева сепарируемой жидкости в трубках опоясывающим обмотку статора, и по ротору-барабану на 1,7 % и увеличивается мощность, отдаваемая элементами конструкции БЭСМ на 2,5 %.

На рис. 3.5 в, 3.5 г (на базе двигателя мощностью 7,5 кВт) приведены графики изменения температуры нагрева сепарируемой жидкости в статоре, роторе-барабане БЭСМ, мощности, используемой для нагрева жидкости, при изменении величины и частоты питающего напряжения.

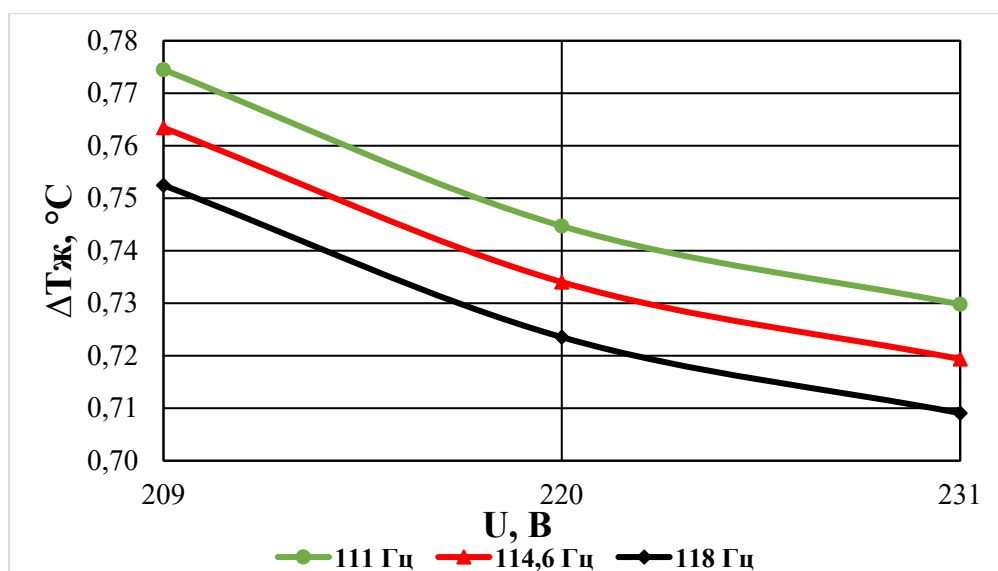


Рисунок 3.5 в – Характеристика температуры нагрева сепарируемой жидкости в статоре и барабане-роторе БЭСМ мощностью 7,5 кВт, в зависимости от отклонении напряжения и частоты тока

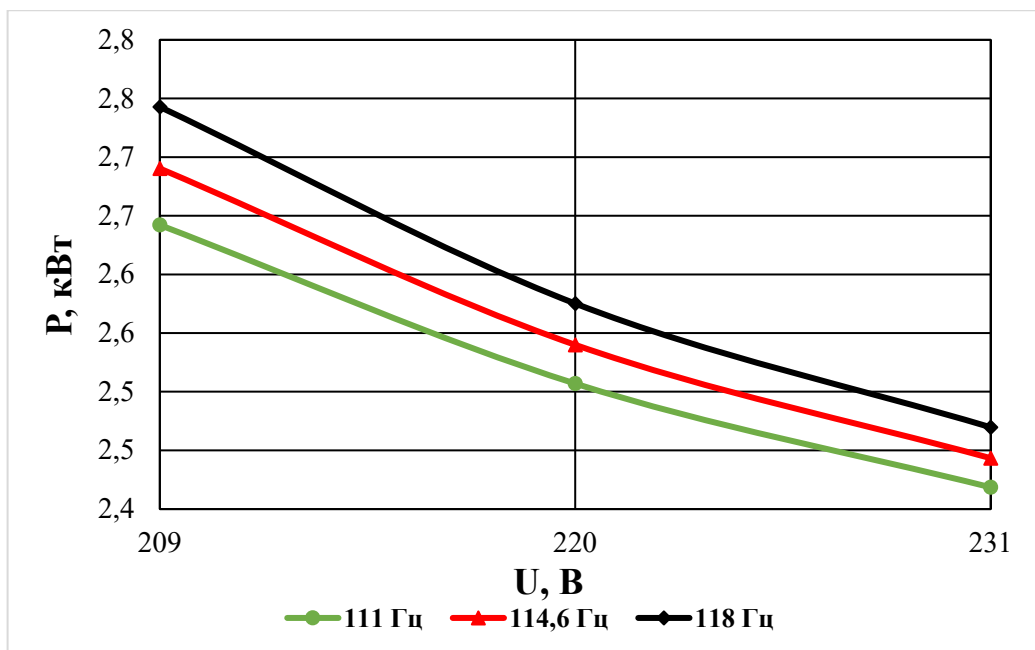


Рисунок 3.5 г – Характеристика мощности, идущей на нагрев жидкости БЭСМ мощностью 7,5 кВт, в зависимости от отклонении напряжения и частоты тока

На рис. 3.6 приведены зависимости, показывающие влияние изменения плотности сепарируемой жидкости на частоту вращения ротора-барабана БЭСМ.

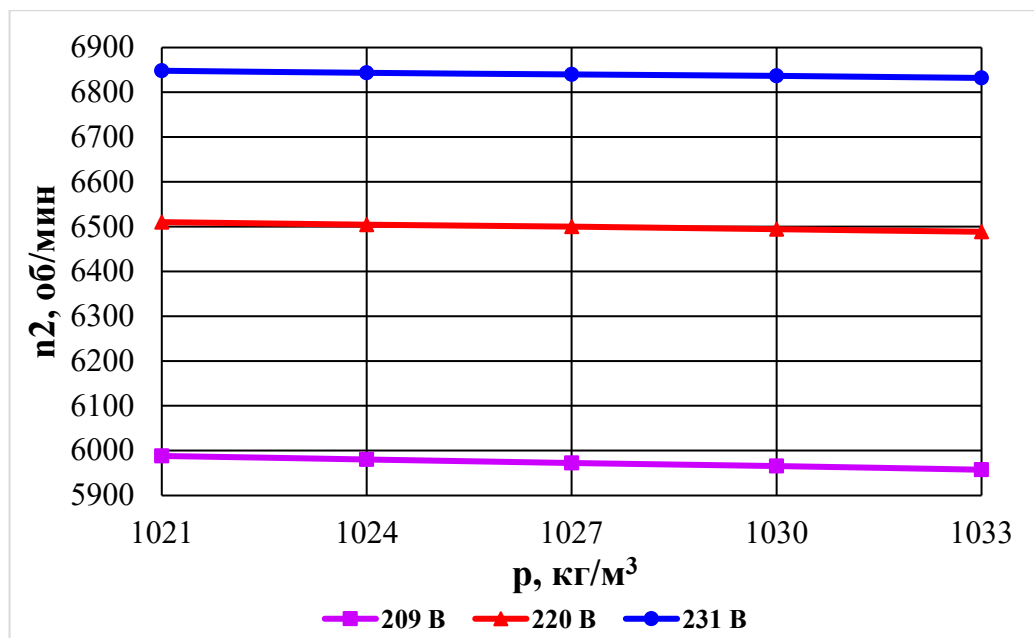


Рисунок 3.6 – Характеристика изменения частоты вращения БЭСМ в зависимости от плотности исходного продукта при отклонении величины питающего напряжения

Графики показывают, что с увеличением плотности сепарируемой жидкости (фактически увеличение момента сопротивления (M_c) на валу) частота вращения ротора – барабана уменьшается. Данное обстоятельство объясняется тем, что согласно уравнению электропривода ($M_{эм} = M_{дин} + M_c$) в установленном режиме увеличение M_c приводит к увеличению электромагнитного момента БЭСМ. Так, при увеличении плотности сепарируемой жидкости на 0,5 % (диапазон изменения плотности обусловлен изменением состава жировых «шариков» в исходном продукте сепарирования – молоке) частота вращения ротора-барабана уменьшается на 0,9 %.

На рис. 3.7-3.9 приведены зависимости, показывающие изменение КПД БЭСМ, $\cos\phi$ БЭСМ, температуры нагрева сепарируемой жидкости в статоре и барабане-роторе БЭСМ от величины плотности сепарируемой жидкости. Увеличение плотности сепарируемой жидкости (и как следствие – увеличение момента сопротивления установки) приводит к уменьшению энергетических показателей БЭСМ (КПД и $\cos\phi$ (по линии ПЧ - БЭСМ)), температура нагрева сепарируемой жидкости в статоре и барабане-роторе БЭСМ увеличивается [28]. Данное обстоятельство объясняется тем, что при определении КПД и $\cos\phi$ БЭСМ (п 2.5) учитывается энергопотребление (и, соответственно, энергетические параметры вспомогательного электрооборудования – насоса для осуществления подачи сепарируемого продукта в барабан сепаратора с безредукторным электроприводом). Так, при увеличении плотности сепарируемой жидкости на 0,5 % КПД БЭСМ уменьшается увеличивается на 0,7 %, $\cos\phi$ БЭСМ практически остается неизменным, а температура нагрева сепарируемой жидкости в статоре и барабане-роторе БЭСМ увеличивается на 6 % [28].

На рис. 3.10 и 3.11 приведены характеристики изменения частоты вращения и КПД БЭСМ в зависимости от плотности исходного продукта при колебании величины питающего напряжения при частоте тока 114,6 Гц. На основе графических данных можно сделать вывод о том, как изменяются пусковые характеристики БЭСМ. При увеличении питающего напряжения и

активного сопротивления ротора наблюдается рост пускового момента, в то время как скорость вращения ротора-барабана снижается по мере возрастания сопротивления R_2 . Данные выводы соответствуют теоретическим положениям, изложенным в [15, 63].

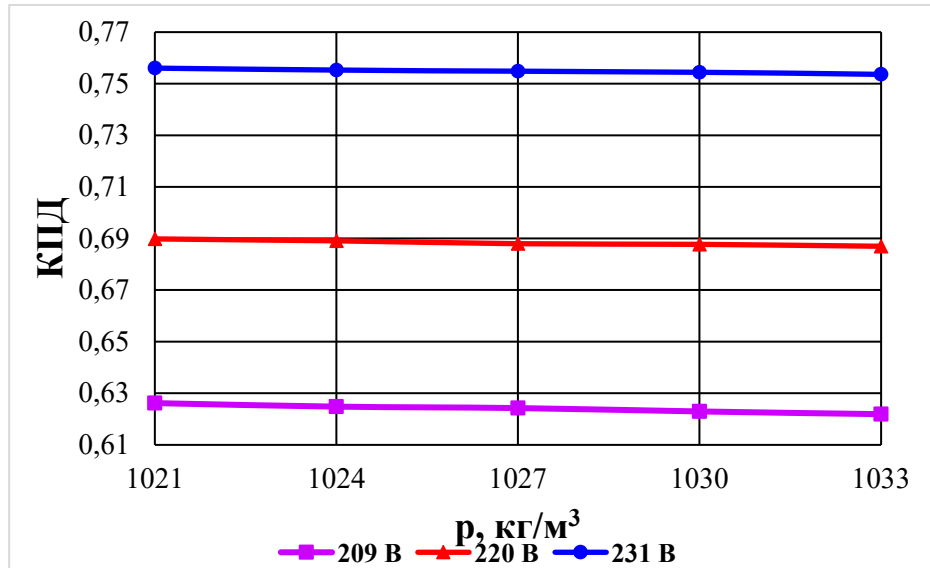


Рисунок 3.7 – Характеристика изменения КПД БЭСМ в зависимости от плотности исходного продукта при варьировании величины питающего напряжения

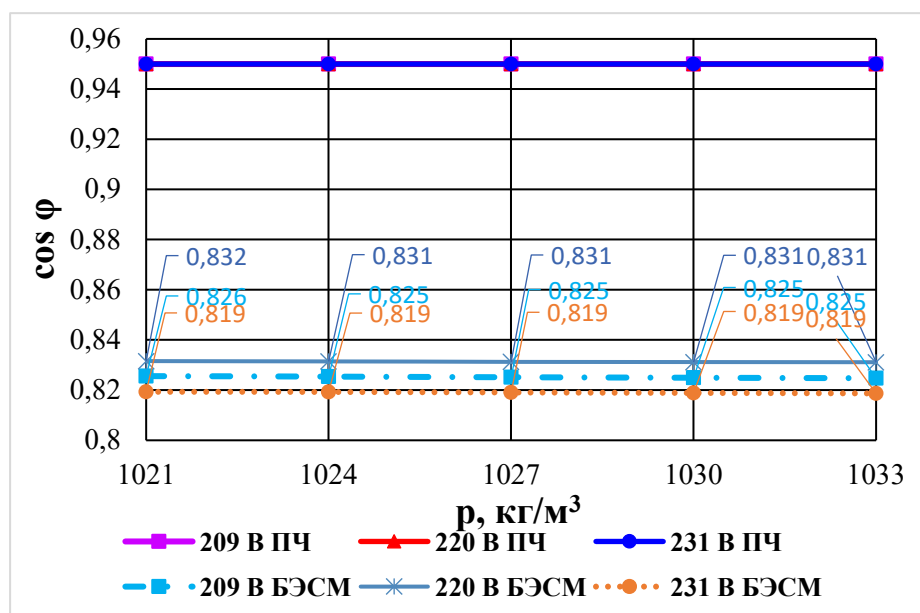


Рисунок 3.8 – Характеристика изменения $\cos \phi$ БЭСМ в зависимости от плотности исходного продукта при колебании величины питающего напряжения при частоте сети $f = 114,6$ Гц.

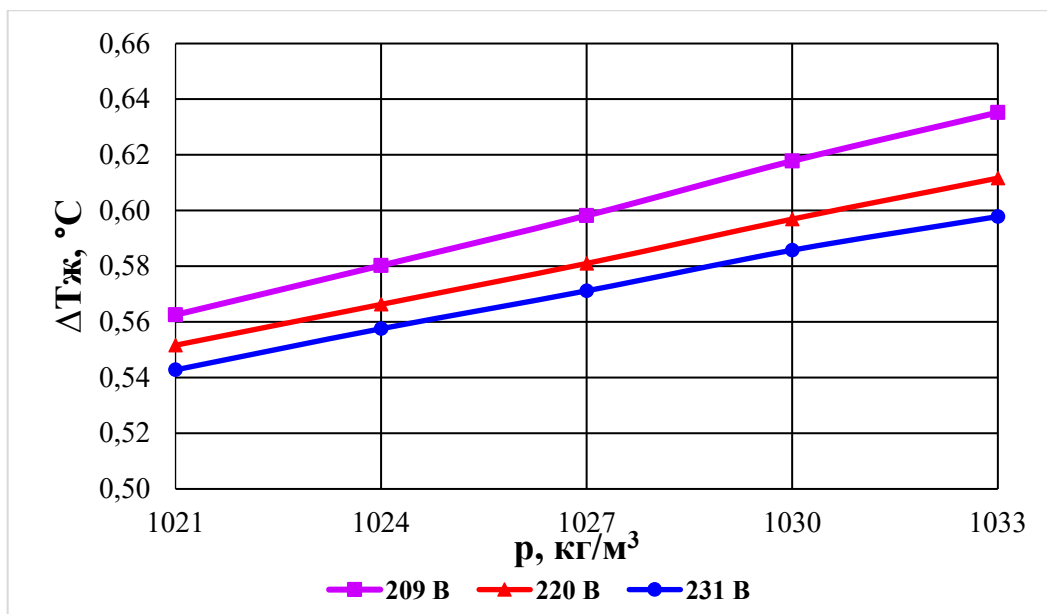


Рисунок 3.9 – Характеристика температуры нагрева сепарируемой жидкости в статоре и барабане-роторе БЭСМ в зависимости от плотности исходного продукта при колебании величины питающего напряжения при частоте сети $f = 114,6$ Гц.

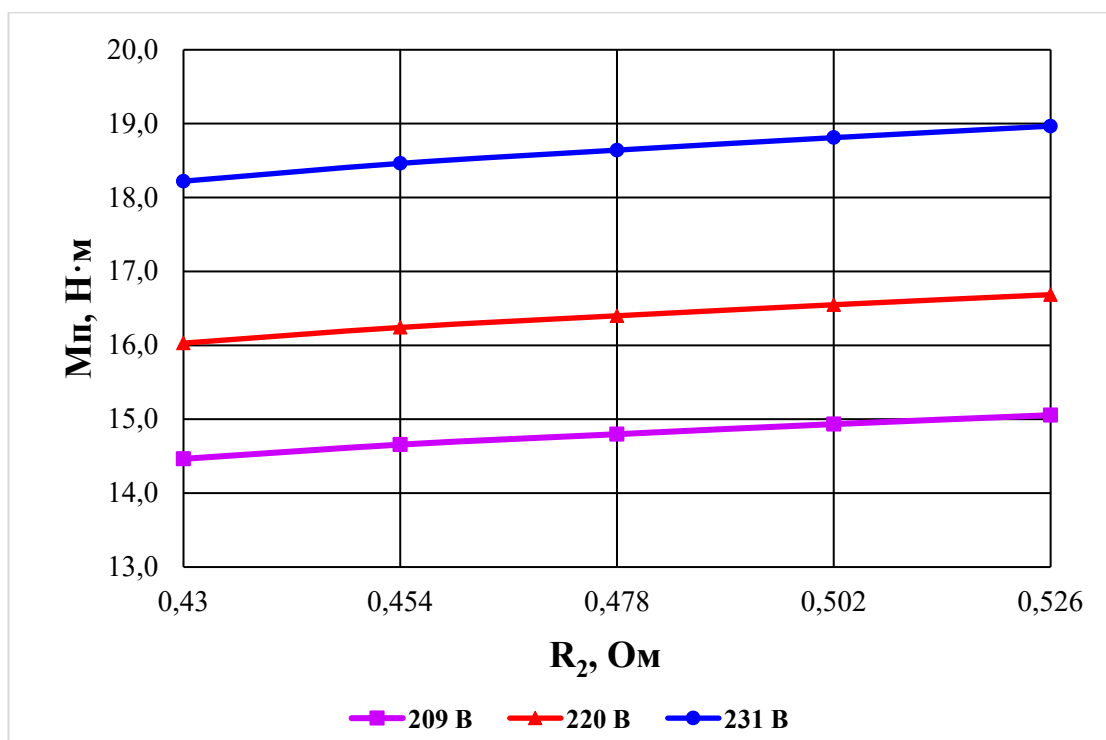


Рисунок 3.10 – Характеристика пускового момента БЭСМ в зависимости от величины сопротивления ротора при отклонении величины питающего напряжения.

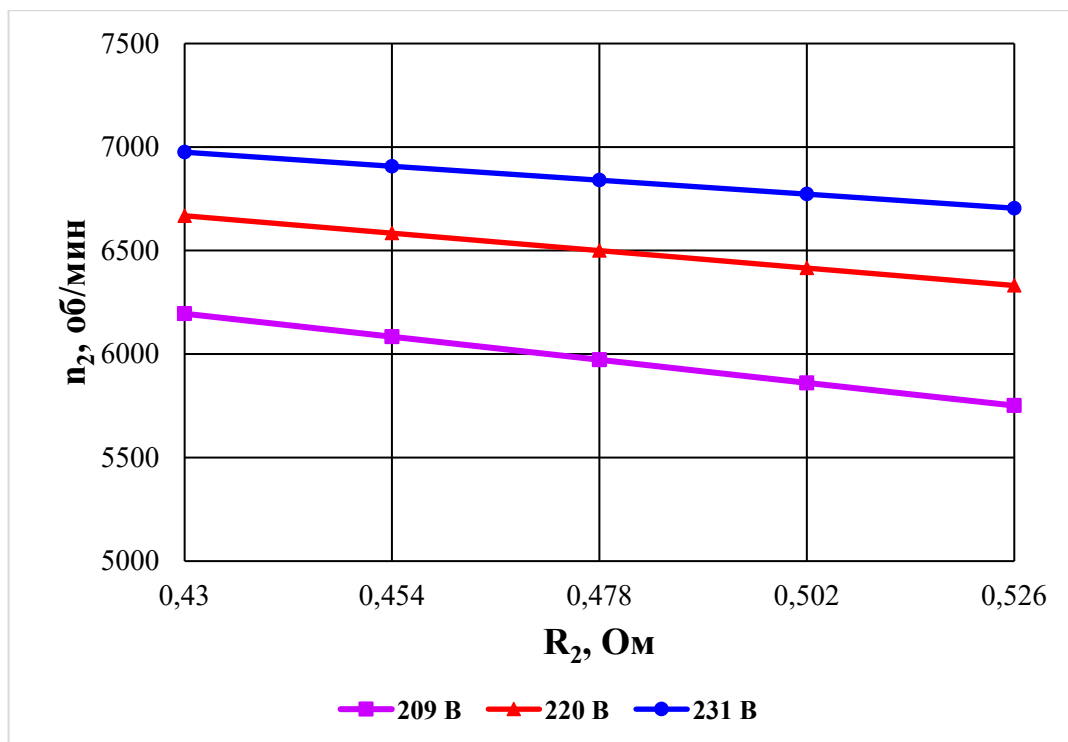


Рисунок 3.11 – Характеристика скорости вращения барабана БЭСМ в зависимости от величины сопротивления ротора при отклонении величины питающего напряжения.

На рис. 3.12, 3.13, 3.14 приведены графики, учитывавшие влияние величины сопротивления ротора на энергетические показатели БЭСМ (КПД и $\cos \varphi$) и температуру нагрева сепарируемой жидкости в БЭСМ. Анализ зависимостей, приведённых на указанные графики, позволяет сделать заключение о том, что увеличение активного сопротивления ротора-барабана (изменение марки стали, из которой изготавливается барабан сепаратора) приводит к уменьшению КПД БЭСМ, так как указанное увеличение значения параметра ротора-барабана приводит к уменьшению полезной мощности на валу БЭСМ.

Изменение величины активного сопротивления ротора не значительно влияет на коэффициент мощности ($\cos \varphi$) и температуру нагрева сепарируемой жидкости в БЭСМ. При повышении сопротивления R_2 ротор-барабана на 10% наблюдается уменьшение частоты вращения (на 0,8%) и КПД (на 3,2%).

Для исследования взаимосвязи между сетевыми параметрами (напряжением и частотой тока) и рабочими характеристиками, была натурная модель

БЭСМ мощностью 4 кВт (рис. 3.15). На ней проведен ряд экспериментов для подтверждения теоретических предпосылок.

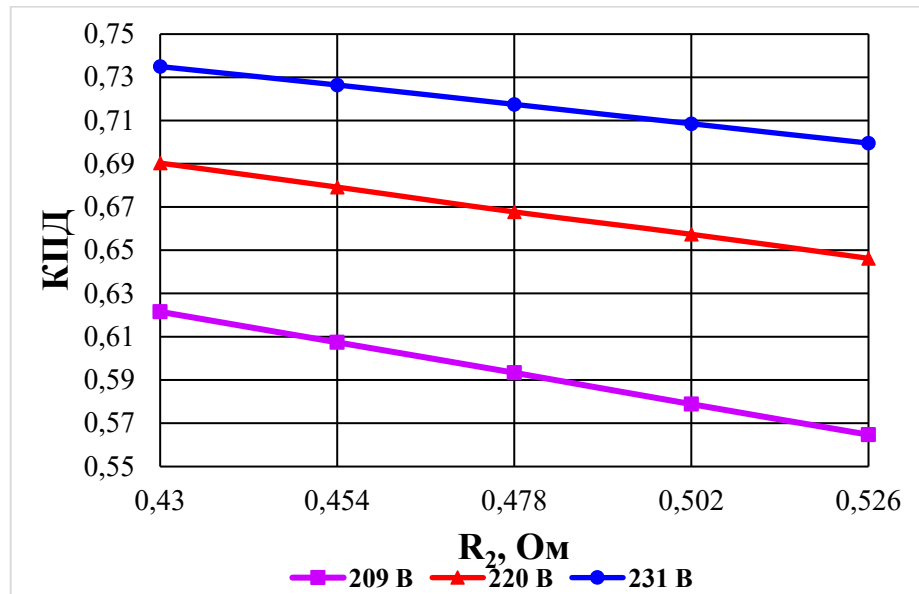


Рисунок 3.12 – Характеристика изменения КПД БЭСМ в зависимости от величины сопротивления ротора при колебании величины питающего напряжения.

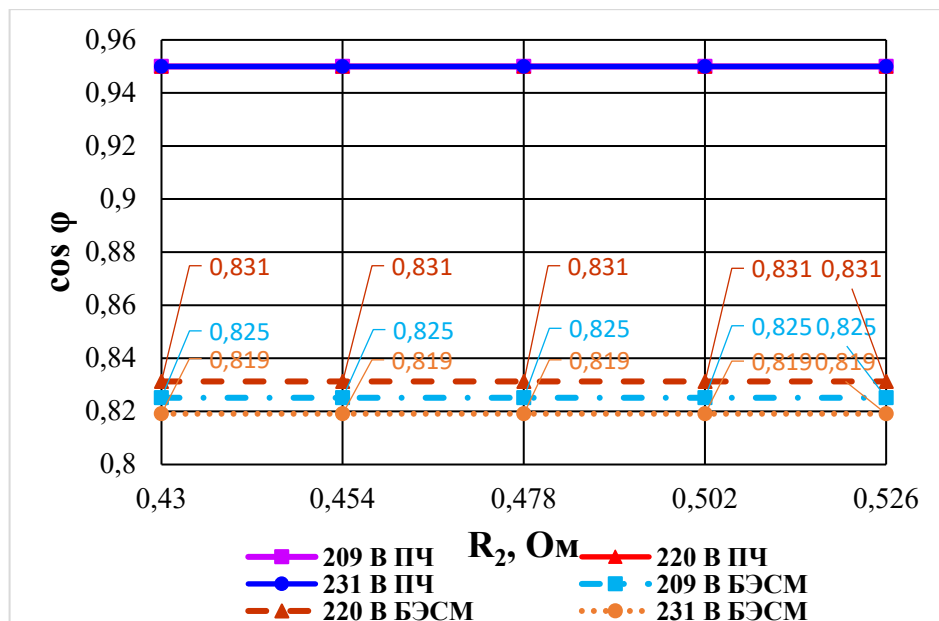


Рисунок 3.13 – Характеристика $\cos \varphi$ БЭСМ в зависимости от величины сопротивления ротора при колебании величины питающего напряжения.

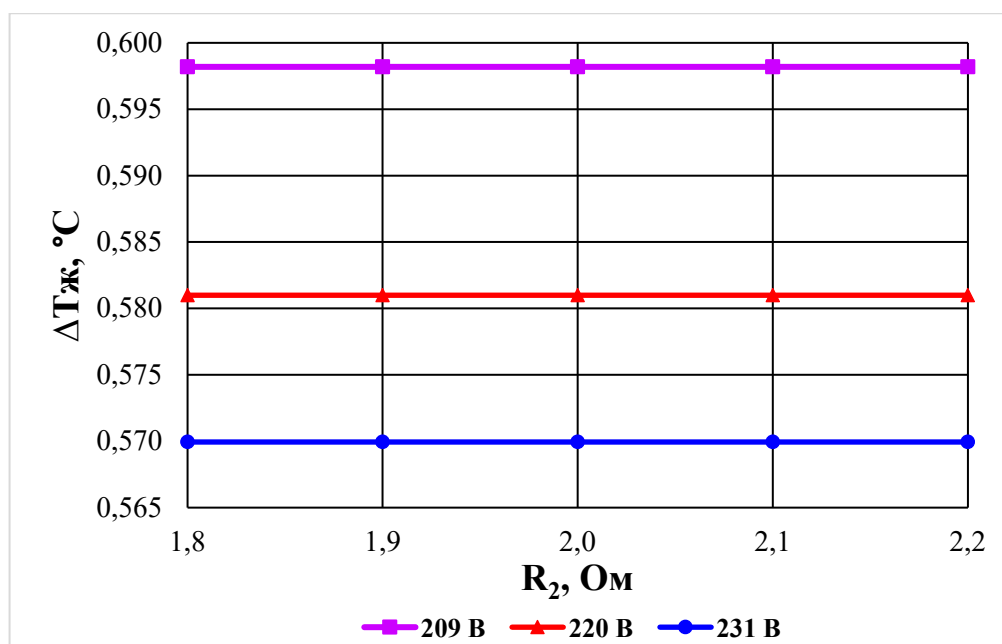


Рисунок 3.14 – Характеристика температур нагрева сепарируемой жидкости в статоре и барабане-роторе БЭСМ в зависимости от величины сопротивления ротора при колебании величины питающего напряжения.

В целях подтверждения основных теоретических положений и установления степени влияния параметров сети (действующего значения напряжения и частоты сети) на энергетические, электромеханические параметры и характеристики проведено экспериментальное исследование натурального образца. Изготовлена натурная модель (НМ) БЭСМ мощностью 4 кВт (рис. 3.15) и выполнен комплекс экспериментальных исследований.

Задачи экспериментального исследования натурального образца:

- экспериментальное подтверждение работоспособности БЭСМ;
- определение энергетических и электромеханических параметров и характеристик БЭСМ;
- построение регулировочных характеристик БЭСМ;
- построение рабочих характеристик БЭСМ;
- сравнение параметров и характеристик сепараторной установки на базе БЭСМ с классической (редукторной) сепараторной установкой;
- определение КПД сепараторной установки на базе БЭСМ и серийной сепараторной установкой.



Рисунок 3.15 – Внешний вид лабораторного стенда для экспериментальных исследований натурной модели БЭСМ мощностью 4 кВт

Испытание НМ БЭСМ проводилось по методикам, изложенным в [34, 35, 37, 38, 39, 59, 99]. Согласно им разработана программа эксперимента:

- получение экспериментальных зависимостей характеристики $n_2 = \varphi(U)$ при $f_c = \text{var}$. (где n_2 – скорость вращения ротора, U – действующее напряжение сети, f_c – частота сети);

- получение экспериментальных зависимостей характеристики $\cos\varphi = \varphi(U)$ при $f_c = \text{var}$ (где $\cos\varphi$ – коэффициент мощности, U – действующее напряжение сети, f_c – частота сети);

- получение экспериментальных зависимостей характеристики $n_2 = \varphi(\rho)$ при $U = \text{var}$ (где n_2 – скорость вращения ротора, ρ – плотность сепарируемой жидкости, U – действующее напряжение сети);

- получение экспериментальных зависимостей характеристики $M_n = \varphi(\rho)$ при $U = \text{var}$ (где M_n – пусковой момент БЭСМ, ρ – плотность сепарируемой жидкости, U – действующее напряжение сети);

- получение экспериментальных значений КПД сепараторной установки на базе БЭСМ и серийной сепараторной установкой.

В целях достоверного воспроизведения режимов БЭСМ и получения точных экспериментальных данных согласно заданной программе исследований, к экспериментальному стенду предъявляются следующие технические требования:

- обеспечивал плавное и управляемое регулирование действующего значения напряжения и частоты сети, питающей НМ;

- обеспечивал проведение эксперимента по определению рабочих характеристик НМ;

- обеспечивал проведение эксперимента по определению теплотехнических характеристик (при проведении эксперимента на натурной модели вместо молока в качестве продукта сепарирования использовалась жидкость имитатор, имеющая те же теплотехнические параметры, что и молоко).

Схема электрическая экспериментального стенда для исследования натурной модели БЭСМ представлена на рис. 3.16 а (основным компонентом данной схемы является АДМР – как электромеханический компонент БЭСМ), схема электрическая экспериментального стенда для исследования натурной модели сепаратора на базе серийной конструкции (ОСЦП-1,5; исполнение с двигателем 4 кВт) представлена на рис. 3.16 б, схема гидравлическая для исследования натурной модели БЭСМ представлена на рис. 3.16 в, схема гидравлическая для исследования натурной модели сепаратора на базе серийной конструкции представлена на рис. 3.16 г, схема тепловая для исследования натурной модели БЭСМ представлена на рис. 3.16 д, схема тепловая для исследования натурной модели сепаратора на базе серийной конструкции представлена на рис. 3.16 е.

Питание от сети нагревательного элемента (ЕК) для подогрева имитатора продукта сепарирования осуществляется через автоматический выключатель (QF1), автотрансформатора (Т1), измерительный комплекс К-50 (ИК1).

Питание от сети асинхронного электродвигателя (М1) для привода насоса подачи имитатора продукта сепарирования осуществляется через автоматический выключатель (QF2), измерительный комплекс К-50 (ИК2).

Питание от сети М2 или БЭСМ (АДМР) осуществляется через автоматический выключатель (QF3), измерительный комплекс ДМК 52 (дублирующий К-50) - ИК3, преобразователь частоты (ПЧ), измерительный комплекс ДМК 52 (дублирующий К-50) - ИК4). Для измерения мощности на валу М2 или БЭСМ (АДМР) к валу последних присоединены тахогенератор (ТГ) для измерения скорости вращения вала М2 или БЭСМ (АДМР), с подключением последнего к вольтметру PV1 (проградуирован в единицах частоты вращения – об/мин), генератор постоянного тока (G), который используется в качестве нагрузки М2 или БЭСМ (АДМР). Питание от сети обмотки возбуждения генератора G осуществляется через автоматический выключатель (QF4), регулируемый источник постоянного тока (ИПТ), состоящий из автотрансформатора (Т2), выпрямителя (В), фильтра (Ф).

Определение мощности, поступающей на элементы ЕК, М1, М2 или НМ БЭСМ (АДМР) осуществляется по приборам ИК1, ... ИК3. Определение мощности «на валу» М2 или АДМР выполнено косвенным методом: электрическая мощность на нагрузке R_2 для G (показания PA_2 , PV_3) за вычетом потерь в генераторе постоянного тока G.

Преобразователь частоты (ПЧ) обеспечивает регулирование уровня и частоты напряжения, которое подаётся на НМ.

Измерительный комплекс ДМК 52 (дублирующий К-50) - ИК1, ...ИК4, включающий в себя ваттметр, вольтметр и амперметр, обеспечивает измерение параметров сети (напряжение, ток, мощность).

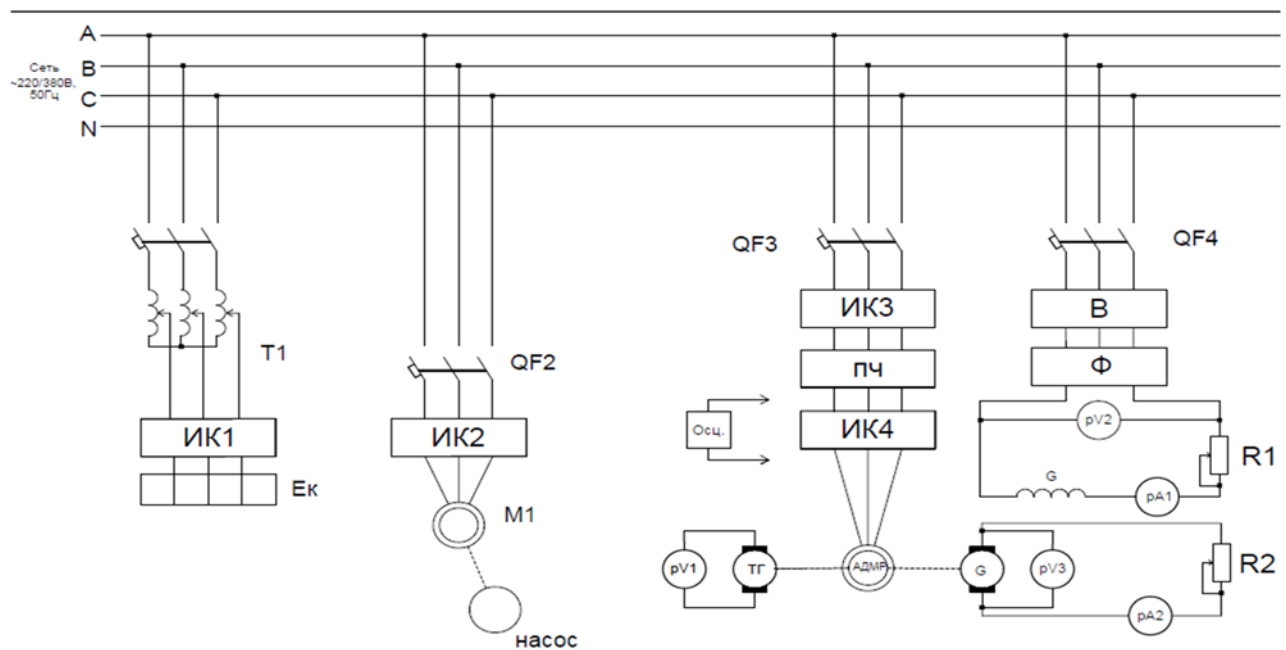


Рисунок 3.16 а – Схема электрическая экспериментального стенда для исследования натурной модели БЭСМ

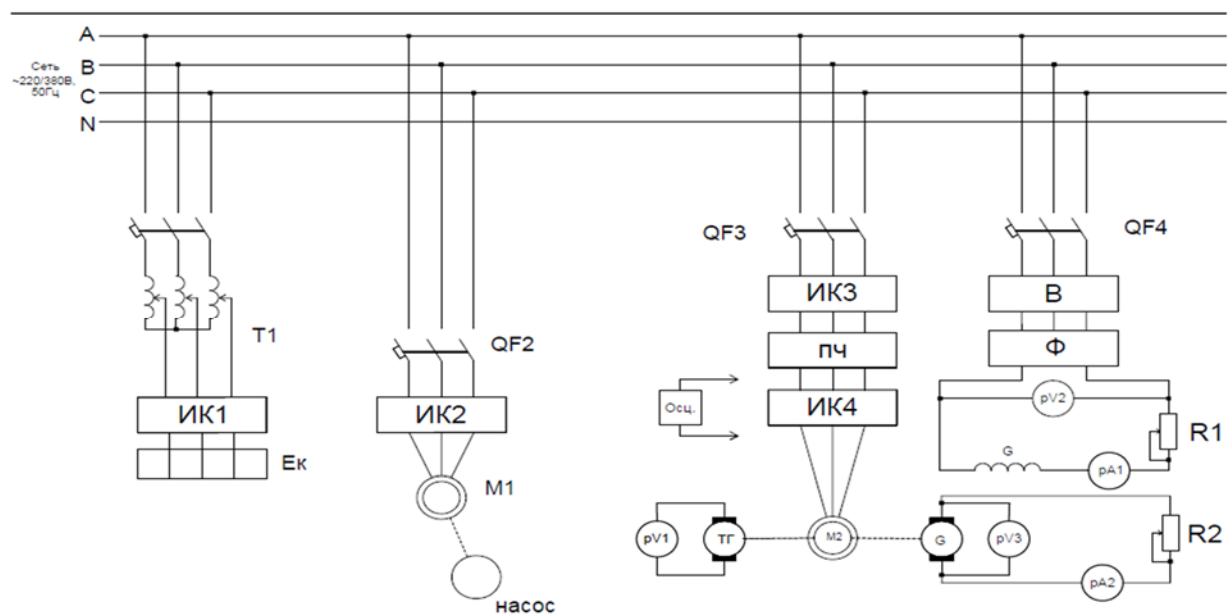


Рисунок 3.16 б – Схема электрическая экспериментального стенда для исследования натурной модели сепаратора на базе серийной конструкции

Амперметры PA1, PA3 и вольтметры PV2, PV3 обеспечивают измерение тока и напряжения на обмотках генератора постоянного тока, являющегося нагрузкой M2 или БЭСМ, а именно: PA1 и PV2 измерение параметров на обмотке возбуждения G, PA2 и вольтметр PV3 измерение параметров на обмотке

якоря G, согласно [34, 37, 38, 40] класс точности измерительных приборов должен быть не ниже 1,0.

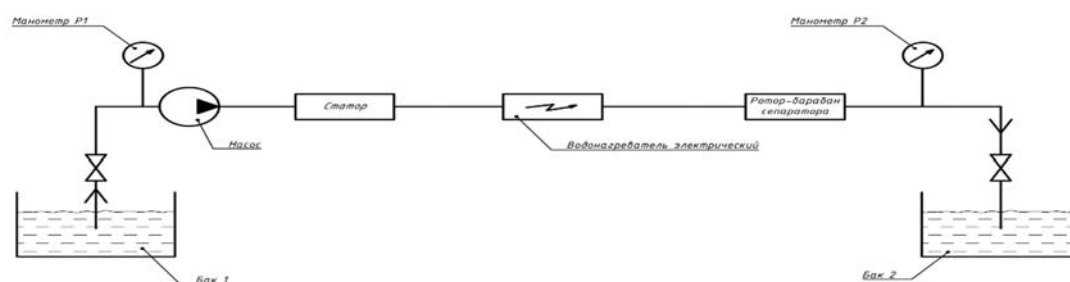


Рисунок 3.16 в – Схема гидравлическая экспериментального стенда для исследования натурной модели БЭСМ

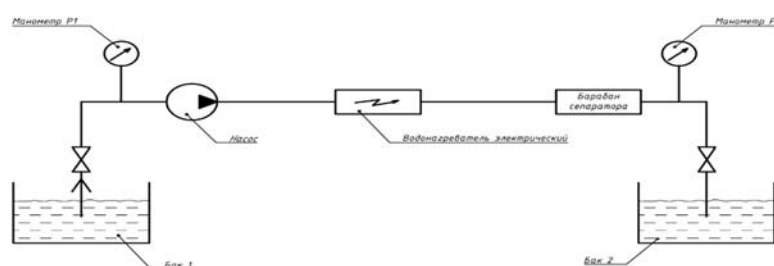


Рисунок 3.16 г – Схема гидравлическая экспериментального стенда для исследования натурной модели сепаратора на базе серийной конструкции

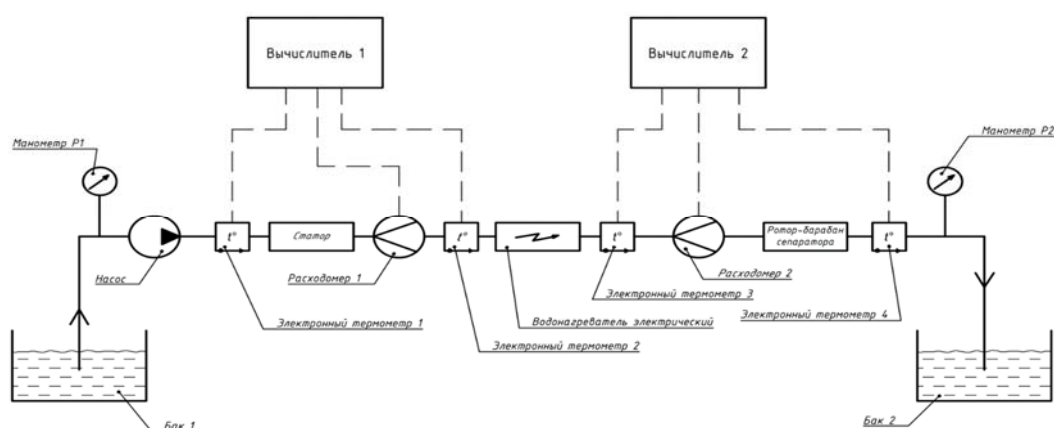


Рисунок 3.16 д – Схема тепловая экспериментального стенда для исследования натурной модели БЭСМ

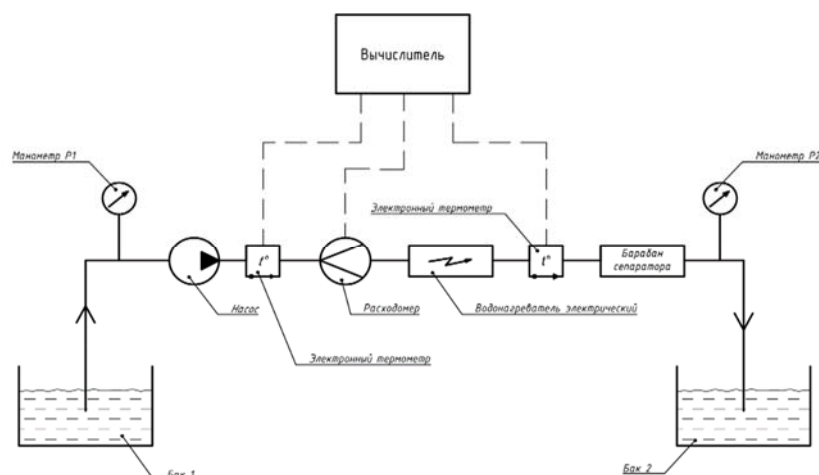


Рисунок 3.16 е – Схема тепловая экспериментального стенда для исследования натурной модели сепаратора на базе серийной конструкции

Таблица 3.3 - Перечень измерительных приборов

Наименование прибора	Измеряемые величины	Пределы измерения	Класс точности
Мультиметр Lovato Electric DMK 52	Сила тока, напряжение, активная и реактивная мощность	Тока до 50 А Напряжения до 600 В	0.5
К-50 (комплект измерительный) (ИК 1)	Сила тока, напряжение, активная и реактивная мощность	Тока до 50 А Напряжения до 600 В	0.5
Микропроцессорный универсальный измеритель мощности DM2436AB (ИК 2)	Сила тока, напряжение, активная и реактивная мощность, Ватт час; var час, частота	Тока до 5 А Напряжения до 600 В Частоты до 65 Гц	0.1
Осциллограф двухканальный цифровой запоминающий АСК-2067	Частота, период, среднее значения напряжения размаха, среднеквадратичное значение напряжения за один период, максимальное и минимальное значения, а также амплитуду напряжения, длительность нарастающего и спадающего фронта, длительность положительного и отрицательного импульса, скважность положительного и отрицательного импульса, задержка нарастающего и спадающего фронта	300 Вольт (пик)	1

Наименование прибора	Измеряемые величины	Пределы измерения	Класс точности
Мультиметр GDM-8145 (V1) (вольтметр)	Напряжение, сила тока, сопротивление	1200 В 20 А	0.5
Мультиметр GDM-8145 (V2) (вольтметр)	Напряжение, сила тока, сопротивление	1200 В 20 А	0.5
Амперметр Omix A-1-1.0/0.5 (A1)	Сила тока	5 А 10 кА	0.5
Амперметр Omix A-1-1.0/0.5 (A2)	Сила тока	5 А 10 кА (с трансформатором)	0.5
Частотомер MS6100	Частота	1.3 ГГц	0.1
Трансформаторы тока	Для измерения тока	30 А	0,5
Энергомонитор-3.3T1	Показатели качества электроэнергии, сила тока, напряжение, частота, cos φ	360 В 3000 А	0.1
Измеритель RLC E7-22	Сопротивление, индуктивность, ёмкость	10 МОМ 20 мФ 10кГн	0.5
Счетчик тепловой энергии «SANEXT mono cu» ультразвуковой (вычислитель количества теплоты, мощности; первичные преобразователи расхода; термопреобразователи сопротивления)	Количество тепловой энергии; тепловая мощность, Гкал/ч.; объем расхода жидкости; объем жидкости; температура жидкости; разность температур жидкости; текущее время.	Гкал, кВт*ч; Гкал/ч, кВт; м ³ /ч; м ³ ; ° С; ° С; ч	2,0
Манометр ТМ-10РМ2	Давление	МПа	1,5

3.2 Результаты экспериментальных исследований

Результаты экспериментальных исследований НМ М2 и БЭСМ отражены в табл. 3.4, 3.5 и в экспериментальных зависимостях, приведённых на рис. 3.17– 3.32 (в сравнении с расчётными характеристиками). Время

достижения номинальной скорости вращения серийной моделью сепараторной установки составило 148 с.

Регулировочные характеристики $n_2 = \varphi(U)$ приведены на рис. 3.17– 3.19, где представлены зависимости скорости вращения ротора БЭСМ от величины действующего значения напряжения сети, при различных частотах питающей сети в сравнении с вычислительным экспериментом. Оценка зависимостей, полученных при экспериментальном исследовании отражена в п. 3.1.

Регулировочные характеристики $\cos \varphi = \varphi(U)$ приведены на рис. 3.20– 3.22, где представлены зависимости коэффициента мощности БЭСМ (без учета ПЧ) от величины действующего значения напряжения сети, при различных частотах питающей сети в сравнении с вычислительным экспериментом. Оценка зависимостей, полученных при экспериментальном исследовании отражена в п. 3.1.

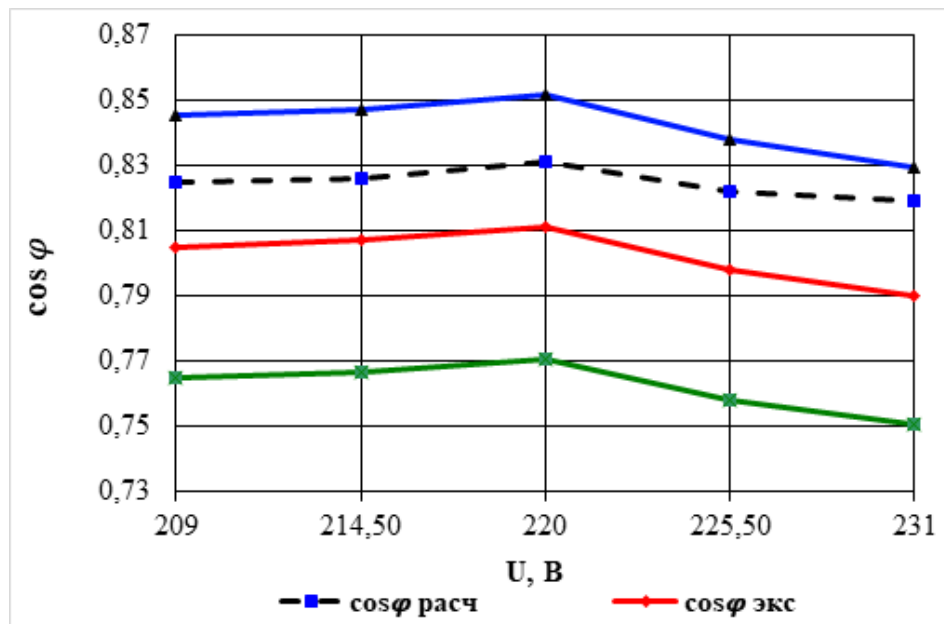


Рисунок 3.20– Зависимости $\cos \varphi$ БЭСМ (без учета ПЧ) от напряжения сети при частоте сети $f = 114,6$ Гц, полученные в ходе вычислительного эксперимента и эксперимента на натурном образце

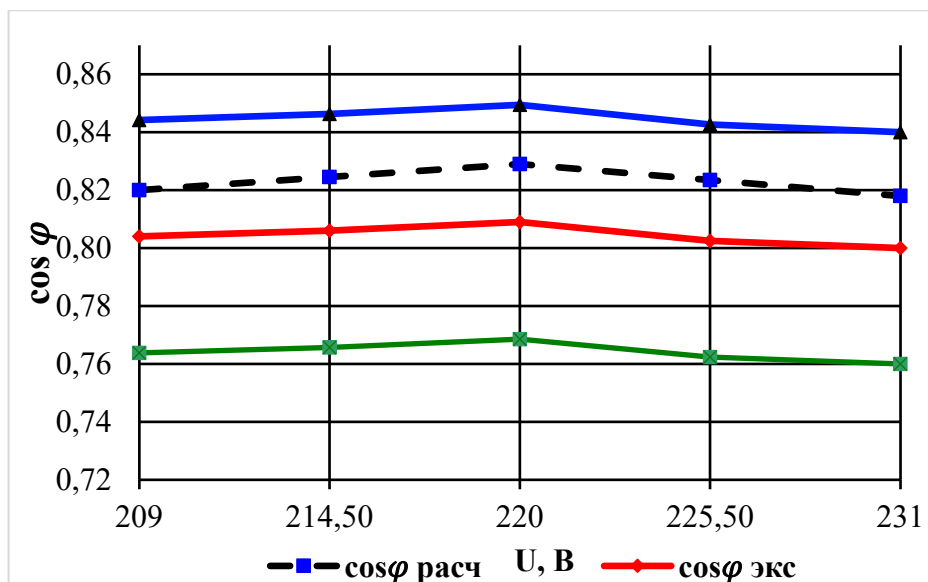


Рисунок 3.21 – Зависимости $\cos \varphi$ БЭСМ (без учета ПЧ) от величины напряжения сети при частоте сети $f = 118$ Гц, полученные в ходе вычислительного эксперимента и эксперимента на натурном образце

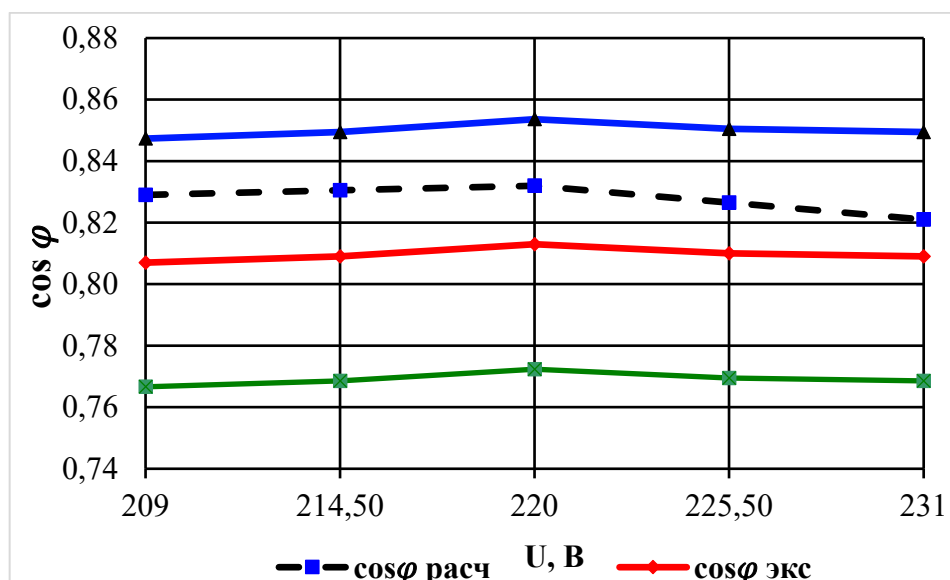


Рисунок 3.22 – Зависимости $\cos \varphi$ БЭСМ (без учета ПЧ) от напряжения сети при частоте сети $f = 111$ Гц, полученные в ходе вычислительного эксперимента и эксперимента на натурном образце

Регулировочные характеристики $n_2 = \varphi(\rho)$ приведены на рис. 3.23-3.25, где представлены зависимости скорости вращения ротора БЭСМ от величины плотности сепарируемой жидкости, при различных величинах напряжения питающей сети в сравнении с вычислительным экспериментом. При проведении экспериментальных исследований на НМ изменение плотности сепарируемой

жидкости проводилась косвенно изменением момента сопротивления на валу БЭСМ путём изменения нагрузки R_2 в цепи якоря генератора G (рис. 3.16). Контроль при задании необходимых параметров проводился по приборам PV2, PA1, PA2, PV3. Предварительно на основании данных вычислительного эксперимента (п.3.1) был выполнен пересчёт значений плотности сепарируемого продукта на необходимые значения тока и напряжения генератора G (табл. 3.5). Оценка зависимостей, полученных при экспериментальном исследовании отражена в п. 3.1.

В табл. 3.5 приняты следующие обозначения:

- ρ - плотность продукта сепарирования;
- H – напор насоса;
- Q – подача насоса;
- M_2 – момент на валу насоса;
- U_2 –напряжение на обмотке якоря генератора G;
- I_2 –ток в обмотке якоря генератора G;
- U_3 –напряжение на обмотке возбуждения генератора G;
- I_3 – ток в обмотке возбуждения генератора G.

Таблица 3.5 – Пересчёт значение плотности сепарируемого продукта на значения тока и напряжения генератора G

Данные из вычислительного эксперимента				Параметры режима G			
ρ , кг/м ³	H , м	Q , м ³ /ч	M_2 , Н*м	U_2 , В	I_2 , А	U_3 , В	I_3 , А
1021	10	2,7	5,9	212	16	220	4,3
1024	10	2,7	6,0	211,5	16,3	220	4,3
1027	10	2,7	6,1	211,3	16,5	220	4,3
1030	10	2,7	6,2	211,1	16,8	220	4,3
1033	10	2,7	6,3	211	17	220	4,3

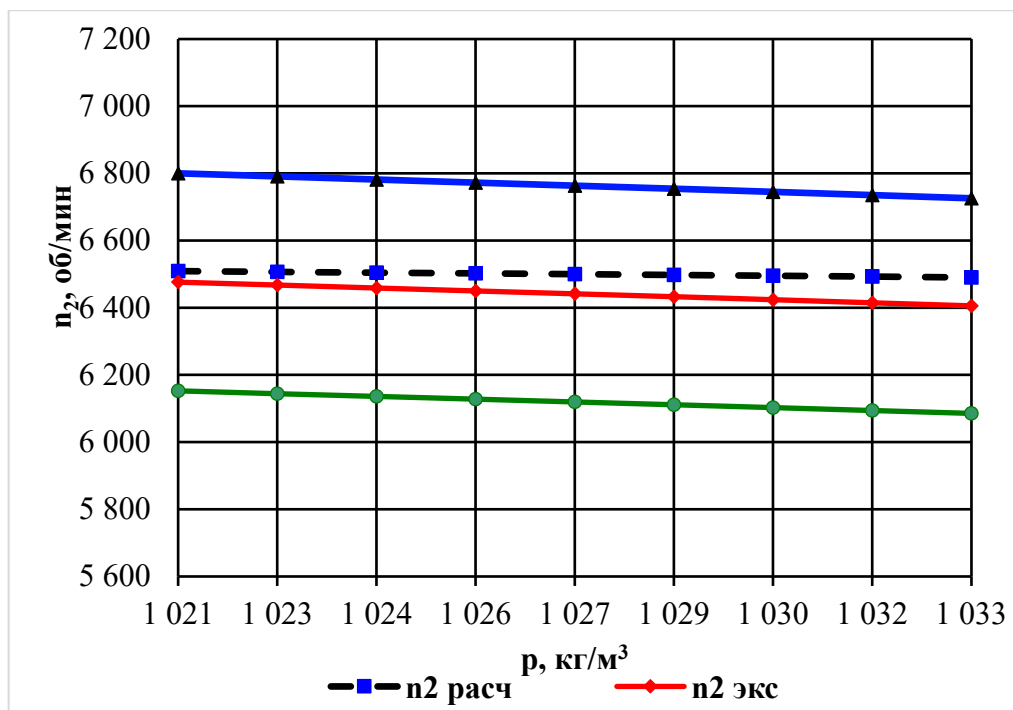


Рисунок 3.23 – Зависимости частоты вращения ротора БЭСМ от плотности продукта сепарирования (момента сопротивления) при величине действующего значения напряжения сети $U=220$ В, частоте сети $f=114,6$ Гц, полученные в ходе вычислительного эксперимента и эксперимента на натурном образце

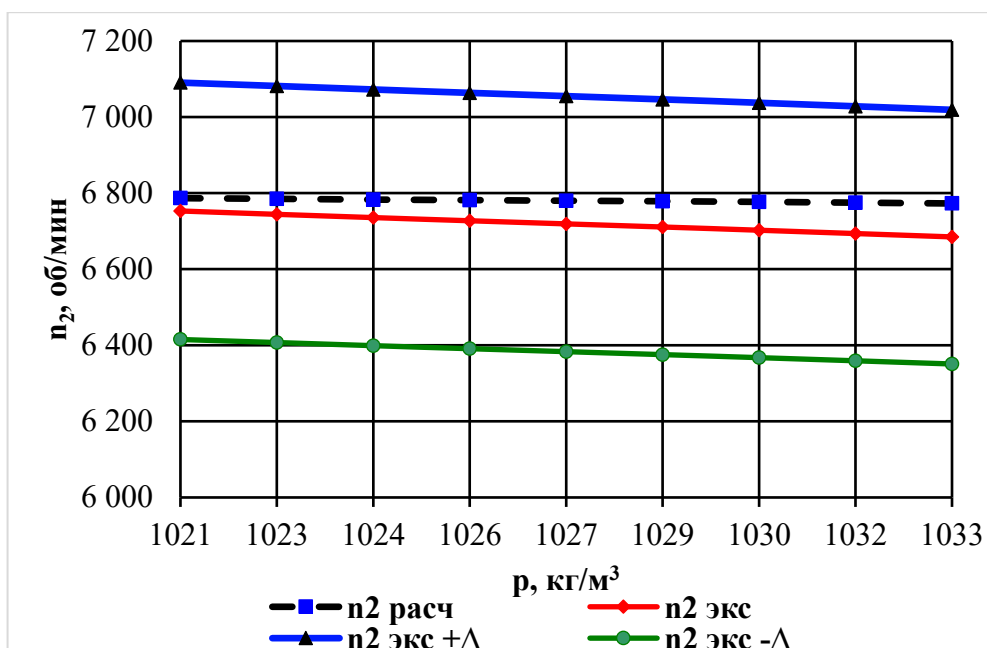


Рисунок 3.24– Зависимости частоты вращения ротора БЭСМ от плотности продукта сепарирования (момента сопротивления) при величине действующего значения напряжения сети $U=231$ В, частоте сети $f=114,6$ Гц, полученные в ходе вычислительного эксперимента и эксперимента на натурном образце

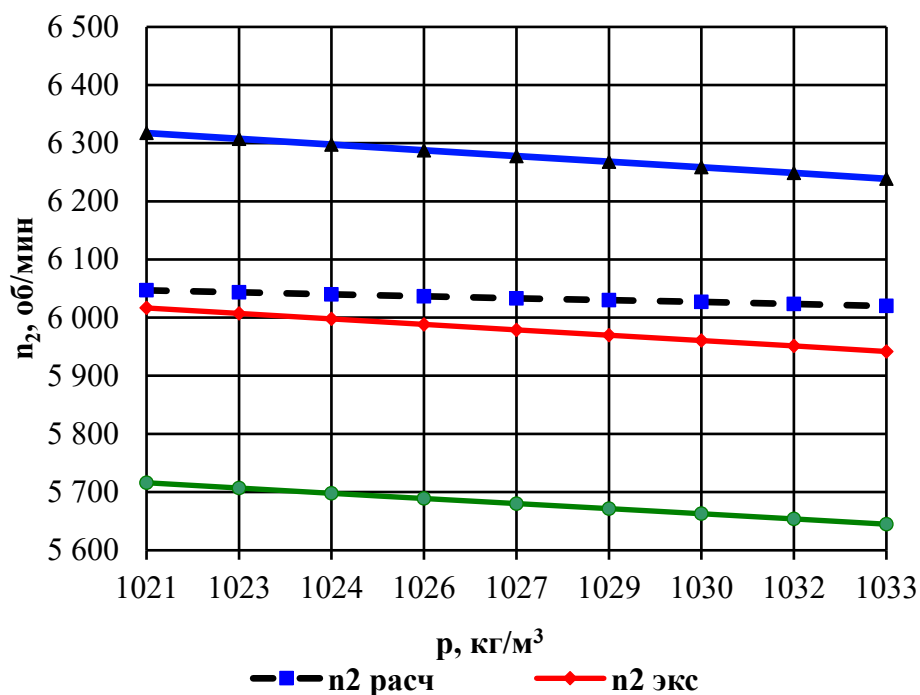


Рисунок 3.25– Зависимости частоты вращения ротора БЭСМ от плотности продукта сепарирования (момента сопротивления) при величине действующего значения напряжения сети $U=209$ В, частоте сети $f=114,6$ Гц, полученные в ходе вычислительного эксперимента и эксперимента на натурном образце

Регулировочные характеристики $M_n = \varphi(\rho)$ приведены в приложении Е, где представлены зависимости момента БЭСМ от величины плотности сепарируемой жидкости, при различных величинах напряжения питающей сети в сравнении с вычислительным экспериментом. При проведении экспериментальных исследований на НМ изменение плотности сепарируемой жидкости проводилась аналогично предыдущей характеристики. Значения величин пускового момента определялись на основании осциллограмм разгона и свободного выбега БЭСМ (рис. 3.29). На рис. 3.30 приведены механические характеристики БЭСМ (кривая 1 – механическая характеристика БЭСМ, кривая 2 – механическая характеристика электродвигателя БЭСМ, кривая 3 – механическая характеристика «свободного выбега», т.е. , механическая характеристика момента сопротивления БЭСМ), полученные на основании метода Иттерберга [43, 49].

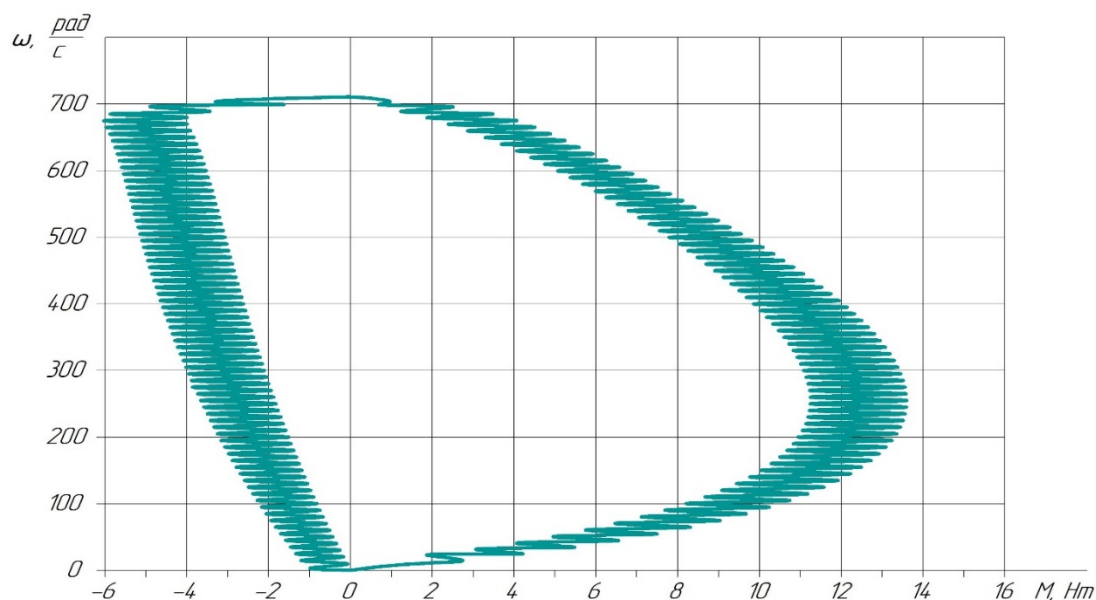


Рисунок 3.29 – Осциллограмма разгона (правая часть осциллограммы) и выбега (левая часть осциллограммы) БЭСМ при плотности продукта сепарирования $\rho=0.5 \text{ кг/м}^3$

На рис. 3.31 приведены (в сравнении) зависимости температуры нагрева сепарируемой жидкости в статоре и барабане-роторе в сепараторной установке на базе БЭСМ от величины напряжения сети, полученные расчетным и экспериментальным путем.

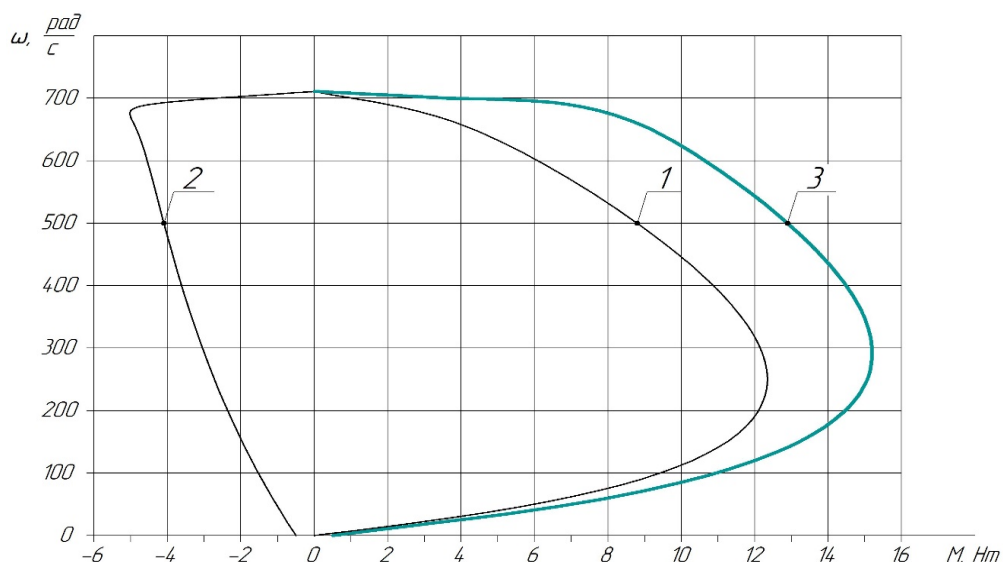


Рисунок 3.30 – Механические характеристики БЭСМ (кривая 1 – кривая динамического момента БЭСМ, кривая 2 – кривая момента сопротивления («свободного выбега»), кривая 3 – кривая электромагнитного момента БЭСМ при плотности продукта сепарирования $\rho=0.5 \text{ кг/м}^3$

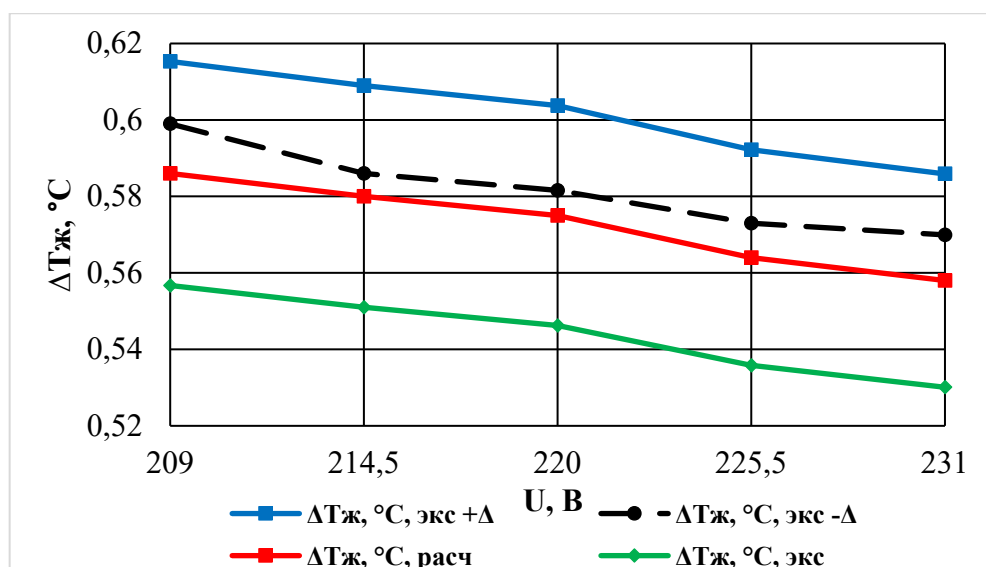


Рисунок 3.31 – Зависимости температуры нагрева сепарируемой жидкости в статоре и барабане-роторе в сепараторной установке на базе БЭСМ от величины напряжения сети, полученные в ходе вычислительного эксперимента и эксперимента на натурном образце

На рис.3.32 приведены (в сравнении) значения энергетических показателей (η и $\cos \varphi$) сепараторной установки на базе БЭСМ и серийной сепараторной установки. Так, на базе двигателя мощностью 4 кВт КПД БЭСМ, определенный расчетным путем, составляет 0,962, что на 1,46 % выше, чем КПД серийной сепараторной установки (0,948).

На базе двигателя мощностью 7,5 кВт КПД БЭСМ, определенные расчетным путем, составляют 0,983, что на 3,5 % выше, чем КПД серийной сепараторной установки (0,948).

КПД БЭСМ (на базе двигателя мощностью 4 кВт), определенный расчетным путем и определенный в процессе эксперимента на НМ (на базе двигателя мощностью 4 кВт), составляют 0,962 и 0,967, соответственно, то есть разница не превышает 5 %.

Адекватность математической модели и результатов математического экспериментов оценивалось с применением программного комплекса «Statistica» [10, 11, 70, 71, 86, 91].

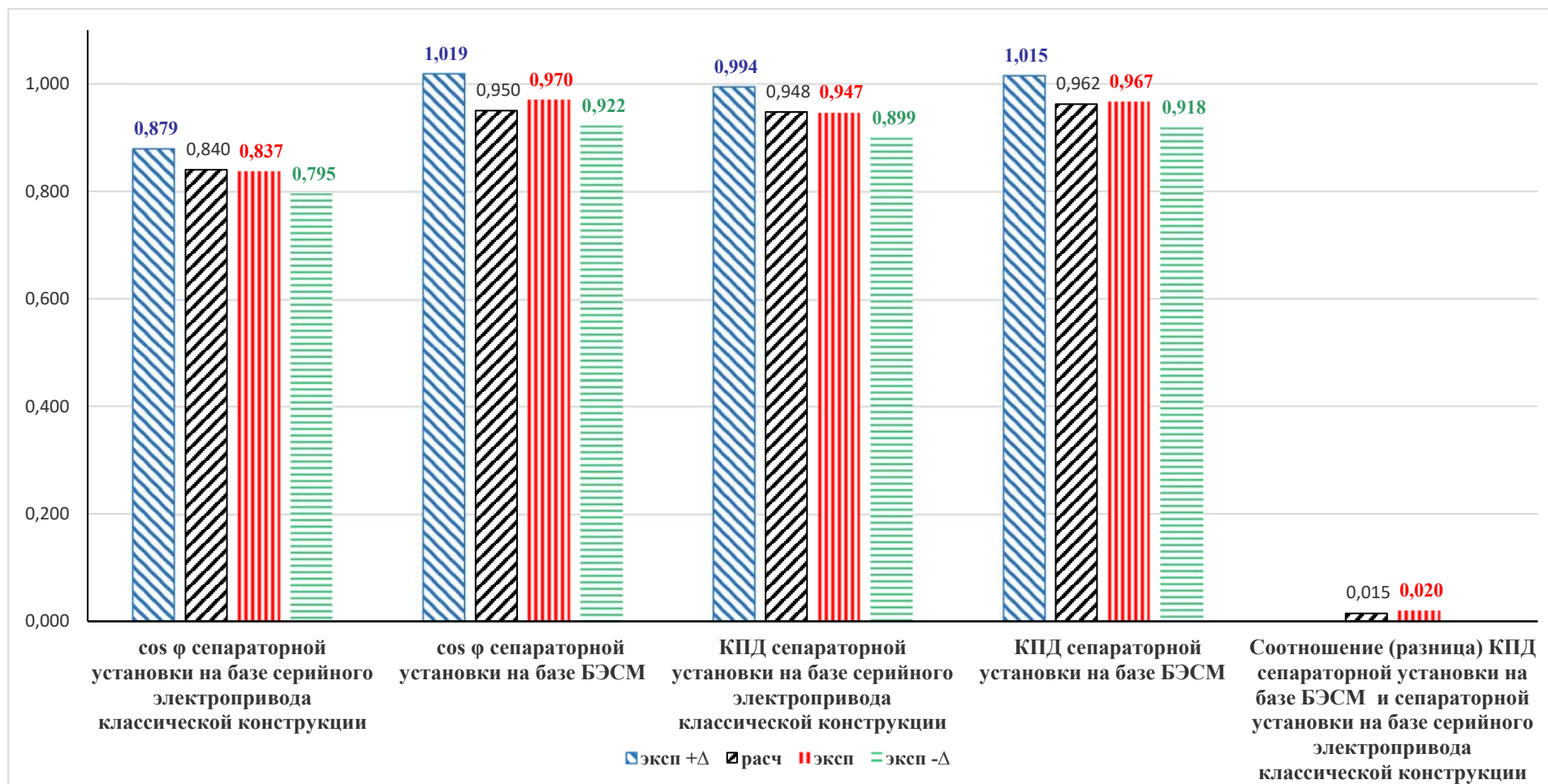


Рисунок 3.32 – Энергетические показатели сепараторной установки на базе БЭСМ и на базе серийной сепараторной установки, полученные в ходе вычислительного эксперимента и эксперимента на натурных образцах

Фрагмент использования программного комплекса «Statistica» для определения расхождения результатов вычислительного эксперимента и эксперимента на натурном образце приведён в приложении Г.

Результаты математического эксперимента сравнивались с результатами натурального эксперимента. Результаты натурального эксперимента тестировались с применением программного комплекса «Statistica».

Достоверность экспериментов проверялась при анализе зависимостей:

- $n_2 = \varphi(U).f_c = \text{var};$
- $\cos \varphi_1 = \varphi(U), f_c = \text{var};$
- $n_2 = \varphi(\rho), U = \text{var};$
- $M_{\pi} = \varphi(\rho), U = \text{var};$
- $\Delta T = \varphi(U).$

Результаты тестирования (прилож. Г) показали, что значения точек графиков $n_2 = \varphi(U). f_c = \text{var}; \cos \varphi_1 = \varphi(U), f_c = \text{var}; n_2 = \varphi(\rho), U = \text{var}; M_{\pi} = \varphi(\rho), U = \text{var}, \Delta T = \varphi(U)$ находятся в пределах допустимого интервала (отклонение 5%).

Графики, приведённые на рис. 3.20–3.31, построены совмещением в одних осях координат расчётной кривой (пунктирные линии чёрного цвета), экспериментальной кривой (сплошные линии красного цвета), экспериментальные кривые с отклонением $-\Delta$ (сплошные линии зелёного чёрного цвета), экспериментальные кривые с отклонением $+\Delta$ (сплошные линии синего цвета).

Величины Δ получены из программного комплекса «Statistica» как допустимые отклонения искомой величины (экспериментальные кривые – сплошные линии красного цвета).

Как видно из рисунков расчётные кривые находятся в допустимом «коридоре» погрешности.

Наложение графиков натурального эксперимента и математического эксперимента показывают, что отклонение результатов математического эксперимента от натурального находится в пределах 5%, что находится в пределах допустимых значениях [54, 85, 91].

Таким образом, адекватность разработанной математической модели, результатов вычислительного эксперимента, методики и результатов расчёта параметров БЭСМ доказаны посредством физического эксперимента.

3.3 Выводы по главе 3

1. Изготовлен экспериментальный образец и проведен физический эксперимент, который подтвердил адекватность математической модели.

2. Проведены исследования БЭСМ в различных режимах его работы, при которых экспериментально подтверждена работоспособность БЭСМ.

3. В ходе экспериментальных исследований (вычислительный эксперимент и эксперимент на натурной модели) получены регулировочные характеристики на основании которых доказано, что величины напряжения и частоты сети оказывают влияние на следующие параметры БЭСМ: максимальный и пусковой моменты, пусковой ток, время пуска, частота вращения ротора-барабана, энергетические показатели (КПД и $\cos \varphi$), температура нагрева сепарируемой жидкости, протекающей по трубкам, опоясывающим обмотку статора, и по ротору-барабану, мощность, отдаваемая элементами конструкции БЭСМ на нагрев сепарируемой жидкости.

Увеличение напряжения питающей сети на 5 % приводит к увеличению следующих параметров: максимального и пускового моментов БЭСМ на 13 % и 14 %, соответственно, пускового тока на 7 %, частоты вращения ротора-барабана до 6,5 %, к уменьшению следующих параметров: времени пуска на 4,3%, КПД и $\cos \varphi$ БЭСМ на 6 % и 1,45 %, соответственно, температуры нагрева сепарируемой жидкости, протекающей по трубкам, опоясывающим обмотку статора, и по ротору-барабану и мощности, отдаваемой элементами конструкции БЭСМ на 1,8 % и 3,8 %, соответственно.

Увеличение частоты питающего напряжения на 2,5 % приводит к уменьшению следующих параметров: максимального и пускового моментов БЭСМ на 5,2 и 5% %, соответственно, пускового тока на 3,8 %, КПД и $\cos \varphi$ БЭСМ уменьшаются на 1,5 % и 0,2%, соответственно, температуры нагрева сепарируемой жидкости, протекающей по трубкам, опоясывающим обмотку статора, и по ротору-барабану на 1,7 %, к увеличению следующих параметров: времени пуска на 2,6 %, частоты вращения ротора-барабана 2,4 %, мощности, отдаваемой элементами конструкции БЭСМ на 2,5 %.

4. В ходе экспериментальных исследований получены энергетические характеристики, на основании которых доказано, что величина плотности сепарируемой жидкости оказывает влияние на следующие параметры: частота вращения ротора-барабана, КПД БЭСМ, температура нагрева сепарируемой жидкости в статоре и барабане-роторе БЭСМ. Температура нагрева сепарируемой жидкости в БЭСМ и $\cos \varphi$ БЭСМ практически остаются неизменными.

Увеличение плотности сепарируемой жидкости на 0,5 % приводит к изменению следующих параметров: температура нагрева сепарируемой жидкости в статоре и барабане-роторе БЭСМ увеличивается на 6 %, частота вращения ротора-барабана БЭСМ уменьшается на 0,9 %, КПД БЭСМ уменьшается на 0,7 %.

5. Величина сопротивления ротора-барабана барабана БЭСМ (при изменении марки стали, из которой изготавливается барабан сепаратора) оказывает влияние на следующие параметры: частота вращения ротора-барабана, КПД БЭСМ. Температура нагрева сепарируемой жидкости в БЭСМ и $\cos \varphi$ БЭСМ практически остаются неизменными. Увеличение сопротивления ротора-барабана БЭСМ на 10 % приводит к уменьшению следующих параметров: частоты вращения ротора-барабана и КПД БЭСМ на 0,8 % и 3,2%, соответственно.

6. В статоре и роторе-барабане БЭСМ происходит подогрев продукта сепарирования, и использование частичного подогрева сепарируемого продукта в статоре и роторе-барабане БЭСМ позволяет повысить КПД

сепараторной установки. Подогрев продукта сепарирования в статоре и роторе-барабане БЭСМ в сепараторных установках на базе двигателей мощностью 4 кВт и 7,5 кВт составляют $0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $0,73\text{ }^{\circ}\text{C}$, соответственно. Так, на базе двигателя мощностью 4 кВт КПД БЭСМ, определенный расчетным путем, составляет 0,962, что на 1,46 % выше, чем КПД серийной сепараторной установки (0,948). На базе двигателя мощностью 7,5 кВт КПД БЭСМ, определенные расчетным путем, составляют 0,983, что на 3,5 % выше, чем КПД серийной сепараторной установки (0,948). КПД БЭСМ (на базе двигателя мощностью 4 кВт), определенный расчетным путем и определенный в процессе эксперимента на НМ (на базе двигателя мощностью 4 кВт), составляют 0,962 и 0,967, соответственно, то есть разница не превышает 5 %.

7. Экспериментально определены и исследованы характеристики БЭСМ, которые позволяют учитывать влияние параметров БЭСМ (сопротивление ротора-барабана) и внешних факторов (действующее значение и частота питающего напряжения, плотность сепарированного продукта) на скорость вращения барабана сепаратора и момент БЭСМ. Наибольшее влияние на энергетические параметры БЭСМ (КПД и $\cos \varphi$) оказывает величина действующего значения напряжения сети. Полученные экспериментально характеристики близки к расчетным, подтверждают правильность теоретических положений и методики расчета параметров математической модели, изложенных в гл. 2. Погрешность при этом не превышает 5%.

8. Получены функциональные связи между динамическими характеристиками и параметрами разработанного БЭСМ, которые позволяют получить регулировочные и энергетические характеристики проектируемых БЭСМ до их натурного изготовления.

9. В процессе проведения эксперимента на натурной модели доказано, что в режиме пуска время достижения номинальной скорости вращения БЭСМ в сравнении с серийной сепараторной установкой сокращено на 85 %.

4. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БЕЗРЕДУКТОРНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА СЕПАРАТОРА МОЛОКА

4.1 Расчёт стоимости модернизации сепараторной установки для переработки молока

По данным ГКУ КК «Кубанский сельскохозяйственный информационно-консультационный центр» производство молока в России по итогам 2023 года составило 33,5 млн тонн, что практически на 0,5 млн тонн больше, чем за 2022 год, а экспорт молочной продукции из России в 2023 году вырос на 18% по сравнению с предыдущим годом. При этом отмечается рост тарифов энергоносителей. В связи с чем появляется ситуация, когда необходимо наращивать производство переработки молока, но при этом увеличение единиц электрооборудования приведет к увеличению потребления электроэнергии, поэтому рациональным решением является использование энергоэффективного электрооборудования. Как было показано раньше разработанный БЭСМ позволяет использовать нагрев от потерь электрической машины для подогрева молока. Согласно теории электропривода нагрузка на валу электродвигателя приводит к росту тока в его обмотках, из-за чего появляется рост температуры, которая не должна превышать значений приводящих к снижению электроизоляционных свойств, что связано с опасностью пробоя изоляции обмоток. Однако для разработанного решения БЭСМ тепло отводится за счет прохождения молока через ротор и охлаждающие трубки статора, вследствие чего возможно снизить потребление электроэнергии нагревателя молока. Оптимальные температурные параметры подогрева молока – $(40 \pm 5) ^\circ\text{C}$ [90]. В ходе экспериментальных исследований доказано, что подогрев продукта сепарирования в статоре и ротор-барабане БЭСМ на базе двигателя мощностью 4 кВт составляет $0,58 ^\circ\text{C}$, при этом мощность водонагревателя необходимая для подогрева молока уменьшается с 49,32 до 47,49 кВт.

Наиболее близким по параметрам объёма переработки молока для фермерских хозяйств является сепаратор марки «Сепаратор-сливоотделитель Г9-ОСП-3» мощностью 4 кВт и производительностью 3000 дм³/ч [69].

При расчете величин потребляемой электроэнергии и энергии, идущей на покрытие потерь проведены на основании значений соответствующих мощностей (потерь мощности) и годового числа часов работы цеха при двухсменной работе на основании данных «Календаря бухгалтера на 2024 год» с учетом режима функционирования обработки молока после дойки коров [47]. Количество рабочих дней в 2024 году — 248. Примем время работы в день 3 часа. Результаты расчета годового энергопотребления сепараторных установок сведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Результаты расчета годового энергопотребления сепараторных установок с двигателем 4 кВт.

Потребители электроэнергии сепараторной установки	Серийный электропривод классической конструкции		Исследуемый БЭСМ		W ₁₆ - W _{1с}
	P _{1с} , кВт	W _{1с} , кВт*ч	P ₁₆ , кВт	W ₁₆ , кВт*ч	
Привод барабана сепаратора	4,64	3452,16	5,3	3943,2	-491,04
Привод насоса подачи продукта сепарирования	0,17	126,48	0,17	126,48	0
Электрический подогрев продукта сепарирования	36,3	27007,2	34,3	25519,2	1488
ИТОГО:	41,11	30585,84	39,77	29588,88	996,96

Предположим, что подогрев молока осуществляется электрическим нагревателем. Затраты на электроэнергию рассчитывается по известной формуле [65]:

$$\mathcal{E}_w = C_w \cdot W_n = 6,53 \cdot 996 = 6500 \text{ руб.} \quad (4.1)$$

где C_w – действующий тариф на электроэнергию 6,53, руб./кВт·ч;

В случае применения первой ценовой категории при оплате электроэнергии для предприятий её стоимость может вырасти в 1,5 – 2 раза [87].

Кроме того, из теории электропривода типовой расчет выбора мощности электродвигателя для электроустановки основывается на расчете потерь мощности и его нагреве [8, 9]. Расчеты произведем для электродвигателя, у которого класс нагревостойкости F (155 °C) и режим работы продолжительный S1, так как на рынке наиболее распространены электродвигатели с этими параметрами. Рассчитаем допустимую по нагреву мощность нагрузки двигателя при снижении температуры (– 40 °C), вследствие нагрева молока.

$$P_{\Theta} = P_n \sqrt{1 + \Delta\tau(\alpha + 1)/\tau_{don}}, \quad (4.2)$$

$$\Delta\tau = \Theta_{ст} - \Theta_{факт}, \quad (4.3)$$

где $\Theta_{ст} = 40^{\circ}\text{C}$ – стандартное значение температуры;

τ_{don} – температура, соответствующая классу нагревостойкости, °C;

$$\Delta\tau_{30} = 40 - (-40) = 80^{\circ}\text{C},$$

$$P_{30} = 3 \cdot \sqrt{1 + 80 \cdot (0,5 + 1)/155} = 3,99 \text{ кВт}.$$

Таким образом, требуемую механическую мощность возможно отбирать от электродвигателя меньшего габарита на одну ступень, что при массовой производительности существенно увеличит экономический эффект D_r .

Доход D_t , получаемый в год будет определяться в виде снижения потребляемой электроэнергии на предварительный подогрев молока и снижения габарита электродвигателя на одну ступень мощности (стоимость электродвигателя для привода сепаратора мощностью 4 кВт – 18000 руб., 3 кВт – 13000 руб.)

$$D_{\Sigma 6} = \mathcal{E}_w + \mathcal{E}_o = 6500 + 5000 = 11500 \text{ тыс.руб} \quad (4.4)$$

В главе 1.1 отмечено, что Краснодарском крае насчитывается 30 крупных и средних предприятий молочной промышленности, поэтому в первый год планируется осуществить выпуск 30 модернизированных сепараторных установок с БЭСМ. Во второй год планируется выпуск 60 единиц установок с

БЭСМ, а в третий год – 100, для выхода на рынок Северо-Кавказского региона насчитывающий 4842 предприятий [92].

Рассмотрим сотрудничество Кубанского государственного технологического университета с заводом производителем сепараторов молока в рамках научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы (НИР и ОКР). Разработка и проектирование конструкции БЭСМ, испытания натурного образца предусматривается выполнить на базе университета. Постановка в серийный выпуск модернизированной установки Г9-ОСП-3 мощностью 4 кВт с заменой приводного двигателя на БЭСМ. Приведем расчеты экономических показателей с выбором лучшего варианта - существующего серийно выпускаемого сепаратора Г9-ОСП-3 и предлагаемой установки с БЭСМ

Произведем технико-экономическое обоснование разработки конструкторского характера при постановке на серийное производство в соответствии с методикой, описанной в [77].

Договор НИР и ОКР университета и завода изготовителя предусматривает оплату труда сотрудников профессорско-преподавательского состава. Для обоснования заработной платы используются нормы трудоемкости работ и часовых тарифных ставок [8877] (таблица 4.2). Основная заработная плата определяется по формуле [77]

$$Z_0 = \sum_{i=1}^n T_i S_{qi} = 327330 \text{ руб.}, \quad (4.5)$$

где T_i - трудоемкость i -го вида работ, ч; S_{qi} - часовая тарифная ставка исполнителя при выполнении i -го вида работ.

Дополнительная заработная плата определяется следующим образом:

$$Z_\partial = kZ_0 = 0,2 \cdot 327330 = 65466 \text{ руб.} \quad (4.6)$$

Необходимо учесть оплату труда на пусконаладочные работы и испытания, нормы трудоемкости примем из [98].

Общий фонд зарплаты с начислениями составит:

$$Z_{\text{общ}} = Z_0 + Z_\partial + \frac{Z_0 + Z_\partial}{100} r = 327330 + 65466 + \frac{327330 + 65466}{100} 26,1 = 495315 \text{ руб.}$$

где r - единый социальный налог $r = 26,1\%$;

Накладные расходы, учитывающие затраты на управление и хозяйственное обслуживание проводимых работ

$$H = \frac{Z_0 + Z_{\phi}}{100} \mu = \frac{327330 + 65466}{100} 80 = 314236 \text{ руб.} \quad (4.7)$$

где μ - накладные расходы, примем 80 %;

Таблица 4.2 – Заработная плата специалистов

№ п/п	Этапы разработки	Исполнители	Почасовая ставка, руб.	Количество исполнителей	Трудоемкость, ч.	Затраты, руб.
1	Разработка ТУ и ТЗ на БЭСМ	профессор	560	1	30	16800
2	Разработка принципиальной схемы БЭСМ	ассистент	280	1	400	112000
3	Разработка конструкции макета БЭСМ	аспирант	150	1	5	750
4	Испытания образца БЭСМ	профессор	560	1	10	5600
		ассистент	280	1	10	2800
5	Оформление протоколов	аспирант	150	1	3	450
6	Разработка технического условия на БЭСМ	профессор	560	1	300	168000
7	Разработка конструкции БЭСМ	профессор	560	1	3	1680
8	Крупногабаритная сборка БЭСМ	аспирант	150	2	20	6000
9	Оформление испытаний	аспирант	150	1	3	450
10	Испытания нового БЭСМ	ассистент	280	1	15	4200
11	Оформление документации	аспирант	150	1	20	3000
		ассистент	280	1	20	5600
	ИТОГО					327330

При выполнении работ в рамках договора НИР и ОКР будут потребляться электроэнергия и другие энергоносители, расчет затрат на которые

произведён в соответствии с действующими тарифами Краснодарского края (таблица 4.3 и 4.4).

В первый год затраты на энергоносители составят

$$Z_9 = \sum_{i=1}^m W_{\text{э}i} C_{\text{э}i} = 20091 + 1406 = 21497 \text{ руб.} \quad (4.8)$$

Таблица 4.3 – Затраты на электроэнергию на единицу продукции

Наименование прибора	Длительность эксплуатации, час	Потребляемая мощность, кВт	Расход электроэнергии, кВт·ч	Тариф, руб./кВт·ч	Стоимость, руб.
1. Испытательный стенд	451	5,3	2390,3	6,53	15608,7
2. Освещение	585	0,3	175,5	6,53	1146,02
3. Ноутбук и осциллограф	5110	0,1	511	6,53	3336,83
Итого					20091,5

Таблица 4.4 – Затраты на дополнительные энергоносители

Наименование энергоносителей	Расход, куб. м, Гкал	Тариф, руб. /куб. м, руб. /кв. м, руб./Гкал	Стоимость, руб.
1. Водоснабжение	320	47,46	15187,2
2. Канализация	244	34,51	8420,44
3. Отопление	4,7289	2330,3	11019,71
4. Горячее водоснабжение	3,118	2425	7561,056
Всего			42188,4
ИТОГО в первый год на единицу продукции			1406

Для создания натурного образца и проведения испытаний необходимы комплектующие, пускозащитную и измерительную аппаратуру, расчет затрат с учетом, действующих на 2024 г. которых приведен в таблицах 4.5 и 4.6.

Таблица 4.5 – Затраты на дополнительные комплектующие

Наименование материалов	Единица измерения	Норма расхода	Цена единицы, руб.	Стоимость, руб.
1. Провод ПВСнг(А) 5х1,5	м	10	94	940
2. Розетки 1Ф РС620-3-ФСр 1-ая з/к IP54 о/у Форс ИЭК	шт.	2	564	1128
3. Розетка IEK 135, наружная установка, 63А, 3Р+Е+N, 380В, IP54, ИЭК PSR12-063-5(с вилкой)	шт.	4	1338	5352
4. Дифференциальный автомат Энергия АВДТ-32 2/16А30mA, тип АС х-ка 4,5кА	шт.	3	1431	4293
5. Дифференциальный автоматический выключатель 4Р 63А 30mA тип АС х-ка 4,5кА	шт.	1	1632	1632
Мультиметр Lovato Electric DMK 52	шт.	1	12 996	12996
Мультиметр ОВЕН ИМС-Ф1.Щ1 (ИК 1, ИК2)	шт.	2	7800	15600
Двухканальный цифровой осциллограф-мультиметр Актаком АСК-2028	шт.	1	40500	40500
МЕГЕОН 22130 Мультиметр настольный (V1, V2) (вольтметр)	шт.	2	22500	45000
Амперметр Omix A-1-1.0/0.5 (A1, A2)	шт.	2	2811	5622
Частотомер MS6100	шт.	1	15800	15800
Трансформатор тока ТТЕ 30 100/5А кл. точн. 0.5 5В.А ЕКФ tte-30-100/tc-30-100	шт.	12	1300	15600
Анализатор качества электроэнергии АКЭ-2100	шт.	1	200100	200100
Измеритель RLC E7-22	шт.	1	22000	22000
Счетчик тепловой энергии «SANEXT моно си»	шт.	1	4495	4495
Манометр ТМ-10РМ2	шт.	1	450	450
ИТОГО				391508
Вспомогательные материалы 10 %				39150,8
Всего				430658,8

Таблица 4.6 – Основные комплектующие изделия

Наименование изделия	Тип, марка	Количество, шт.	Цена за единицу, руб.	Стоимость, руб.
1. Рама, корпус		1	45000	45000
2. Преобразователь частоты	ПЧВ1-4К0-В [М01] 4,0 кВт 380 В	1	32800	32800
Итого				77800

Суммарные затраты на сырье и материалы для создания БЭСМ на основе расчета затрат на изготовления БЭСМ как новую электрическую машину [6] (таблица 4.7) составят:

$$C_m = \sum_{j=1}^J P_j f_j = 430658,8 \text{ руб.}; \quad C_k = \sum_{k=1}^K l_k z_k = 77800 \text{ руб.} \quad (4.9)$$

где P_j – норма расхода j -го материала; f_j – цена единицы материала; l_k – количество комплектующего изделия k -го типа; Z_k – цена единицы k -го изделия.

Таблица 4.7 – Калькуляция затрат на изготовление БЭСМ

№ п/п	Наименование работ	№ единичн. расценок	Ед. изм.	Кол-во работ	Трудозатраты чел/час		Стоимость работ	
					на един.	всего	един.	всего
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Разборка установки	ЕНВ п. 195	шт.	1	1	0,95	603	573
2	Составление схемы обмотки БЭСМ	ЕНВ п. 203	шт.	1	1	0,45	625	281
3	Очистка и изолировка пазов	ЕНВ п. 204	шт.	1	1	1	643	643
4	Изготовление и монтаж обмотки БЭСМ	ЕНВ п. 205	шт.	1	1	4,54	514	2334
5	Сборка и испытание БЭСМ	ЕНВ п. 199	шт.	1	1	1,71	623	1066
6	Окраска БЭСМ	ЕНВ п. 245	шт.	1	1	0,06	556	33
	Затраты ОМТС							1137
	Стоимость материалов всего в том числе:							4930

1	Провод обм. ПЭТВ2		кг	1,8			1301	2342
2	Синтофлекс		кг	0,12			9654	1158
3	Трубка изоляционная		м	1			583	583
4	Провод монтажный		м	1,3			273	355
5	Шнур-чулок		м	4,8			123	593
6	Лак изоляционный		кг	0,31			1668	517
7	Растворитель		кг	0,1			1288	129
8	Смазка		кг	0,05			119	6
9	Древесина		м ³	0,0015			52510	79
10	Краска		кг	0,12			1572	189
11	Бензин		кг	1,5			99	15
12	Крепежные изделия		кг	0,07			209	15
13	Электроды сварочные		кг	0,01			682	7
14	Полотно не тканное		м	0,1			682	68
15	Подшипники		шт.	2			745	1490
	Итого: полная стоимость							12424

Тогда общие затраты на проведение НИР и ОКР определяются как:

$$S_{НИОКР} = Z_{общ} + Z_3 + H + (C_m + C_k)k_{тр} =$$

$$= 495,3 + 21,4 + 314,62 + (430,6 + 77,8)1,05 = 1365 \text{ тыс.руб.}$$

Для постановки на серийное производство необходимо привлечь специалистов для слесарных, сборочных, монтажных и регулировочных технологических операций [6, 77]. Расчет затрат на заработную плату производственных рабочих приведены в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Основная заработная плата производственных рабочих

Наименование технологической операции	Разряд работ	Норма времени, нормо-час	Часовая тарифная ставка, руб.	Заработная плата, по тарифу, руб.
1. Слесарная	3	5	330	1650
2. Сборочная	3	18	396	7128
3. Монтажная	3	20	396	7920
4. Регулировочная	4	8	462	3696
ИТОГО		51		20394
Доплата за качество 10%				2039,4
Всего				22433,4

Приведем для удобства калькуляции суммарных затрат постановки в серийное производство в виде таблицы 4.9. Расчет отдельных составляющих можно произвести по ранее приведенным формулам 4.5 - 4.9.

Таблица 4.9 – Затраты на серийное производство автономного источника

Статья калькуляции	Сумма, руб.
1. Сырье и материалы	430659
2. Покупные комплектующие изделия	77800
3. Основная з/п производственных рабочих	22433
4. Дополнительная з/п производственных рабочих	2243
5. Отчисления в социальный фонд	5855
6. Стоимость израсходованных энергоресурсов	21498
Всего на единицу продукции	560488

Заработная плата производственных рабочих на одну единицу изготовления определяется по формуле:

$$Z_o = \eta \sum_{d=1}^D t_d S_{ud} = 65466 \text{ руб}, \quad (4.10)$$

где η – коэффициент, учитывающий премию (1,1... 1,2); td – норма времени изготовления изделия по d -му разряду, нормо-час; S_{ud} – часовая тарифная ставка рабочего d -го разряда, руб /нормо-час.

Суммарная себестоимость изделия в результате рассчитывается по формуле:

$$C_n = [C_m + C_k + Z_o + 3(1 + \mu)](1 + \psi) = \\ = [430,6 + 77800 + 21,5 + 22,4(1 + 1,2)](1 + 0,02) = 608,2 \text{ тыс. руб}$$

где μ – коэффициент, учитывающий величину накладных расходов (зависит от организации изготовителя, составляет от 1,20 до 2); ψ – коэффициент, учитывающий внепроизводственные расходы (0,02...0,05); 3 – сумма основной и дополнительной заработной платы, а также отчислений в социальный фонд, руб.

Оптовая цена единицы изделия определяется путем суммирования полной себестоимости и валовой прибыли Π_s (принимая 25%) [77].

$$\Pi_{opt} = C_n + \Pi_s = 608,2 + 152,1 = 760,3 \text{ тыс. руб} \quad (4.11)$$

Чистую прибыль получают как разность валовой прибыли $\Pi_{\text{в}}$ и налога на прибыль $\Pi_{\text{н}}$,

$$\Pi = \Pi_{\text{в}} \left(1 - \frac{\Pi_{\text{н}}}{100} \right) = 152,1 \left(1 - \frac{20}{100} \right) = 121,6 \text{ тыс. руб} \quad (4.12)$$

$$\Pi_{\text{н}} = 0,25 \cdot C_{\text{н}} = 0,25 \cdot 608,3 = 152,1 \text{ тыс. руб} \quad (4.13)$$

Налог на прибыль принимается в соответствии с принятой ставкой (20%).

Договорная цена выпускаемого изделия устанавливается с учетом налога на добавленную стоимость $\Pi_{\text{д}}$ ($\Pi_{\text{д}}$ составляет 15 % от оптовой цены)

$$\Pi_{\text{дог}} = \Pi_{\text{опт}} \left(1 + \frac{\Pi_{\text{д}}}{100} \right) = 760,3 \left(1 + \frac{15}{100} \right) = 912,4 \text{ тыс. руб.} \quad (4.14)$$

Годовая прибыль с учетом экономии электроэнергии на подогрев молока и уменьшении затрат при использовании меньшего габарита БЭСМ в первый год:

$$\Pi_{\text{г1}} = 30 \cdot 11,5 + 30 \cdot 121,2 = 3994,6 \text{ тыс.руб.}$$

Во второй год:

$$\Pi_{\text{г2}} = 60 \cdot 11,5 + 60 \cdot 121,2 = 7989,3 \text{ руб.}$$

В третий год:

$$\Pi_{\text{г3}} = 100 \cdot 11,5 + 100 \cdot 121,2 = 13315,5 \text{ тыс.руб.}$$

Приведем расчет единовременных затрат в сфере производства, разработанного БЭСМ.

$$K_{\text{н}} = K_{\text{нпз}} + K_{\text{нф}} = 2277,3 + 4016,1 = 6293,4 \text{ тыс. руб.} \quad (4.15)$$

где $K_{\text{нпз}}$ – предпроизводственные затраты, тыс. руб.; $K_{\text{нф}}$ - капитальные вложения в производственные фонды завода- изготовителя, тыс. руб.

Предпроизводственные затраты с учетом выпуска в первый год 30 шт. изделий определяются по формуле:

$$K_{\text{нпз}} = S_{\text{НИОКР}} + K_{\text{осв}} = 1364,9 + 30 \cdot 608,2 \cdot 0,05 = 2277,3 \text{ тыс. руб.}$$

где $S_{ННЮКР}$ - сметная стоимость ННЮКР; $K_{осв}$ - затраты на освоение производства и доработку опытных образцов ($K_{осв}$ принимаем 5% от суммарной стоимости общего объема выпуска автономных источников).

Капитальные вложения в производственные фонды рассчитываются по формуле:

$$K_{нф} = K_{оф} + K_{ос} + K_{нр} = 2000 + 0,2 \cdot 30 \cdot 608,2 + \\ + (2000 + 1824,8) \cdot 0,05 = 6293 \text{ тыс. руб.},$$

где $K_{оф}$ - стоимость всех видов основных производственных фондов, с учетом необходимых дополнительных затрат на новое оборудование и настройку имеющегося, в сумме 2000 тыс. руб.; $K_{ос}$ - пополнение оборотных средств, ($K_{ос}$ принимается в размере 20% от себестоимости годового выпуска продукции); $K_{нр}$ - прочие капитальные вложения ($K_{нр}$ принимается в размере 5% от $K_{оф} + K_{ос}$) [77].

Для реализации проекта используется часть собственных средств и берется кредит в 2500 тыс. руб. под 20% годовых с равномерными выплатами по кредиту в течение 3 лет. При этом необходимо затратить 3800 тыс. руб. собственных средств.

$$K_m = \frac{E(1+E)^3}{(1+E)^3 - 1} \cdot K_k = \frac{0,165(1+0,165)^3}{(1+0,165)^3 - 1} \cdot 2500 = 1122 \text{ тыс. руб. в год} \quad (4.16)$$

Для расчета чисто дисконтированного дохода определим ставку сравнения или коэффициент дисконтирования (E):

$$E = И + ПП + P = 9,5 + 5 + 2 = 16,5 \%,$$

где $И$ - темп инфляции (9,5 % в 2025 г.) [22, 23], $ПП$ - минимальная норма прибыли (5%), P - коэффициент, учитывающий степень риска (2%).

Определим чистый дисконтированный доход за 3 года запуска в серийное производство сепаратора молока с БЭСМ (ожидаемый объем продаж 190 единиц изделий).

$$ЧДД = \sum_{i=1}^5 \frac{П}{(1+E)^i} - K_0 =$$

$$= \frac{3994-1122}{(1+0,165)^1} + \frac{7989,3-1122}{(1+0,165)^2} + \frac{13315,8-1122}{(1+0,165)^3} - 3793 = 11443,2 \text{ тыс. руб}$$

Так как ЧДД положителен, то следует такой проект принять к реализации. Определим срок окупаемости проекта. Дисконтированные доходы за два года составляет: 1-й – 2465 тыс. руб., 2-й – 5059 тыс. руб., 3-й – 7711 тыс. руб., а в сумме за 3 года – 11443 тыс. руб., что превышает капитальные затраты в 6293 тыс. руб. Срок окупаемости проекта составит:

$$T_{ок} = 3 + (3793 - 5059) / 7711 = 2,83 \text{ года}$$

Результаты технико-экономического расчета представлены в виде таблицы 4.10.

Таблица 4.10 – Технико-экономические показатели

№ п/п	Показатели	Варианты	
		Исход- ный Г9- ОСП-3	Проекти- руемый БЭСМ
1	Производительность установки, дм ³ /ч	3000	3000
2	Удельная материалоемкость, кг/кВт	7,30	7,29
3	Потребляемая электроэнергия, кВт ч/год	30585,84	29588,88
4	КПД установки, о.е.	0,948	0,962
5	Коэффициент мощности cosφ , о.е.	0,84	0,95
6	Масса сепараторной установки, кг	395	388
7	Цена установки, тыс. руб	2250	2210
8	Чистый дисконтированный доход при производстве и реализации, тыс. руб.	-	11443
9	Срок окупаемости, лет	-	2,83
10	Затраты на НИР и ОКР, тыс.руб.	-	1365
11	Общие капиталовложения, тыс.руб.	-	6293,4
12	Годовая прибыль при производстве 100 шт., тыс. руб.	-	13315,5

4.2 Выводы по главе 4

1. Технико-экономические расчеты выполнены в ценах за 2024 г, принятая ставка дисконтирования $E = 16,5\%$, расчетный период $T = 3$ года. Экономическая эффективность от внедрения сепараторной установки с БЭСМ за расчетный период, выраженная через чистый дисконтированный доход, составила за счет уменьшения материалоемкости и уменьшения текущих издержек – 11443 тыс. руб. Срок окупаемости проекта составил 2,83 года.

Рекомендации производству

При использовании БЭСМ определённой мощности необходимо провести предварительные расчеты для оценки количества выделяемого тепла. Для увеличения эффективности и облегчения пуска БЭСМ необходимо произвести настройку преобразователя частоты во время пуско-наладочных работ для электрооборудования АПК.

Перспективы дальнейшей разработки темы

Используя теоретические и экспериментальные данные, полученные в ходе проведения исследований, для дальнейшего повышения энергоэффективности сепараторной установки целесообразна разработка математической модели двухслойного ротора-барабана сепаратора с короткозамкнутой, массивной частью и уменьшенным воздушным зазором.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана технологическая схема сепарирования молока с безредукторным электроприводом сепаратора и его конструкция, обеспечивающая возможность передачи тепла от электрической машины молоку.

2. Определены параметры БЭСМ номинальной мощности 4 кВт: внутренний диаметр статора 0,403 м, расчетная длина магнитопровода 0,03 м, длина проводников фазы обмотки 91,2 м; номинальной мощности 7,5 кВт: внутренний диаметр статора 0,403 м, расчетная длина магнитопровода 0,045 м, длина проводников фазы обмотки 118,1 м.

3. Модернизирована математическая модель безредукторного электропривода сепаратора молока на базе теории обобщённого электромеханического преобразователя энергии и теории теплопередачи, описывающие совместно протекающие электромагнитные, электромеханические и тепловые процессы.

4. Посредством модернизированной математической модели, реализованной в программном комплексе MATLAB проведены исследования БЭСМ. За счет использования эффекта охлаждения статора жидкостью установлено, что:

– сепараторная установка на базе исследуемого БЭСМ по сравнению с серийной сепараторной установкой на базе электроприводов классической конструкции имеет КПД на 1,46% выше (при мощности приводного электродвигателя 4 кВт), $\cos\varphi$ на 13,1 %, и на 3,53 % выше (при мощности приводного электродвигателя 7,5 кВт);

– улучшены массогабаритные показатели приводного электродвигателя мощностью 4 кВт по сравнению с базовым БЭСМ: высота магнитопровода статора на 9,1 %, удельная материалоемкость на 11,5 %, длина обмоточного провода на 2,1%.

5. Обоснованы режимы работы БЭСМ: пусковой и установившийся с отбором тепла. Обоснованы параметры БЭСМ: номинальная мощность, активное сопротивление ротора-барабана, максимальный момент БЭСМ,

номинальный момент БЭСМ, номинальная частота питающего напряжения. Номинальная мощность принята исходя из серийного сепаратора производительностью 3 т/ч, который является оптимальным для малых и средних фермерских хозяйств. Этой мощности соответствуют активное сопротивление ротора-барабана $R_{\text{рот.}} = 195 - 205 \text{ Ом}$ для марки стали Х13, из которой изготовлен ротор-барабан, максимальный момент 16,56 - 16,66 Нм, номинальный момент 7,24 Нм и номинальная частота питающего напряжения 114,6 Гц для поддержания номинальной частоты вращения барабана 6500 об/мин.

6. Изготовлен экспериментальный образец и проведен физический эксперимент, который подтвердил адекватность математической модели (относительная погрешность не превышает 5%). Получены регулировочные и энергетические характеристики, на основании которых установлено:

- предварительный подогрев сепарируемого продукта (молока) путем отбора тепла от статора и ротора-барабана БЭСМ позволяет повысить КПД сепараторной установки до 4 % в зависимости от мощности электропривода (на 2% – для электропривода на базе электродвигателя мощностью 4 кВт, на 4 % – для электропривода на базе электродвигателя мощностью 7,5 кВт);

- увеличение плотности сепарируемой жидкости на 0,5 % приводит к изменению следующих параметров: температура нагрева сепарируемой жидкости в статоре и барабане-роторе БЭСМ увеличивается на 6 %, частоты вращения ротора-барабана БЭСМ уменьшается на 0,9 %, КПД БЭСМ уменьшается на 0,7 %.

- в режиме пуска время достижения номинальной скорости вращения БЭСМ в сравнении с серийной сепараторной установкой сокращено на 85 %. В установившемся режиме работы мощность, требуемая для подогрева сепарируемого продукта (молока), в сепараторной установке на базе БЭСМ в сравнении с серийной сепараторной установкой меньше на 3,3 %.

7. Техничко-экономические расчеты выполнены в ценах за 2024 г, принятая ставка дисконтирования $E = 16,5\%$, расчетный период $T = 3$ года.

Экономическая эффективность от внедрения сепараторной установки с БЭСМ за расчетный период, выраженная через чистый дисконтированный доход, составила за счет уменьшения материалоёмкости и уменьшения текущих издержек – 11443 тыс. руб. Срок окупаемости проекта составил 2,83 года.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авторское свидетельство № 1041159 А1 СССР, МПК В04В 1/00. Сепаратор: № 3429869: заявл. 22.04.1982: опубл. 15.09.1983 / Б. Х. Гайтов, А. В. Нестеров, Ю. П. Андреев, С. В. Нестеров; заявитель Краснодарский ордена трудового красного знамени политехнический институт.
2. Авторское свидетельство № 1121046 А1 СССР, МПК В04В 1/00, В04В 9/02. Сепаратор для разделения полидисперсных жидких систем : № 3555263 : заявл. 21.02.1983 : опубл. 30.10.1984 / Б. Х. Гайтов, А. В. Нестеров, В. А. Карамзин [и др.] ; заявитель Краснодарский ордена трудового красного знамени политехнический институт.
3. Авторское свидетельство № 1405882 СССР, МПК В04В 1/00. Сепаратор для разделения полидисперсных жидких систем: № 3898092: заявл. 04.03.1985: опубл. 30.06.1988 / Б. Х. Гайтов, А. В. Нестеров, С. В. Нестеров, Л. Е. Копелевич.
4. Авторское свидетельство № 1427501 А1 СССР, МПК Н02К 9/19, В04В 9/02. Сепаратор для жидкости: № 4228756: заявл. 09.03.1987: опубл. 30.09.1988 / Б. Х. Гайтов, Л. Е. Копелевич, В. Я. Письменный, Е. А. Быков; заявитель Краснодарский политехнический институт.
5. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий [Текст]: научная литература / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. - Изд. 2-е, перераб. и доп. - Москва: Наука, 1976. - 279 с, ил.
6. Баракин, Н. С. Параметры обмотки статора и режимы асинхронного генератора, повышающие качество электроэнергии для питания электрооборудования почвенно-экологической лаборатории : специальность 05.20.02 "Электротехнологии и электрооборудование в сельском хозяйстве" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Баракин Николай Сергеевич. – Краснодар, 2014. – 191 с.
7. Блюмин, Г.З. Сепаратор с полупроводниковым приводом повышенной частоты: М., 1971.
8. Богатырев, Н. И. Практикум по электрическому приводу / Н. И. Богатырев, Н. С. Баракин, С. В. Оськин. – Краснодар : КРОН, 2017. – 306 с.
9. Богатырев, Н. И. Практикум по электроприводу / Н. И. Богатырев, С. В. Оськин, В. Н. Темников. – Краснодар : Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, 2009. – 288 с.
10. Боровиков, В.П. "Популярное введение в программу STATISTICA"/ В.П. Боровиков. - Компьютер Пресс, 1998, 267 с.

11. Боровиков, В.П. Популярное введение в программу STATISTICA: Компьютер Пресс, 1998. – 267 с.
12. Браславский, И.Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод: учебное пособие / И.Я. Браславский, З.Ш. Ишматов, В.Н. Поляков // Издат. центр «Академия», 2004. – 256 с.
13. Ванурин, В. Н. Статорные обмотки асинхронных электрических машин : учебное пособие / В. Н. Ванурин. — 2-е изд., испр. и доп. — Санкт-Петербург : Лань, 2021. — 224 с. — ISBN 978-5-8114-1769-8. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/168991> (дата обращения: 07.02.2025). — Режим доступа: для авториз. пользователей.
14. Владимиров, Н.А. Развитие молочного скотоводства в регионах Российской Федерации: экономико-статистическое исследование. / Вопросы статистики. 2023 - №30(2) – С. 87-97. – <https://doi.org/10.34023/2313-6383-2023-30-2-87-97>
15. Вольдек, А.И. Электрические машины. Машины переменного тока: учебник для вузов по напр. "Электротехника, электромеханика и электротехнологии" и "Электроэнергетика" / А.И. Вольдек, В.В. Попов. - СПб.: Питер, 2008. - 349 с.
16. Гайтов Б.Х., Кашин Я.М., Копелевич Л.Е., Ким В.А. Коэффициенты теплоотдачи установки для сепарирования нефти совмещенной конструкции Материалы Международной конференции «Actual Issues of Mechanical Engineering» (AIME 2018). Серия книг «AER-Advances in Engineering Research.T. 157, с. 248-254.
17. Гайтов, Б. Х. Анализ электромагнитно-механической обстановки двухмерных электрических машин, работающих в парке / Б. Х. Гайтов, С. Р. Шарифуллин, А. А. Голованов, О. М. Сангамай // Технические и технологические системы : материалы IV Международной научной конференции, Кубань, 10–12 октября 2012 года. – Кубань: Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е.Жуковского и Ю.А.Гагарина, 2012. – С. 64-70.
18. Гайтов, Б. Х. Разработка математической модели электромагнитных и электромеханических переходных процессов в аксиальных многофазных генераторных установках / Б. Х. Гайтов, Я. М. Кашин, Л. Е. Копелевич [и др.] // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2012. – № 76. – С. 473-483.
19. Гайтов, Б. Х. Конструктивно-интегрированный частотно-управляемый электропривод / Б. Х. Гайтов. – Краснодар: Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования

«Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж) Министерства обороны Российской Федерации, 2011. – 355 с.

20. Гайтов, Б.Х. Установка для сепарации нефти на базе двигателя-сепаратора / Б. Х. Гайтов, Я. М. Кашин, Л. Е. Копелевич [и др.] // Нефтяное хозяйство. – 2017. – № 7. – С. 90-92.].

21. Гайтов, Б.Х. Разработка нового вида энергосберегающей установки для переработки нефти / Б. Х. Гайтов, Я. М. Кашин, Л. Е. Копелевич [и др.] // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 4: Естественно-математические и технические науки. – 2019. – № 3(246). – С. 103-108.

22. Годовая инфляция в РФ [Электронный ресурс] // Сайт www.rbc.ru URL: <https://www.rbc.ru/economics/23/01/2025/6790bf999a794709ab9b853f?ysclid=m6av8vprco597211623> (Дата обращения: 10.01.2025).

23. Годовая инфляция в РФ в сентябре замедлилась до 8,63% [Электронный ресурс] // Сайт www.interfax.ru URL: <https://www.interfax.ru/russia/986401> (Дата обращения: 20.01.2024).

24. Голованов, А. А. Безредукторный электропривод сепаратора молока с улучшенными энергетическими характеристиками / Я. М. Кашин, А. А. Голованов, А. А. Трескинская // Современные электротехнические и информационные комплексы и системы : Материалы V Международной научно-практической конференции преподавателей, аспирантов и научно-технических работников, посвящённой 105-летию со дня образования КубГТУ, Армавир, 10–11 ноября 2023 года. – Армавир: ООО «Редакция газеты «Армавирский собеседник», 2023. – С. 23-27.

25. Голованов, А. А. Обоснование и разработка конструктивно-технологической схемы сепараторной установки для переработки молока / Я. М. Кашин, Л. Е. Копелевич, А. В. Самородов [и др.] // Сельский механизатор. – 2024. – № 5. – С. 28-31. – DOI 10.47336/0131-7393-2024-5-28-29-30-31.

26. Голованов, А. А. Отечественные и зарубежные установки для переработки нефти и перспективы их развития / Я. М. Кашин, Л. Е. Копелевич, А. В. Самородов [и др.] // Энергосбережение и водоподготовка. – 2020. – № 3(125). – С. 12-18.

27. Голованов, А. А. Перспективная конструкция сепаратора с электроприводом на базе двигателя с двухслойным ротором-барабаном / Я. М. Кашин, Л. Е. Копелевич, А. В. Самородов, А. А. Голованов // Электронный сетевой политематический журнал "Научные труды КубГТУ". – 2023. – № 1. – С. 130-142.

28. Голованов, А. А. Сравнительные характеристики различных электроприводов молочных сепараторов / Я. М. Кашин, Л. Е. Копелевич, А. В. Самородов [и др.] // Сельский механизатор. – 2024. – № 4. – С. 21-23. – DOI 10.47336/0131-7393-2024-4-21-22-23.

29. Голованов, А. А. Технология прямого привода применительно к установкам центрифугального сепарирования / Я. М. Кашин, Л. Е. Копелевич, А. В. Самородов [и др.] // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 4: Естественно-математические и технические науки. – 2020. – № 1(256). – С. 75-79.

30. Голованов, А. А. Уточнение значений статического момента сопротивления и динамического момента двигателя с короткозамкнутым ротором / Я. М. Кашин, С. И. Колбасин, Е. А. Мараховский, А. А. Голованов // Технические и технологические системы : Материалы тринадцатой Международной научной конференции, Краснодар, 23–25 ноября 2022 года. – Краснодар: Общество с ограниченной ответственностью "Издательский Дом - Юг", 2022. – С. 56-58.

31. Голованов, А. А. Анализ электроприводов существующих сепараторных установок и перспективы их развития/ А. А. Голованов // Технические и технологические системы : Матер. XV Междунар. научн. конф., Краснодар, 22–24.11.2026 г. – Краснодар: ООО "Издательский Дом - Юг", 2023. – С. 139-142.

32. Голованов, А. А. Пути модернизации сепараторных установок молочной промышленности / А. А. Голованов, Е. А. Мараховский, В. А. Ким, А. Е. Алланов // Технические и технологические системы : материалы XV Международной научной конференции, Краснодар, 20–22 ноября 2024 года. – Краснодар: Общество с ограниченной ответственностью "Издательский Дом - Юг", 2024. – С. 33-34.

33. Голованов, А. А. Состояние молочно-животноводческого хозяйства в России и технологии сепарирования молока / А. А. Голованов, Л. Е. Копелевич, В. А. Ким, И. А. Михно // Технические и технологические системы : материалы XV Международной научной конференции, Краснодар, 20–22 ноября 2024 года. – Краснодар: Общество с ограниченной ответственностью "Издательский Дом - Юг", 2024. – С. 27-29.

34. ГОСТ 11828-86. Машины электрические вращающиеся. Общие методы испытаний: дата введения 1987-06-30. – М.: Изд-во стандартов, 2003. – 32 с.

35. ГОСТ 31827-2012 Сепараторы жидкостные центробежные. Требования безопасности. Методы испытаний: - дата введения – 2014 – 01 - 01. - М.: Стандартинформ, 2014. – 7 с.
36. ГОСТ 32144-2013 Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения: дата введения 2014-07-01. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2002. – 6 с.
37. ГОСТ Р 52776-2007 МЭК 60034-1-2004 Машины электрические вращающиеся. Номинальные данные и характеристики: дата введения 2008-01-01. – М.: Стандартинформ, 2008. – 68 с.
38. ГОСТ Р 53472-2009 Машины электрические вращающиеся. Двигатели асинхронные. Методы испытаний : дата введения 2011-01-01. – М.: Стандартинформ, 2011. – 46 с.
39. ГОСТ Р 59985-2022 Конструкции, ограждающие зданий. Методы определения теплотехнических показателей теплоизоляционных материалов и изделий при эксплуатационных условиях: – дата введения 2022 – 01 - 05. – М.: Стандартинформ, 2022. – 6 с.
40. ГОСТ Р МЭК 60034-4-2012 Машины электрические вращающиеся. Часть 4. Методы экспериментального определения параметров синхронных машин : дата введения 2012-11-23. – М.: Стандартинформ, 2014. – 87 с.
41. Григорьева, И. С. Физические величины: Справочник. / И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. — 1232 с.;
42. Дружинина, Е.С. Совершенствование сепаратора молока с обоснованием и разработкой безредукторного привода: специальность 05.20.01 " Технологии и средства механизации сельского хозяйства ": автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Дружинина Елена Сергеевна. – Санкт - Питербург, 2006. – 15 с.
43. Зайцев, А.И. Снятие механических характеристик асинхронного двигателя путем измерения скорости и ускорения двигателя в переходных режимах./ А.И. Зайцев, М.П. Табинский, А.С. Бобровский // Известия томского политехнического института. -1963. – Т.117. – С.191-198.
44. Зедгинидзе, И.Г. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем. / И.Г. Зедгинидзе. М.: Наука, 1976. – 390 с.
45. Иванов, Б. М. Технология переработки молока на примере ООО «Кладовая Олёкмы» / Б. М. Иванов, М. Д. Григорьева // Юный ученый. — 2019. — № 7.2 (27.2). — С. 45-49. — URL: <https://moluch.ru/young/archive/27/1629/> (дата обращения: 12.05.2023)
46. Икоева, Э.Ю. Разработка и обоснование параметров привода безредукторного молочного сепаратора для фермерских хозяйств: специальность

05.20.01 " Технологии и средства механизации сельского хозяйства ", специальность 05.20.02 "Электротехнологии и электрооборудование в сельском хозяйстве": автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Икоева Эмма Юрьевна; [ФГОУ ВПО ГГАУ]. — Владикавказ 2004. — 23 с.

47. Календаря бухгалтера на 2024 год / Консультант плюс. [Электронный ресурс]. https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_465664. (дата обращения: 10.01.2025)]

48. Карташев, А.П. Обыкновенные дифференциальные уравнения и основы вариационного исчисления. / А.П. Карташев, Б.Л. Рождественский. - М., Наука, 1980. - 288 с.

49. Качин, С.И. Электрический привод. Статика. Лабораторный практикум: учебное пособие./ С.И. Качин, И.Г. Однокопылов, С.М. Семенов. – Томск: Изд. Томского политехнического университета, 2010. – 136 с.

50. Кашин, Я.М. Моделирование электропривода с многофункциональным ротором сепаратора полидисперсных жидких систем / Я. М. Кашин, Л. Е. Копелевич, А. В. Самородов [и др.] // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2023. – Т. 66, № 1. – С. 86-94. – DOI 10.17213/0136-3360-2023-1-86-94.

51. Копелевич, Л. Е. Оценка момента сопротивления установки для сепарирования нефти / Л. Е. Копелевич, А. А. Голованов // Технические и технологические системы : Материалы одиннадцатой Международной научной конференции, Краснодар, 17–19 декабря 2020 года. – Краснодар: Общество с ограниченной ответственностью "Издательский Дом - Юг", 2020. – С. 99-103.

52. Копелевич, Л. Е. Электромагнитные процессы двигателя с многофункциональным массивным ротором / Л. Е. Копелевич, С. И. Колбасин, Е. А. Мараховский, А. А. Голованов // Технические и технологические системы : Материалы тринадцатой Международной научной конференции, Краснодар, 23–25 ноября 2022 года. – Краснодар: Общество с ограниченной ответственностью "Издательский Дом - Юг", 2022. – С. 67-69.

53. Копылов, И. П. Математическое моделирование электрических машин. / И. П. Копылов: 3-е изд. перераб, и доп. - М.: Высш. шк., 2001. - 327 с.;

54. Копылов, И.П. Применение вычислительной техники в инженерно-экономических расчетах (электрические машины): И.П. Копылов. - М.: Энергия 1980. - 256 с.

55. Копылов, И.П. Проектирование электрических машин: учебник для вузов / И.П. Копылов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во Юрайт, 2019 – 828 с.
56. Копылов, И.П. Расчет на ЦВМ характеристик асинхронных машин: И.П. Копылов, О.П. Щедрин. - М.: Энергия, 1973. - 121 с.
57. Копылов, И.П. Электрические машины: учебник для вузов / И. П. Копылов. — 2-е изд., испр. и доп. — Москва: Издательство Юрайт, 2022.
58. Костенко, М.П. Пиотровский Л.М. Электрические машины. Ч. 2. Машины переменного тока./ М.П. Костенко, Л.М. Пиотровский. - М.: Энергия, 1965. – 704 с.
59. Котеленец, Н.Ф. Испытания, эксплуатация и ремонт электрических машин: Н.Ф. Котеленец, Н.А. Акимова, М.В. Антонов. - М.: Академия, 2003 – 384 с.
60. Кравчик, А.Э. Асинхронные двигатели серии 4А [Текст]: справочник / А.Э. Кравчик, М.М. Шлаф, В.И. Афонин, Е.А. Соболенская. -М.: Энергоиздат, 1982. —504 с, ил.
61. Краморов, Ю.И. Высокоскоростные машины в с.-х. (Теория, расчет, конструкция): Краснодар, 1970.
62. Кругляков, Г.Н Товароведение мясных и яичных товаров. Товароведение молочных товаров и пищевых концентратов: Учебник. / Г.Н Кругляков, Г.В. Круглякова – 2-е изд. – М: издательско-торговая корпорация «Дашков и К», 2005. – 488с.
63. Куцевалов В. М. Асинхронные и синхронные машины с массивными роторами. / В. М. Куцевалов. – М.: Энергия, 1980. – 160 с.
64. Лищенко, А.И. Оптимальные конструктивные параметры массивного ротора асинхронных машин различной мощности. / А.И. Лищенко //Электротехника, - 1983, - №1. - с. 4-7.
65. Лукутин, Б.В. Системы электроснабжения с ветровыми и солнечными электростанциями : учеб. пособие / Б.В.Лукутин, И.О. Муравлев, И.А. Плотников. -Томск: Томский политехнический университет, 2015.- 128 с.
66. Голованов, А. А. Анализ существующих сепараторных установок молочной промышленности / А. А. ГоловановЕ.А. Мараховский, В.А. Ким, Я.А. Авраменко // Технические и технологические системы : Матер. XV Междунар. научн. конф., Краснодар, 20–22.11.2024 г. – Краснодар: ООО "Издательский Дом - Юг", 2024. – С. 30-32.
67. Марзаганов, А.М. Исследование динамики центрифуг с приводом барабана от электродвигателя повышенной частоты через гидромufту: специальность 05.20.01 " Технологии и средства механизации сельского хозяйства

" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Марзаганов Ахмед Магомедович. – Горский с.-х. ин-т. – Орджоникидзе. - 1971. - 34 с.

68. Маслобойки и сепараторы [Электронный ресурс] // Сайт fermer-opt.ru. URL: <https://fermer-opt.ru/separator-neptun> (Дата обращения 10.01.2025).

69. Махачкалинский завод сепараторов [Электронный ресурс] // Сайт zao-separator.ru. URL: <https://zao-separator.ru> (Дата обращения 10.01.2025).

70. Меламед, И.И. Теория и алгоритмы решения многокристальных задач комбинаторной оптимизации. / И.И. Меламед, И.Х. Сигал – М.: ВЦ РАН. 1996. - 52 с.

71. Моисеев, Н. Н. Методы оптимизации. / Н. Н. Моисеев, Ю. П. Иванюков, Е. М. Столярова – М.: Наука, ГРФМЛ, 1978. – 352 с.

72. Молочная отрасль России в 2022 году в 10 графиках [Электронный ресурс] // Сайт <https://milknews.ru>. URL: <https://milknews.ru/longridy/Molochnaja-otrasl-v-10-grafikah.html?ysclid=m64wbzkgj9919292676> (Дата обращения 10.01.2025).

73. Молочное животноводство в России: предварительные итоги 2017 года [Электронный ресурс] // Сайт agrovesti.net. URL: <https://agrovesti.net/lib/industries/molochnoe-zhivotnovodstvo-v-rossii-predvaritelnye-itogi-2017-goda.html> (Дата обращения 10.09.2025).

74. Моргунов, А. П. Планирование и анализ результатов эксперимента: учеб. пособие / А. П. Моргунов, И. В. Ревина; Минобрнауки России, ОмГТУ. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2014.

75. Налимов, В.В. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. / В.В. Налимов, Н.А. Чернова. – М.: «Наука», 1965. - 340 с.

76. Обзор российского и мирового рынков молока и молочной продукции по состоянию на 30.01.2024 года [Электронный ресурс] // Сайт [kaicc.ru](http://www.kaicc.ru). URL: http://www.kaicc.ru/sites/default/files/moloko_rf_i_mir_30.01.2024.pdf (Дата обращения 10.01.2025).

77. Оськин С.В. Экономическое обоснование организационно-технических мероприятий в курсовых и дипломных проектах : учеб. пособие / С.В. Оськин, В.Я. Хорольский, О.А. Гончарова и др. - Краснодар, 2008. – 108 с.

78. Оценка современного состояния молочной промышленности Краснодарского края [Электронный ресурс] // Сайт ozlib.com URL: https://ozlib.com/1034808/ekonomika/otsenka_sovremennogo_sostoyaniya_moloc

(Дата обращения: 20.01.2025)

79. Патент 2585636 Российская Федерация, МПК7 B01D 17/06, B03C 5/00, B01D 43/00. Способ сепарирования нефти / Копелевич Л.Е.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО "Кубанский государственный технологический университет". – № 2015110413/05; заявл. 23.03.2015; опубл. 27.05.2016, Бюл. № 15

80. Патент 2593626 Российская Федерация, МПК7 B04B 5/10, B03C 5/02, B01D 17/06, B01D 43/00, B04B 9/02. Установка для сепарирования нефти / Копелевич Л.Е.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО "Кубанский государственный технологический университет". – № 2015110414/05; заявл. 23.03.15; опубл. 10.08.16, Бюл. № 22.

81. Патент 2706320 Российская Федерация, МПК7 B04B9/02. Сепаратор для полидисперсных жидких систем / Кашин Я.М., Копелевич Л.Е., Самородов А.В., Ким В.А., заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО "Кубанский государственный технологический университет". – № 201911117; заявл. 04.12.2019; опубл. 15.11.2019, Бюл. № 32

82. Патент № 2752726 С1 Российская Федерация, МПК B04B 9/02. Центробежный сепаратор : № 2020137494 : заявл. 16.11.2020 : опубл. 30.07.2021 / Я. М. Кашин, Л. Е. Копелевич, В. А. Ким ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Кубанский государственный технологический университет"

83. Патент № 2776987 С1 Российская Федерация, МПК B04B 9/04, H02K 1/22, H02K 17/12. Двигатель сепаратора совмещенной конструкции : № 2021115713 : заявл. 31.05.2021 : опубл. 29.07.2022 / Я. М. Кашин, Л. Е. Копелевич, А. В. Самородов, А.А. Голованов [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Кубанский государственный технологический университет", Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования "Краснодарское высшее военное авиационное училище летчиков имени Героя Советского Союза А.К. Серова".

84. Пахомов С.В. Параметры и характеристики электропривода молочных сепараторов с аксиальным двигателем: 05.20.02 "Электротехнологии и электрооборудование в сельском хозяйстве" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Пахомов Сергей Васильевич . — - Краснодар, 2003.- 19 с.

85. Пененко, В.В. Математические методы планирования эксперимента / В.В. Пененко. - Новосибирск: Наука, 1981. - 256 с.

86. Подиновский, В.В. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач./ В.В. Подиновский, В.Д. Ногин. – М.: Физматлит, 2007. – 34 с.
87. Потешин, М. И. Применение первой и третьей ценовой категории при расчетах за электроэнергию (мощность) / М. И. Потешин, В. А. Дидыч, П. П. Екименко, А. В. Мирошников // Сельский механизатор. – 2018. – № 7-8. – С. 17-19.
88. Приказ Минстроя России № 872/пр "Об утверждении сметных норм на монтаж оборудования": - дата введения – 2020 – 12 - 26. - М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2019. – 291 с.
89. Присмотров, Н.И. Создание и исследование электроприводов машин средств малой механизации с полупроводниковыми преобразователями частоты : 05.20.02 "Электротехнологии и электрооборудование в сельском хозяйстве" : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Присмотров Николай Иванович . — Нижегород. гос. техн. ун-т.- Киров, 2007.- 39 с.
90. Решетник, Е.И. Технология и организация производства молочных продуктов: учебное пособие /Е.И. Решетник., Ю.И. Держапольская. – Благовещенск: ДальГАУ, 2014. – 130 с.
91. Сафонов, В.В. Основы системного анализа: методы многовекторной оптимизации и многовекторного ранжирования: монография./ В.В. Сафонов. – Саратов: Научная книга, 2009 . – 329 с.
92. Сводная статистика по Северо-Кавказскому региону России [Электронный ресурс] // Сайт <https://dairynews.ru>. URL: <https://dairynews.ru/dia/russia/stat/> (Дата обращения 10.01.2025).
93. Сепаратор сливоотделитель Г9-ОСП-3 [Электронный ресурс] // Сайт zao-separator.ru. URL: <https://zao-separator.ru/item/separator-slivkootdelitel-g9-osp-3> (Дата обращения 10.01.2025).
94. Сепараторы для молока: классификация, устройство и описание конструкции [Электронный ресурс] // Сайт promf.com. URL: <https://promf.com/reference-equipment-food-ru/538-separators-reference-description.html> (Дата обращения 10.01.2025).
95. Сепараторы для переработки молока [Электронный ресурс] // Сайт plava.ru. URL: <https://www.plava.ru/catalog/separators/> (Дата обращения 10.01.2025).
96. Сипайлов, Г.А. Математическое моделирование электрических машин. / Г.А. Сипайлов, А.В. Лоос. - М.: Высш. школа, 1980. - 176 с.

97. Соболев, Л.В. Уравнения математической физики / Л.В. Соболев.— М.: Наука, 2002.— 375 с.
98. Справочная информация: "Нормы труда" (Материал подготовлен специалистами КонсультантПлюс) [Электронный ресурс] // Сайт www.consultant.ru. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_148265/?ysclid=m6aup86dl3171693362 (Дата обращения 10.01.2025).
99. Стрижков, И.Г. Лабораторный практикум по электрическим машинам: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений по специальности «Электрификация и автоматизация с.х.» / И.Г. Стрижков, Е.Н. Чеснюк. - Краснодар: КубГАУ, 2006.- 296 с.
100. Сугаров, Х.Р. Совершенствование центробежной очистки молока / Х.Р. Сугаров, Е.А. Чеботарев, А.В. Малсугенов, П.Г. Нестеренко // Вестник Северо-Кавказского федерального университета – 2018.- № 2 (65).- С. 33-37.
101. Счастливый Г.Г. Математические модели теплопередачи в электрических машинах: Г.Г. Счастливый, В.В. Бандурин, В.Н. Остапенко, С.Н. Остапенко. - Киев: Наукова думка, 1986. - 184 с.
102. Темам, Р. Уравнения Навье — Стокса. Теория и численный анализ./ Р. Темам — 2-е изд. — М.: Мир, 1981. — 408 с.
103. Тихонов, А.Н. Уравнения математической физики / А.Н. Тихонов, А.А. Самарский.— М.: Изд-во МГУ, 2009 г.— 520 с.
104. Указ Президента РФ № 20 Об утверждении Доктрины продовольственной безопасности Российской Федерации: - дата введения – 2020 – 01 - 21. - М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2020. – 23 с.
105. Флетчер, К. Численные методы на основе метода Галеркина./ К. Флетчер. - М.: Мир, 1988. - 325 с.
106. Форсайт, Дж. Машинные методы математических вычислений./ Дж. Форсайт, М. Малькольм, К. Моулер. - М.: Мир, 1980. - 279 с.
107. Христофоров, М.С. Параметры и режимы работы синхронизированной двухвходовой генераторной установки с использованием ВИЭ для электроснабжения биофабрик агропромышленного комплекса: диссертация ... кандидата технических наук, «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т., Трубилина». - Краснодар, 2021. - 181 с.
108. Чеботарев, Е.А. Сепарирование молока и молочного сырья: История, теория, практика. / Е.А. Чеботарев. – Ставрополь: Изд-во СКФУ, 2012. – 299 с.
109. Юренева, В. Н. Теплотехнический справочник [Текст]: Учебное пособие для энергетических и политехнических вузов. В 2 томах / В. Н. Юренева и П. Д. Лебедева — Москва: Энергия, 1975-, 1975. — 743 с.: ил.

110. Afolaranmi, S. O. Pasteuraizer: An AI-enabled solution for product quality monitoring in tunnel pasteurization machines/ Afolaranmi, S. O., Drakoulelis, M., Filios, G., Melchiorre, C., Nikoletseas, S., Panagiotou, S. H., et al. // *Machines*, 11(2) 2023, - Article 191.
111. Andrius Trumpa, Fault Diagnostic System for Centrifugal Milk Separator's Rotor Bearings with Vibration Isolators / Andrius Trumpa, Vladas Vekteris, Vadim Mokšin, Artūras Kilikevičius // *Tehnički vjesnik* 25, 4(2018), 986-990
112. Chaudhary D.A., Electrical energy usage for processing of milk and milk products in a dairy plant – a case study / DA Chaudhary, JB Upadhyay and Atana Jana // *Indian J Dairy Sci* 69(3), 2016.
113. Gaitov, B. Kh. Heat emission coefficients of a combined oil separator / B. Kh. Gaitov, L. E. Kopelevich, Ya. M. Kashin, V. A. Kim // *International Conference "Actual Issues of Mechanical Engineering" (AIME 2018): conference proceedings, Novosibirsk, 19–21 апреля 2018 года. Vol. 157. – Novosibirsk: Atlantis Press, 2018. – P. 248-254.*
114. Oskin, S. V. Investigation of the Aerodynamic Characteristics of Electric Motors when Regulating Their Speed in the Comsol Package / S. V. Oskin, A. V. Miroshnikov, D. S. Tsokur // *Proceedings - 2021 International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2021, Sochi, 05–11 сентября 2021 года. – Sochi: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021. – P. 585-590.*
115. Oskin, S. V. Studying the aerodynamic characteristics of electric motors in COMSOL multiphysics / S. V. Oskin, A. V. Miroshnikov, D. S. Tsokur // *Proceedings - 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2021, Sochi, 17–21 мая 2021 года. – Sochi, 2021. – P. 350-354.*
116. Pat J. Jordan, Pasteurization of particles in milk/ Pat J. Jordan, Ken R. Morison // *International Dairy Journal*, 128, 2022,- 105316
117. Poornima Singh, A comprehensive review of the dairy pasteurization process using machine learning models/ Poornima Singh, Surabhi Pandey, Subhadip Manik // *Food Control*, 164, (2024),- 110574
118. Sadeghi Vasafi, P., & Hitzmann, B. Comparison of various classification techniques for supervision of milk processing. *Engineering in Life Sciences*, 22(3–4), 2022,- p. 279–287.
119. Vekteris, V. An investigation into fault diagnosis in a rotor-bearing system with dampers used in centrifugal milk separators / Trumpa, A., Turla, V., Sesok, N., Iljin, I., Moksin, V., Kilikevicius, A., Jakstas, A., & Kleiza, J. // *Transactions of FAMENA*, 41(2), 77-86.-2017. <https://doi.org/10.21278/TOF.41207>

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А. Расчет параметров различных двигателей безредукторного электропривода сепаратора молока

1. Расчет параметров короткозамкнутого двигателя с нормальным воздушным зазором

1.1 Активное сопротивление обмотки статора:

$$r_1 = \rho_{115} \frac{L_1}{q_{\text{эф}} a} = \frac{10^{-6}}{41} \frac{98.32}{1.1368 \cdot 10^{-6}} = 1.753 \text{ Ом},$$

где ρ - плотность для медных проводников, $\text{Ом} \cdot \text{м}$;

L_1 - длина проводников фазы обмотки, м;

$q_{\text{эф}}$ - площадь поперечного сечения эффективного проводника, м^2 ;

a - число параллельных ветвей.

Для класса нагревостойкости изоляции F расчетная температура $t_{\text{расч}} = 115^\circ \text{C}$,

для медных проводников $\rho = 10^{-6} / 41 \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

Длина проводников фазы обмотки:

$$L_1 = l_{\text{ср}} \cdot w_1 = 0.683 \cdot 144 = 98.32 \text{ м},$$

где $l_{\text{ср}}$ - средняя длина витка, м;

w_1 - число витков в фазе.

$$w_1 = \frac{U_n \cdot Z_1}{2a \cdot m} = \frac{35.7 \cdot 24}{2 \cdot 3} = 144;$$

Средняя длина витка:

$$l_{\text{ср}} = 2(l_{n1} + l_{л1}) = 2(0.11 + 0.232) = 0.683 \text{ м},$$

где l_{n1} - длина пазовой части, м;

$l_{л1}$ - длина лобовой части, м.

$$l_{n1} = 0.11 \text{ м}.$$

Длина лобовой части:

$$l_{л1} = K_{\text{л}} b_{KT} + 2B = 1.2 \cdot 0.168 + 0.015 = 0.232 \text{ м}$$

где $B = 0.015$ - длина вылета прямолинейной части катушек из паза от торца сердечника до начала отгиба лобовой части.

$$K_{\text{л}} = 1.2;$$

b_{KT} — средняя ширина катушки, мм.

Средняя ширина катушки:

$$b_{KT} = \frac{\pi(D+h_{П1})}{2p} \beta_1 = \frac{3.14(91+16)}{2} 1 = 168 \text{ мм},$$

где D - внутренний диаметр статора, мм;

$h_{П1}$ — размер паза в штампе, мм.

$$\beta_1 = 1;$$

p -число пар полюсов.

1.2 Активное сопротивление обмотки ротора, приведённое к обмотке статора:

$$r_2' = r_2 \frac{4 \cdot m(w_1 k_{об1})^2}{Z_2} = 9.05 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{4 \cdot 3(144 \cdot 0.96)^2}{19} = 1.087 \text{ Ом},$$

где m -число фаз;

$k_{об1}$ — коэффициент обмотки;

p - число пар полюсов;

w_1 — число витков в фазе;

Z_2 - число пазов ротора

Активное сопротивление фазы обмотки ротора:

$$r_2 = r_c + \frac{2r_{кл}}{\Delta^2} = 5.84 \cdot 10^{-5} + \frac{2 \cdot 1.73 \cdot 10^{-6}}{0.329^2} = 9.05 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}$$

$$r_c = \rho_{115} \frac{l_2}{q_c} = \frac{10^{-6}}{20.5} \cdot \frac{0.11}{91.3 \cdot 10^{-6}} = 58.47 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}$$

$$r_{кл} = \rho_{115} \frac{\pi D_{кл,ср}}{Z_2 q_{кл}} = \frac{10^{-6}}{20.5} \cdot \frac{3.14 \cdot 0.069}{6.1 \cdot 10^{-3}} = 1.73 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}$$

$$k_{об1} = 0.96;$$

$$p = 1;$$

$$q_{кл} = h_{кл} \cdot b_{кл} = 20.3 \cdot 16.1 = 326.35 \text{ мм}^2$$

$$Z_2 = 19;$$

$$D_{\text{к.ср}} = D_2 - h_{\text{кл}} = 90 - 20.3 = 69.7 \text{ мм.}$$

$$l_2 = l_1 = l_\delta = 0.11 \text{ м.}$$

$$\Delta = 0.329$$

$$\rho_{115} = \frac{10^{-6}}{20.5}$$

1.3 Реактивное сопротивление статора

$$x_1 = 15.8 \frac{f_1}{100} \left(\frac{\omega_1}{100} \right)^2 \frac{l'_\delta}{pq} (\lambda_{II} + \lambda_{л1} + \lambda_{д1}) = 15.8 \frac{50}{100} \left(\frac{144}{100} \right)^2 \frac{0.11}{1.4} (1.1 + 1.74 + 3.026) = 2.636 \text{ Ом,}$$

где w_1 — число витков в фазе;

f_1 — частота сети;

p — число пар полюсов;

q — число пазов на полюс и фазу;

l'_δ — длина магнитопровода статора.

1.4 Реактивное сопротивление ротора, приведённое к обмотке статора

$$x'_2 = x_2 \frac{4m(w_1 k_{об2})^2}{Z_2} = 2.22 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{4 \cdot 3 \cdot (144 \cdot 0.96)^2}{19} = 2.460 \text{ Ом.}$$

где m — число фаз;

$k_{об2}$ — коэффициент обмотки;

w_1 — число витков в фазе;

q — число пазов на полюс и фазу;

Z_2 — число пазов ротора

Индуктивное сопротивление фазы обмотки ротора:

$$x_2 = 7.2 f_1 l'_\delta (\lambda_{\Pi 2} + \lambda_{\Lambda 2} + \lambda_{\Delta 2}) \cdot 10^{-6} =$$

$$= 7.9 \cdot 50 \cdot 0.11 \cdot (3.82 + 0.82 + 1.58) \cdot 10^{-6} = 2.05 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}$$

$$k_{o62} = 0,96;$$

$$p=1;$$

$$f_1 = 50 \text{ Гц};$$

1.5 Сопротивление в относительных единицах

$$r_{1*} = r_1 \frac{I_{1H}}{U_{1H}} = 1.753 \frac{7.70}{220} = 0,061 \text{ О. е.}$$

$$x_{1*} = x_1 \frac{I_{1H}}{U_{1H}} = 2.636 \frac{7.70}{220} = 0,092 \text{ О. е.}$$

$$r'_{2*} = r'_2 \frac{I_{1H}}{U_{1H}} = 1.087 \frac{7.70}{220} = 0,036 \text{ О. е.}$$

$$x'_{2*} = x'_2 \frac{I_{1H}}{U_{1H}} = 2.460 \frac{7.70}{220} = 0,080 \text{ О. е.}$$

1.6 Магнитные сопротивления

$$I_{1H} = \sqrt{I_{1a}^2 + I_\mu^2}$$

$$I_\mu = \sqrt{I_{1H}^2 - I_{1a}^2} = 1.957 \text{ А}$$

$$x_\mu = \frac{U}{I_\mu} = \frac{220}{1.957} = 112.417 \text{ Ом}$$

2 Расчет параметров короткозамкнутого двигателя с нормальным воздушным зазором для частоты 100 Гц

2.1 Активное сопротивление обмотки статора:

$$r_1 = \rho_{115} \frac{L_1}{q_{\text{эф}} a} = \frac{10^{-6}}{41} \frac{98.32}{1.1368 \cdot 10^{-6}} = 1.753 \text{ Ом},$$

Длина проводников фазы обмотки:

$$L_1 = l_{cp} \cdot w_1 = 0.683 \cdot 144 = 98.32 \text{ м},$$

$$w_1 = \frac{U_n \cdot Z_1}{2a \cdot m} = \frac{35.7 \cdot 24}{2 \cdot 3} = 144;$$

Средняя длина витка:

$$l_{cp} = 2(l_{n1} + l_{л1}) = 2(0.11 + 0.232) = 0.683 \text{ м},$$

$$l_{n1} = 0.11 \text{ м}.$$

Длина лобовой части:

$$l_{л1} = K_{л} b_{KT} + 2B = 1.2 \cdot 0.168 + 0.015 = 0.232 \text{ м}$$

$$K_{л} = 1.2;$$

Средняя ширина катушки:

$$b_{KT} = \frac{\pi(D+h_{л1})}{2p} \beta_1 = \frac{3.14(91+16)}{2} 1 = 168 \text{ мм},$$

$$\beta_1 = 1;$$

2.2 Активное сопротивление обмотки ротора, приведённое к обмотке статора

$$r_2' = r_2 \frac{4 \cdot m (w_1 k_{об1})^2}{Z_2} = 9.05 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{4 \cdot 3 (144 \cdot 0.96)^2}{19} = 1.087 \text{ Ом},$$

Активное сопротивление фазы обмотки ротора:

$$r_2 = r_c + \frac{2r_{кл}}{\Delta^2} = 5.84 \cdot 10^{-5} + \frac{2 \cdot 1.73 \cdot 10^{-6}}{0.329^2} = 9.05 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}$$

$$r_c = \rho_{115} \frac{l_2}{q_c} = \frac{10^{-6}}{20.5} \cdot \frac{0.11}{91.3 \cdot 10^{-6}} = 58.47 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}$$

$$r_{кл} = \rho_{115} \frac{\pi D_{кл,ср}}{Z_2 q_{кл}} = \frac{10^{-6}}{20.5} \cdot \frac{3.14 \cdot 0.069}{6.1 \cdot 10^{-3}} = 1.73 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}$$

$$k_{об1} = 0,96;$$

$$q_{кл} = h_{кл} \cdot b_{кл} = 20.3 \cdot 16.1 = 326.35 \text{ мм}^2$$

$$Z_2 = 19;$$

$$D_{к.ср} = D_2 - h_{кл} = 90 - 20.3 = 69.7 \text{ мм.}$$

$$l_2 = l_1 = l_\delta = 0.11 \text{ м.}$$

$$\Delta = 0.329$$

$$\rho_{115} = \frac{10^{-6}}{20.5}$$

Расчет относительно r_1 и r_2 совпадает с расчётом на 50Гц т.к. по ТЗ было задано сохранение геометрических параметров двигателя неизменными.

2.3 Реактивное сопротивление статора

$$x_1 = 15.8 \frac{f_1}{100} \left(\frac{\omega_1}{100} \right)^2 \frac{l'_\delta}{pq} (\lambda_\Pi + \lambda_{л1} + \lambda_{д1}) = 15.8 \frac{100}{100} \left(\frac{144}{100} \right)^2 \frac{0.11}{1.4} (1.1 + 1.74 + 3.026) = 5,273 \text{ Ом},$$

где w_1 — число витков в фазе;

f_1 — частота сети;

p — число пар полюсов;

q — число пазов на полюс и фазу;

l'_δ — длина магнитопровода статора.

2.4 Реактивное сопротивление ротора, приведённое к обмотке статора

$$x'_2 = x_2 \frac{4m(w_1 k_{об2})^2}{Z_2} = 4.1 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{4 \cdot 3 \cdot (144 \cdot 0.96)^2}{19} = 4.920 \text{ Ом.}$$

Индуктивное сопротивление фазы обмотки ротора:

$$x_2 = 7.2 f_1 l'_\delta (\lambda_{\pi 2} + \lambda_{\lambda 2} + \lambda_{\delta 2}) \cdot 10^{-6} =$$

$$= 7.9 \cdot 100 \cdot 0.11 \cdot (3.82 + 0.82 + 1.58) \cdot 10^{-6} = 4.10 \cdot 10^{-4} \text{ Ом},$$

где $k_{o62} = 0,96$;

$f_1 = 100 \text{ Гц}$.

2.5 Сопротивление в относительных единицах

$$r_{1*} = r_1 \frac{I_{1H}}{U_{1H}} = 1.753 \frac{8.01}{220} = 0,064 \text{ О. е.}$$

$$x_{1*} = x_1 \frac{I_{1H}}{U_{1H}} = 5.27 \frac{8.01}{220} = 0,193 \text{ О. е.}$$

$$r'_{2*} = r'_2 \frac{I_{1H}}{U_{1H}} = 1.087 \frac{8.01}{220} = 0,039 \text{ О. е.}$$

$$x'_{2*} = x'_2 \frac{I_{1H}}{U_{1H}} = 4.92 \frac{8.01}{220} = 0,178 \text{ О. е.}$$

2.6 Магнитные сопротивления

$$I_{1H} = \sqrt{I_{1a}^2 + I_\mu^2}$$

$$I_\mu = \sqrt{I_{1H}^2 - I_{1a}^2} = 0.826 \text{ А}$$

$$x_\mu = \frac{U}{I_\mu} = \frac{220}{0.826} = 266.344 \text{ Ом}$$

3 Расчет параметров короткозамкнутого двигателя с увеличенным зазором 2δ

3.1 Активное сопротивление обмотки статора:

$$r_1 = \rho_{115} \frac{L_1}{q_{\text{эф}} a} = \frac{10^{-6}}{41} \frac{281,448}{1,131 \cdot 10^{-6}} = 6,071 \text{ Ом},$$

Длина проводников фазы обмотки:

$$L_1 = l_{cp} \cdot w_1 = 2,606 \cdot 108 = 281,448 \text{ м},$$

$$w_1 = \frac{U_n \cdot Z_1}{2a \cdot m} = \frac{13,48}{2 \cdot 3} = 108;$$

Средняя длина витка:

$$l_{cp} = 2(l_{n1} + l_{л1}) = 2(0,03 + 1,272) = 2,606 \text{ м},$$

$$l_{n1} = 0,03 \text{ м}.$$

Длина лобовой части:

$$l_{л1} = K_{л} b_{KT} + 2B = 1,2 \cdot 1,048 + 2 \cdot 0,01 = 1,272 \text{ м}$$

где $B = 0,01$ - длина вылета прямолинейной части катушек из паза от торца сердечника до начала отгиба лобовой части;

$$K_{л} = 1,2;$$

Средняя ширина катушки:

$$b_{KT} = \frac{\pi(D+h_{л1})}{2p} \beta_1 = \frac{3,14(650+17,709)}{2} 1 = 1048,28 \text{ мм},$$

3.2 Активное сопротивление обмотки ротора, приведённое к обмотке статора:

$$r_2' = r_2 \frac{4 \cdot m (w_1 k_{об1})^2}{Z_2} = 1,28 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{4 \cdot 3 (108 \cdot 0,93)^2}{38} = 0,945 \text{ Ом},$$

$$r_2 = r_c + 2 \cdot \frac{r_{кл}}{\Delta^2} = 12,26 \cdot 10^{-6} + \frac{2 \cdot 0,3 \cdot 10^{-6}}{0,112^2} = 12,81 \cdot 10^{-6} \text{ Ом},$$

$$r_c = \rho_{115} \cdot \frac{l_2}{q_c} = \frac{10^{-6} \cdot 0,03}{20,5 \cdot 57,2 \cdot 10^{-6}} = 12,26 \cdot 10^{-6} \text{ Ом.}$$

$$r_{кл} = \rho_{115} \cdot \frac{\pi \cdot D_{к.ср}}{Z_2 \cdot q_{кл}} = \frac{10^{-6} \cdot 3,14 \cdot 0,199}{20,5 \cdot 38 \cdot 600 \cdot 10^{-6}} = 4,5 \cdot 10^{-6} \text{ Ом,}$$

где $k_{о61} = 0,93$;

$$k_{ck} = 1$$

$$p=1;$$

3.3 Реактивное сопротивление статора

$$x_1 = 15,8 \frac{f_1}{100} \left(\frac{\omega_1}{100} \right)^2 \frac{l'_\delta}{pq} (\lambda_{II} + \lambda_{л1} + \lambda_{\partial1}) = 15,8 \frac{100}{100} \left(\frac{108}{100} \right)^2 \frac{0,03}{8} * 5,7 = 1,013 \text{ Ом,}$$

$$\lambda_{II} + \lambda_{л1} + \lambda_{\partial1} = 5,7$$

3.4 Реактивное сопротивление ротора, приведённое к обмотке статора

$$x'_2 = x_2 \frac{4m(w_1 k_{о62})^2}{Z_2} = 2,05 * 10^{-4} * \frac{4*3(108*0,95)^2}{38} = 3,467 \text{ Ом,}$$

Индуктивное сопротивление фазы обмотки ротора:

$$\begin{aligned} x_2 &= 7,9 \cdot f \cdot l'_\delta \cdot (\lambda_{п2} + \lambda_{л2} + \lambda_{д2}) \cdot 10^{-6} = \\ &= 7,9 \cdot 100 \cdot 0,03 \cdot (2,68 + 2,3 + 1,112) \cdot 10^{-6} = 2,05 \cdot 10^{-4} \text{ Ом,} \end{aligned}$$

где $k_{о62} = 0,95$;

$$k_{ck} = 1$$

$$p=1;$$

$$f_1 = 100 \text{ Гц};$$

3.5 Сопротивление в относительных единицах

$$r_{1*} = r_1 \frac{I_{1H}}{U_{1H}} = 6,071 \frac{8,3}{220} = 0,229 \text{ о. е.}$$

$$x_{1*} = x_1 \frac{I_{1H}}{U_{1H}} = 1,013 \frac{8,3}{220} = 0,038 \text{ о. е.}$$

$$r_{2*}' = r_2' \frac{I_{1H}}{U_{1H}} = 0,945 \frac{8,3}{220} = 0,037 \text{ о. е.}$$

$$x_{2*}' = x_2' \frac{I_{1H}}{U_{1H}} = 3,467 \frac{8,3}{220} = 0,136 \text{ о. е.}$$

3.6 Магнитные сопротивления

$$I_{1H} = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{\mu}^2}$$

$$I_{\mu} = \sqrt{I_{1H}^2 - I_{1a}^2} = 0,603 \text{ А}$$

$$x_{\mu} = \frac{U}{I_{\mu}} = \frac{220}{0,603} = 364 \text{ Ом}$$

4 Расчет параметров двигателя с массивным ротором с нормальным воздушным зазором при частоте 100Гц

4.1 Активное сопротивление обмотки статора:

$$r_1 = \rho_{115} \frac{L_1}{q_{\phi} a} = \frac{10^{-6}}{41} \frac{97}{1,1 \cdot 10^{-6}} = 2,35 \text{ Ом},$$

Длина проводников фазы обмотки:

$$L_1 = l_{cp} \cdot w_1 = 1.5 \cdot 64,6 = 97 \text{ м},$$

$$w_1 = \frac{U_n \cdot Z_1}{2a \cdot m} = \frac{5 \cdot 72}{2 \cdot 3} = 65;$$

Средняя длина витка:

$$l_{cp} = 2(l_{n1} + l_{л1}) = 2(0.03 + 0.72) = 1,5 \text{ м},$$

$$l_{n1} = 0,03 \text{ м}.$$

Длина лобовой части:

$$l_{л1} = K_{л} b_{KT} + 2B = 1.2 \cdot 0.558 + 0.01 = 0.72 \text{ м}$$

где $B = 0,01$ - длина вылета прямолинейной части катушек из паза от торца сердечника до начала отгиба лобовой части;

$$K_{л} = 1.2;$$

Средняя ширина катушки:

$$b_{KT} = \frac{\pi(D+h_{П1})}{2p} \beta_1 = \frac{3.14(40075+52,1)}{2} 1 = 584 \text{ мм},$$

4.2 Активное сопротивление обмотки ротора, приведённое к обмотке статора:

$$r_2' = \frac{4 \cdot 10^{-3} \cdot m(w_1 k_{o61})^2}{p \cdot q_1} \sqrt{\frac{\mu \cdot f_1}{\gamma}} \cdot \sqrt{S} = \frac{4 \cdot 10^{-3} \cdot 3(64 \cdot 0,966)^2}{1 \cdot 12} \sqrt{\frac{100 \cdot 1200}{4000000}} \cdot \sqrt{0,2} = 0.4 \text{ Ом},$$

где $k_{o61} = 0,966$;

$p=1$;

$\mu=1200 \text{ Гн/м}$;

$\gamma=4000000 \text{ См/м}$;

$$f_1 = 100 \text{ Гц};$$

$$s=0,2.$$

Число пазов на полюс и фазу:

$$q_1 = \frac{Z_1}{2pm} = \frac{72}{2 \cdot 3} = 12$$

4.3 Реактивное сопротивление статора

$$x_1 = 15.8 \frac{f_1}{100} \left(\frac{\omega_1}{100} \right)^2 \frac{l'_s}{pq} (\lambda_{\Pi} + \lambda_{\sigma 1} + \lambda_{\sigma 1}) = 15.8 \frac{140}{100} \left(\frac{65}{100} \right)^2 \frac{0,03}{12} * 510 = 8,71 \text{ Ом},$$

$$\lambda_{\Pi} + \lambda_{\sigma 1} + \lambda_{\sigma 1} = 510$$

4.4 Реактивное сопротивление ротора, приведённое к обмотке статора

$$r'_2 = \frac{4 \cdot 10^{-3} * m(w_1 k_{o\sigma 1})^2}{p * q_1} \sqrt{\frac{\mu * f_1}{\gamma}} * \sqrt{S} = \frac{4 \cdot 10^{-3} * 3(64 * 0,966)^2}{1 * 12} \sqrt{\frac{100 * 1200}{4000000}} * \sqrt{0,2} = 0,4 \text{ Ом}$$

$$\text{где } k_{o\sigma 1} = 0,966;$$

$$p=1;$$

$$\mu=1200 \text{ Гн/м};$$

$$\gamma=4000000 \text{ См/м};$$

$$f_1 = 100 \text{ Гц};$$

$$s=0,2.$$

4.5 Сопротивление в относительных единицах

$$r_{1*} = r_1 \frac{I_{1H}}{U_{1H}} = 2,35 \frac{8,8}{220} = 0,094 \text{ О. е.}$$

$$x_{1*} = x_1 \frac{I_{1H}}{U_{1H}} = 8,71 \frac{8,8}{220} = 0,349 \text{ О. е.}$$

$$r_{2*}' = r_2' \frac{I_{1H}}{U_{1H}} = 0,4 \frac{8,8}{220} = 0,016 \text{ О. е.}$$

$$x_{2*}' = x_2' \frac{I_{1H}}{U_{1H}} = 0,4 \frac{8,8}{220} = 0,016 \text{ О. е.}$$

4.6 Магнитное сопротивление

$$I_{1H} = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{\mu}^2}$$

$$I_{\mu} = \sqrt{I_{1H}^2 - I_{1a}^2} = 0,714 \text{ А}$$

$$x_{\mu} = \frac{U}{I_{\mu}} = \frac{220}{2,4} = 308 \text{ Ом}$$

5 Расчет параметров двигателя с массивным ротором с увеличенным зазором 2δ при частоте 100Гц

5.1 Активное сопротивление обмотки статора:

$$r_1 = \rho_{115} \frac{L_1}{q_{\phi} a} = \frac{10^{-6}}{41} \frac{91,36}{1,1 \cdot 10^{-6}} = 2,21 \text{ Ом},$$

Длина проводников фазы обмотки:

$$L_1 = l_{cp} \cdot w_1 = 1,42 \cdot 65 = 91,2 \text{ м},$$

$$w_1 = \frac{U_n \cdot Z_1}{2a \cdot m} = \frac{5,72}{2 \cdot 3} = 65;$$

Средняя длина витка:

$$l_{cp} = 2(l_{n1} + l_{л1}) = 2(0.03+0.68)=1,42 \text{ м},$$

$$l_{n1} = 0,03 \text{ м}.$$

Длина лобовой части:

$$l_{л1} = K_{л}b_{КТ} + 2B = 1.2 \cdot 0.551 + 0.01 = 0.681 \text{ м}$$

где B = 0,01 - длина вылета прямолинейной части катушек из паза от торца сердечника до начала отгиба лобовой части;

Средняя ширина катушки:

$$b_{КТ} = \frac{\pi(D+h_{л1})}{2p} \beta_1 = \frac{3.14(403+52,1)}{2} 1 = 551 \text{ мм},$$

5.2 Активное сопротивление обмотки ротора, приведённое к обмотке статора:

$$r_2' = \frac{4 \cdot 10^{-3} \cdot m(w_1 k_{об1})^2}{p \cdot q_1} \sqrt{\frac{\mu \cdot f_1}{\gamma}} \cdot \sqrt{s} = \frac{4 \cdot 10^{-3} \cdot 3(64 \cdot 0,966)^2}{1 \cdot 12} \sqrt{\frac{100 \cdot 1200}{4000000}} \cdot \sqrt{0,23} = 0.32 \text{ Ом},$$

где $k_{об1} = 0,966$;

$p=1$;

$\mu=1200 \text{ Гн/м}$;

$\gamma=4000000 \text{ См/м}$;

$f_1 = 100 \text{ Гц}$;

$s=0,23$.

Число пазов на полюс и фазу:

$$q_1 = \frac{Z_1}{2pm} = \frac{72}{2 \cdot 3} = 12$$

5.3 Реактивное сопротивление статора

$$x_1 = 15.8 \frac{f_1}{100} \left(\frac{\omega_1}{100} \right)^2 \frac{l'_\delta}{pq} (\lambda_{II} + \lambda_{л1} + \lambda_{\partial 1}) = 15.8 \frac{100}{100} \left(\frac{65}{100} \right)^2 \frac{0,03}{12} * 460 = 7,9 \text{ Ом},$$

$$\lambda_{II} + \lambda_{л1} + \lambda_{\partial 1} = 460$$

5.4 Реактивное сопротивление ротора, приведённое к обмотке статора

$$r'_2 = \frac{4 \cdot 10^{-3} * m(w_1 k_{o\partial 1})^2}{p * q_1} \sqrt{\frac{\mu * f_1}{\gamma}} * \sqrt{S} = \frac{4 \cdot 10^{-3} * 3(64 * 0,966)^2}{1 * 12} \sqrt{\frac{100 * 1200}{4000000}} * \sqrt{0,23} = 0,32 \text{ Ом}$$

где $k_{o\partial 1} = 0,966$;

$p=1$;

$\mu=1200 \text{ Гн/м}$;

$\gamma=4000000 \text{ См/м}$;

$f_1 = 100 \text{ Гц}$;

$s=0,23$.

5.5 Сопротивление в относительных единицах

$$r_{1*} = r_1 \frac{I_{1H}}{U_{1H}} = 2,21 \frac{9,84}{220} = 0,099 \text{ О. е.}$$

$$x_{1*} = x_1 \frac{I_{1H}}{U_{1H}} = 7,9 \frac{9,84}{220} = 0,35 \text{ О. е.}$$

$$r'_{2*} = r'_2 \frac{I_{1H}}{U_{1H}} = 0,32 \frac{9,84}{220} = 0,0143 \text{ О. е.}$$

$$x'_{2*} = x'_2 \frac{I_{1H}}{U_{1H}} = 0,32 \frac{9,84}{220} = 0,0143 \text{ О. е.}$$

5.6 Магнитное сопротивление

$$I_{1н} = \sqrt{I_{1а}^2 + I_{\mu}^2}$$

$$I_{\mu} = \sqrt{I_{1н}^2 - I_{1а}^2} = 2,44 \text{ A}$$

$$x_{\mu} = \frac{U}{I_{\mu}} = \frac{220}{2,4} = 90 \text{ Ом}$$

6 Расчет параметров двигателя с массивным ротором нормального исполнения при частоте 140 Гц

6.1 Активное сопротивление обмотки статора:

$$r_1 = \rho_{115} \frac{L_1}{q_{эф} a} = \frac{10^{-6}}{41} \frac{97}{1.1 \cdot 10^{-6}} = 2.35 \text{ Ом},$$

Длина проводников фазы обмотки:

$$L_1 = l_{cp} \cdot w_1 = 1.5 \cdot 64,6 = 97 \text{ м},$$

$$w_1 = \frac{U_n \cdot Z_1}{2a \cdot m} = \frac{5 \cdot 72}{2 \cdot 3} = 65;$$

Средняя длина витка:

$$l_{cp} = 2(l_{n1} + l_{л1}) = 2(0.03 + 0.72) = 1,5 \text{ м},$$

$$l_{n1} = 0,03 \text{ м}.$$

Длина лобовой части:

$$l_{л1} = K_{л} b_{KT} + 2B = 1.2 \cdot 0.558 + 0.01 = 0.72 \text{ м}$$

где B = 0,01 - длина вылета прямолинейной части катушек из паза от торца сердечника до начала отгиба лобовой части;

Средняя ширина катушки:

$$b_{KT} = \frac{\pi(D+h_{П1})}{2p} \beta_1 = \frac{3.14(40075+52,1)}{2} 1 = 584 \text{ мм},$$

6.2 Активное сопротивление обмотки ротора, приведённое к обмотке статора:

$$r_2' = \frac{4 \cdot 10^{-3} \cdot m(w_1 k_{об1})^2}{p \cdot q_1} \sqrt{\frac{\mu \cdot f_1}{\gamma}} \cdot \sqrt{S} = \frac{4 \cdot 10^{-3} \cdot 3(64 \cdot 0,966)^2}{1 \cdot 12} \sqrt{\frac{140 \cdot 1200}{4000000}} \cdot \sqrt{0,285} = 0.43 \text{ Ом},$$

где $k_{об1} = 0,966$;

$p=1$;

$\mu=1200 \text{ Гн/м}$;

$\gamma=4000000 \text{ См/м}$;

$f_1 = 140 \text{ Гц}$;

$S=0,285$.

Число пазов на полюс и фазу:

$$q_1 = \frac{Z_1}{2pt} = \frac{72}{2 \cdot 3} = 12$$

6.3 Реактивное сопротивление статора

$$x_1 = 15.8 \frac{f_1}{100} \left(\frac{\omega_1}{100} \right)^2 \frac{l_\delta'}{pq} (\lambda_{II} + \lambda_{л1} + \lambda_{\partial 1}) = 15.8 \frac{140}{100} \left(\frac{65}{100} \right)^2 \frac{0,03}{12} \cdot 510 = 12,2 \text{ Ом},$$

$$\lambda_{II} + \lambda_{л1} + \lambda_{\partial 1} = 510$$

6.4 Реактивное сопротивление ротора, приведённое к обмотке статора

$$r_2' = \frac{4 \cdot 10^{-3} \cdot m(w_1 k_{o\delta 1})^2}{p \cdot q_1} \sqrt{\frac{\mu \cdot f_1}{\gamma}} \cdot \sqrt{S} = \frac{4 \cdot 10^{-3} \cdot 3(64 \cdot 0,966)^2}{1 \cdot 12} \sqrt{\frac{140 \cdot 1200}{4000000}} \cdot \sqrt{0,285} = 0.43$$

Ом

где $k_{o\delta 1} = 0,966$;

$p=1$;

$\mu=1200$ Гн/м;

$\gamma=4000000$ См/м;

$f_1 = 140$ Гц;

$s=0,285$.

6.5 Сопротивление в относительных единицах

$$r_{1*} = r_1 \frac{I_{1H}}{U_{1H}} = 2,35 \frac{9,4}{220} = 0,1004 \text{ О. е.}$$

$$x_{1*} = x_1 \frac{I_{1H}}{U_{1H}} = 12,2 \frac{9,4}{220} = 0,5213 \text{ О. е.}$$

$$r_{2*}' = r_2' \frac{I_{1H}}{U_{1H}} = 0,43 \frac{9,4}{220} = 0,0183 \text{ О. е.}$$

$$x_{2*}' = x_2' \frac{I_{1H}}{U_{1H}} = 0,43 \frac{9,4}{220} = 0,0183 \text{ О. е.}$$

6.6 Магнитное сопротивление

$$I_{1H} = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{\mu}^2}$$

$$I_{\mu} = \sqrt{I_{1H}^2 - I_{1a}^2} = 0,71 \text{ А}$$

$$x_{\mu} = \frac{U}{I_{\mu}} = \frac{220}{0,71} = 310 \text{ Ом}$$

7. Расчет параметров двигателя сепараторной установки с массивным ротором с увеличенным зазором 2δ при частоте 140 Гц

7.1 Активное сопротивление обмотки статора:

$$r_1 = \rho_{115} \frac{L_1}{q_{\phi} a} = \frac{10^{-6}}{41} \frac{91.36}{1.1 \cdot 10^{-6}} = 2.21 \text{ Ом},$$

Длина проводников фазы обмотки:

$$L_1 = l_{cp} \cdot w_1 = 1.42 \cdot 65 = 91.2 \text{ м},$$

$$w_1 = \frac{U_n \cdot Z_1}{2a \cdot m} = \frac{5.72}{2 \cdot 3} = 65;$$

Средняя длина витка:

$$l_{cp} = 2(l_{n1} + l_{л1}) = 2(0.03 + 0.68) = 1.42 \text{ м},$$

$$l_{n1} = 0.03 \text{ м}.$$

Длина лобовой части:

$$l_{л1} = K_{л} b_{KT} + 2B = 1.2 \cdot 0.551 + 0.01 = 0.681 \text{ м}$$

где $B = 0.01$ - длина вылета прямолинейной части катушек из паза от торца сердечника до начала отгиба лобовой части;

Средняя ширина катушки:

$$b_{KT} = \frac{\pi(D+h_{П1})}{2p} \beta_1 = \frac{3.14(403+52.1)}{2} 1 = 551 \text{ мм},$$

7.2 Активное сопротивление обмотки ротора, приведённое к обмотке статора:

$$r_2' = \frac{4 \cdot 10^{-3} \cdot m(w_1 k_{o\delta 1})^2}{p \cdot q_1} \sqrt{\frac{\mu \cdot f_1}{\gamma}} \cdot \sqrt{S} = \frac{4 \cdot 10^{-3} \cdot 3(64 \cdot 0,966)^2}{1 \cdot 12} \sqrt{\frac{140 \cdot 1200}{4000000}} \cdot \sqrt{0,3} = 0,38 \text{ Ом},$$

где $k_{o\delta 1} = 0,966$;

$p=1$;

$\mu=1200 \text{ Гн/м}$;

$\gamma=4000000 \text{ См/м}$;

$f_1 = 140 \text{ Гц}$;

$s=0,3$.

Число пазов на полюс и фазу:

$$q_1 = \frac{Z_1}{2pt} = \frac{72}{2 \cdot 3} = 12$$

7.3 Реактивное сопротивление статора

$$x_1 = 15,8 \frac{f_1}{100} \left(\frac{\omega_1}{100} \right)^2 \frac{l_{\delta}'}{pq} (\lambda_{II} + \lambda_{л1} + \lambda_{\partial 1}) = 15,8 \frac{140}{100} \left(\frac{65}{100} \right)^2 \frac{0,03}{12} \cdot 460 = 11 \text{ Ом},$$

$$\lambda_{II} + \lambda_{л1} + \lambda_{\partial 1} = 460$$

7.4 Реактивное сопротивление ротора, приведённое к обмотке статора

$$r_2' = \frac{4 \cdot 10^{-3} \cdot m(w_1 k_{o\delta 1})^2}{p \cdot q_1} \sqrt{\frac{\mu \cdot f_1}{\gamma}} \cdot \sqrt{S} = \frac{4 \cdot 10^{-3} \cdot 3(64 \cdot 0,966)^2}{1 \cdot 12} \sqrt{\frac{140 \cdot 1200}{4000000}} \cdot \sqrt{0,3} = 0,38 \text{ Ом}$$

где $k_{o\delta 1} = 0,966$;

$$p=1;$$

$$\mu=1200 \text{ Гн/м};$$

$$\gamma=4000000 \text{ См/м};$$

$$f_1 = 140 \text{ Гц};$$

$$=0,3.$$

7.5 Сопротивление в относительных единицах

$$r_{1*} = r_1 \frac{I_{1H}}{U_{1H}} = 2,21 \frac{10,01}{220} = 0,1 \text{ о. е.}$$

$$x_{1*} = x_1 \frac{I_{1H}}{U_{1H}} = 11 \frac{10,01}{220} = 0,5 \text{ о. е.}$$

$$r'_{2*} = r'_2 \frac{I_{1H}}{U_{1H}} = 0,38 \frac{10,01}{220} = 0,0173 \text{ о. е.}$$

$$x'_{2*} = x'_2 \frac{I_{1H}}{U_{1H}} = 0,38 \frac{10,01}{220} = 0,0173 \text{ о. е.}$$

7.6 Магнитные сопротивления

$$I_{1н} = \sqrt{I_{1а}^2 + I_{\mu}^2}$$

$$I_{\mu} = \sqrt{I_{1н}^2 - I_{1а}^2} = 2,4 \text{ А}$$

$$x_{\mu} = \frac{U}{I_{\mu}} = \frac{220}{2,4} = 93 \text{ Ом}$$

Приложение Б Расчет параметров исследуемой БЭСМ

1 Примем предварительно высоту вращения [55; с.343; рисунок 9.18]:
 $h=225$ мм. Ближайшее стандартное значение $h = 225$ мм. Тогда внешний диаметр статора равен $D_a = 0.65$ м.

2 Найдем внутренний диаметр статора:

$$D = K_D \cdot D_a = 0.6 \cdot 0.65 = 0.403 \text{ м.}$$

3 Полусное деление:

$$\tau = \frac{\pi D}{2p} = \frac{\pi \cdot 0.403}{2} = 0.632 \text{ м.}$$

4 Определим расчетную мощность [55 ; с.345; рисунок 9.21]:

$$P' = mIE = P_2 \frac{k_E}{\eta \cdot \cos \varphi},$$

где $k_E = 0.972$, $\eta = 0.86$ и $\cos \varphi = 0.85$.

Тогда

$$P' = \frac{4 \cdot 10^3 \cdot 0.99}{0.86 \cdot 0.75} = 6139,4 \text{ ВА.}$$

5 Электромагнитные нагрузки [55; с.346,; рисунок 9.22 б]:

$$A = 51 \cdot 10^3 \text{ А} \cdot \text{м}; B_\delta = 0.76 \text{ Тл.}$$

6 Обмоточный коэффициент для двухслойной обмотки:

$$k_{ob1} = 0.966.$$

С учётом сохранения номинальной частоты вращения была увеличена частота сети со 100 Гц до 140 Гц.

7 Расчетная длина магнитопровода:

$$l_\delta = \frac{P'}{\Omega \cdot K_B \cdot D^2 \cdot K_{ob1} \cdot A \cdot B_\delta} = \frac{6139,4}{879 \cdot 1.11 \cdot (0.403)^2 \cdot 0.966 \cdot 51 \cdot 10^3 \cdot 0.76} = 0.001 \text{ м.}$$

Для сохранения объёмов магнитопровода при увеличенном диаметре ротора была принята длина магнитопровода равной 0.03 м.

8 Найдем отношение:

$$\lambda = \frac{l_\delta}{\tau} = \frac{0.03}{0.633} = 0,047.$$

значение находится в допустимых значениях.

9 Предельные значения t_{z1} [55; с.351; рисунок 9.26]:

$$t_{z1min} = 16 \text{ мм}; t_{z1max} = 19 \text{ мм}.$$

10 Найдем предельные значения числа пазов статора:

$$Z_{1min} = \frac{\pi D}{t_{z1max}} = \frac{3.14 \cdot 403}{19} = 66,6; Z_{1max} = \frac{\pi D}{t_{z1min}} = \frac{3.14 \cdot 403}{16} = 79.$$

Принимаем $Z_1 = 72$, тогда $q = \frac{Z_1}{2pm} = \frac{72}{2 \cdot 3} = 12$ - число пазов на полюс и фазу.

11 Зубцовое деление статора:

$$t_{z1} = \frac{\pi D}{2pmq} = \frac{3.14 \cdot 0.403}{2 \cdot 3 \cdot 12} = 17.5 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

12 Число эффективных проводников в пазу (при условии $a = 1$):

$$U'_n = \frac{\pi D A}{I_{1ном} \cdot Z_1} = \frac{3.14 \cdot 0.403 \cdot 2,86 \cdot 10^3}{9,4 \cdot 72} = 5,35$$

$$\text{где } I_{1ном} = \frac{P_2}{m \cdot U_{1ном} \cdot \cos \varphi \cdot \eta} = \frac{4000}{3 \cdot 220 \cdot 0.85 \cdot 0.86} = 9,4 \text{ А}.$$

13 Принимаем $a = 1$, тогда т.к. двухслойная обмотка U'_n округляем до целого четного числа:

$$U_n = U'_n = 5 \text{ проводников}.$$

Окончательные значения:

- число витков в фазе:

$$w_1 = \frac{U_n \cdot Z_1}{2a \cdot m} = \frac{5 \cdot 72}{2 \cdot 3} = 65;$$

- линейная нагрузка:

$$A = \frac{2I_{1ном} \cdot w \cdot m}{\pi D} = \frac{2 \cdot 9,4 \cdot 65 \cdot 3}{3.14 \cdot 0.403} = 2,86 \cdot 10^3 \text{ А} \cdot \text{м};$$

-магнитный поток:

$$\Phi = \frac{k_E \cdot U_{1ном}}{4k_B \cdot w_1 \cdot k_{об1} \cdot f_1} = \frac{0.99 \cdot 220}{4 \cdot 1.11 \cdot 65 \cdot 0.966 \cdot 140} = 0.0066 \text{ Вб};$$

- индукция в воздушном зазоре:

$$B_\delta = \frac{p \cdot \Phi}{D \cdot l_\delta} = \frac{1 \cdot 0.0066}{0.403 \cdot 0.03} = 0.76 \text{ Тл}$$

14 Плотность тока в обмотке статора (предварительно)

$$J = \frac{AJ_1}{A} = \frac{150 \cdot 10^9}{2,86 \cdot 10^3} = 52.894 \cdot 10^6 \text{ A / м}^2$$

где $AJ_1 = 180 \cdot 10^9 \text{ A}^2 / \text{м}^2$ [55; с 355; рисунок 9.27 б].

15 Площадь поперечного сечения эффективного проводника (предварительно)

$$q_{\text{эф}} = \frac{I_{1\text{ном}}}{aJ} = \frac{9.4}{1 \cdot 62.894 \cdot 10^6} = 0,2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 = 0,2 \text{ мм}^2.$$

16 Сечение эффективного проводника (окончательно):

$$q_{\text{эл}} = \frac{q_{\text{эф}}}{n_{\text{эл}}}$$

где $n_{\text{эл}} = 2$, тогда $q_{\text{эл}} = \frac{q_{\text{эф}}}{n_{\text{эл}}} = \frac{0,2}{2} = 0,1 \text{ мм}^2.$

Принимаем обмоточный провод марки ПЭТМ [55; приложение 3 табл.3.1 с 343]

тогда $d = 5.8 \text{ мм}$, $q_{\text{эл}} = 0,5 \text{ мм}^2$, $q_{\text{эл.ср}} = n_{\text{эл}} \cdot q_{\text{эл}} = 1 \text{ мм}^2.$

17 Плотность тока в обмотке статора (окончательно):

$$J = \frac{I_{1\text{ном}}}{a \cdot q_{\text{эл}} \cdot n_{\text{эл}}} = \frac{9,4}{1 \cdot 0,1 \cdot 2} = 52 \text{ A/мм}^2.$$

18 Паз статора определяем [55; с.361; рисунок 9.29 а] с соотношением размеров, обеспечивающих параллельность боковых граней зубцов.

Принимаем предварительно [55; с.357; таблица 9.12]: $B_{z1} = 1.6 Tл$, $B_a = 1.5 Tл$

тогда ширина зубца статора:

$$b_{z1} = \frac{B_{\delta} \cdot t_{z1} \cdot l_{\delta}}{B_{z1} \cdot l_{cm} \cdot k_c}$$

для оксидированной стали марки 2013 [55; с.358; таблица 9.13] $k_c = 0.97$

тогда

$$b_{z1} = \frac{B_{\delta} \cdot t_{z1} \cdot l_{\delta}}{B_{z1} \cdot l_{cm} \cdot k_c} = \frac{0.76 \cdot 17.2 \cdot 10^3 \cdot 0.03}{1.6 \cdot 0.03 \cdot 0.97} = 8.6 \text{ мм}.$$

19 Высота ярма статора:

$$h_a = \frac{\Phi}{2 \cdot B_a \cdot l_{cm} \cdot k_c} = \frac{0.0066}{2 \cdot 1.6 \cdot 0.403 \cdot 0.97} = 71.4 \text{ мм}.$$

20 Размеры паза в штампе:

Размеры шлица

$$b_{ш} = 4.4 \text{ мм}; h_{ш} = 0,5 \text{ мм}; \beta = 45^\circ;$$

$$h_n = \frac{D_a - D}{2} - h_a = \frac{650 - 403}{2} - 71.4 = 52.3 \text{ мм}$$

$$b_1 = \frac{\pi(D + 2h_{ш} - b_{ш}) - Z_1 \cdot b_{z1}}{Z_1 - \pi} = \frac{3.14(403 + 2 \cdot 0,5 - 4,4) - 72 \cdot 8.7}{72 - 3.14} = 9.2 \text{ мм}$$

$$b_2 = \frac{\pi(D + 2h_n)}{Z_1} - b_{z1} = \frac{3.14(403 + 2 \cdot 52.1)}{54} - 8.7 = 13.5 \text{ мм}$$

$$h_{н.к.} = h_n - \left(h_{ш1} + \frac{b_1 - b_{ш}}{2} \right) = 52.3 - \left(0,5 + \frac{9.2 - 4.4}{2} \right) = 49.2 \text{ мм.}$$

21 Размеры паза в свету с учетом припуска на боку:

$$b'_1 = b_1 - \Delta b_n = 9.2 - 0.2 = 9 \text{ мм}$$

$$b'_2 = b_2 - \Delta b_n = 13.5 - 0.2 = 13.3 \text{ мм}$$

$$h'_{н.к.} = h_{н.к.} - \Delta h = 49.2 - 0.2 = 49 \text{ мм}$$

где $\Delta b_n = \Delta h = 0,2$ [55; с.360; таблица 9.14].

22 Площадь поперечного сечения паза для размещения проводников обмотки:

$$S'_n = \frac{b'_1 + b'_2}{2} h'_{н.к.} - (S_{из} + S_{np}) = \frac{9 + 13.3}{2} \cdot 49 - (50.7 + 13.68) = 496.2 \text{ мм}^2$$

где площадь поперечного сечения прокладок:

$$S_{np} = 0.9b_1 + 0.4b_2 = 0.9 \cdot 9.2 + 0.4 \cdot 13.5 = 13.68 \text{ мм}^2.$$

23 Площадь поперечного сечения корпусной изоляции:

$$S_{из} = b_{из}(2h_n + b_1 + b_2) = 0.4(2 \cdot 52.3 + 9.2 + 13.5) = 50.7 \text{ мм}^2$$

где односторонняя толщина изоляции в пазу $b_{из} = 0,4 \text{ мм}$ [55; с. 77; таблица 3.1].

24 Коэффициент заполнения паза:

$$k_3 = \frac{d_{из}^2 \cdot U_n \cdot n_{эл}}{S_n} = \frac{5.85^2 \cdot 5 \cdot 2}{496.2} = 0.726.$$

Полученное значение коэффициента заполнения паза находится в допустимых пределах и допускает механизированную укладку обмотки в паз

25 Воздушный зазор [55; с.367; рисунок 8.31] равен $\delta = 3 \text{ мм}$.

26 Число пазов ротора [55; с.373;таблица 9.18] равно $Z_2 = 72$.

27 Внешний диаметр ротора:

$$D_2 = 400 \text{ мм} = 0.4 \text{ м}.$$

28 Длина магнитопровода:

$$l_2 = l_1 = l_\delta = 0.03 \text{ м}.$$

29 Зубцовое деление ротора:

$$t_{z2} = \frac{\pi D_2}{Z_2} = \frac{3.14 \cdot 400}{72} = 17.45 \text{ мм}.$$

30 Внутренний диаметр ротора равен диаметру вала, т.к. сердечник ротора непосредственно насаживается на вал:

$$D_j = D_\epsilon = k_\epsilon \cdot D_a = 0.22 \cdot 0.4 = 0.088 = 88 \text{ мм}$$

где $k_\epsilon = 0.23$ [55;с.318; таблица 9.19].

31 Ток в обмотке ротора:

$$I_2 = k_i \cdot I_1 \cdot v_i = 0.88 \cdot 9.4 \cdot 5.11 = 38.5 \text{ А}$$

где $k_i = 0.2 + 0.8 \cos \varphi = 0.2 + 0.8 \cdot 0.85 = 0.88$ - коэффициент, учитывающий

влияние тока намагничивания на отношение I_1/I_2 .

Коэффициент приведения токов:

$$v_i = \frac{2m_1 w_1 k_{об1}}{Z_2 k_{ск}} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 165 \cdot 0.945}{72 \cdot 0.994} = 5.11.$$

32 Коэффициент скоса:

$$K_{ск} = \frac{2 \sin(\gamma/2)}{\gamma_{ск}} = \frac{2 \sin(0.17/2)}{0.17} = 0.998,$$

$$\gamma_{ск} = \beta_{ск} \cdot \pi \cdot \frac{2p}{Z_2} = \frac{1 \cdot 3.14 \cdot 2}{37} = 0.17.$$

33 Площадь поперечного сечения стержня (предварительно):

$$q_c = \frac{I_2}{J_2} = \frac{38}{0.5} = 76 \text{ мм}^2 = 76 \text{ мм}^2.$$

Плотность тока в стержне литой клетки принимаем $J_2 = 0.5 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$.

34 Паз ротора определяем [55; с.380; рисунок 9.40]. Принимаем $b_{и} = 1.5 \text{ мм}$;

$$h_{и} = 0.7 \text{ мм}; h'_{и} = 0.1 \text{ мм}.$$

Допустимая ширина зуба:

$$b_{z2\text{дон}} = \frac{B_{\delta} \cdot t_{z2} \cdot l_{\delta}}{B_{z2} \cdot l_{cm2} \cdot \kappa_c} = \frac{0.88 \cdot 17.5 \cdot 30}{1.8 \cdot 30 \cdot 0.97} = 8 \text{ мм}$$

где $B_{z2} = 1.8 T_L$ [55; с.357; таблица 9.12].

Размеры паза:

$$b_1 = \frac{\pi(D_2 - 2h_{III} - 2h'_{III}) - Z_2 b_{z2}}{\pi + Z_2} = \frac{3.14(400 - 2 \cdot 0.7 - 2 \cdot 0.1) - 72 \cdot 8}{3.14 + 72} = 8,9 \text{ мм}$$

$$b_2 = \sqrt{\frac{b_1^2 \left(\frac{Z_2 + \pi}{\pi} \right) - 4q_c}{\frac{Z_2 - \pi}{\pi} \cdot \frac{\pi}{2}}} = \sqrt{\frac{8.9^2 (72/3.14 + 3.14/2) - 4 \cdot 76}{72/3.14 + 3.14/2}} = 8,7 \text{ мм}$$

$$h_{II2} = h_{III} + h'_{III} + \frac{b_1}{2} + h_1 + \frac{b_2}{2} = 0.7 + 0.1 + \frac{8,8}{2} + 1,8 + \frac{8,7}{2} = 12.3 \text{ мм.}$$

35 Уточняем ширину зубцов ротора:

$$b'_{z2} = \pi \frac{D_2 - 2(h_{III} + h'_{III}) \cdot b_1}{Z_2} - b_1 = 3.14 \frac{400 - 2(0.7 + 0.1) \cdot 8,9}{72} - 8,8 = 1.9 \text{ мм}$$

$$b''_{z2} = \pi \frac{D_2 - 2h_n + b_2}{Z_2} - b_2 = 3.14 \frac{400 - 2 \cdot 23.1 + 8,7}{72} - 8,7 = 6,4 \text{ мм}$$

принимаем $b_1 = 8,9 \text{ мм}$; $b_2 = 8,7 \text{ мм}$; $h_1 = 18.3 \text{ мм}$.

Полная высота паза:

$$h_{II2} = h_{III} + h'_{III} + \frac{b_1}{2} + h_1 + \frac{b_2}{2} = 0.7 + 0.1 + \frac{8,8}{2} + 1,8 + \frac{8,7}{2} = 12.3 \text{ мм.}$$

36 Площадь поперечного сечения стержня:

$$q_c = \frac{\pi}{8} (b_1^2 + b_2^2) + \frac{1}{2} (b_1 + b_2) h_1 = (8,9^2 + 8,7^2) + 0.5 \cdot (8,9 + 8,7) \cdot 18,3 = 77,2 \text{ мм}^2.$$

Плотность тока в стержне:

$$J_2 = \frac{I_2}{q_c} = \frac{38}{77,2} = 0.49 \text{ А/мм}^2.$$

37 Короткозамыкающие кольца [55; с.310 рисунок 9.37]:

- площадь поперечного сечения:

$$q_{кл} = \frac{I_{кл}}{J_{кл}} = \frac{440}{0,42 \cdot 10^6} = 1042 \text{ мм}^2$$

где $I_{кл} = \frac{I_2}{\Delta} = \frac{38}{0,087} = 440 \text{ А}$ — ток в кольце, $\Delta = 2 \sin \frac{\alpha_z}{2} = 0.087$ —

плотность тока в кольце; $J = 0.85 \cdot J_2 = 0.85 \cdot 0.5 \cdot 10^6 = 0.425 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$ –
размеры размыкающих колец:

- высота кольца

$$h_{кл} = 1.25 \cdot h_{n2} = 1.25 \cdot 12.3 = 15.4 \text{ мм};$$

- ширина кольца

$$b_{кл} = \frac{q_{кл}}{h_{кл}} = \frac{1042}{15.4} = 67.5 \text{ мм};$$

- площадь поперечного сечения:

$$q_{кл} = h_{кл} \cdot b_{кл} = 15.4 \cdot 67 = 1042 \text{ мм}^2$$

- диаметр кольца средний

$$D_{к.ср} = D_2 - h_{кл} = 400 - 67.5 = 385 \text{ мм}.$$

Выбираем магнитопровод из стали марки 2013 с толщиной листов 0.5 мм.

38 Магнитное напряжение воздушного зазора:

$$F_\delta = 1.59 \cdot 10^6 B_\delta k_\delta \delta = 1.59 \cdot 10^6 \cdot 0.76 \cdot 3 \cdot 1.19 \cdot 10^{-3} = 3771.2 \text{ A}.$$

где коэффициент воздушного зазора k_δ

$$k_\delta = \frac{t_1}{t_1 - \gamma \delta} = \frac{17.5}{17.5 - 0.23 \cdot 3} = 1.04$$

$$\gamma = \frac{\left(\frac{b_{ш1}^2}{\delta^2}\right)}{5 + \frac{b_{ш1}}{\delta}} = \frac{(4.4/3)^2}{5 + 4.4/3} = 0.23.$$

39 Магнитное напряжение зубцовой зоны статора:

$$F_{z1} = 2h_{z1}H_{z1} = 2 \cdot 0.052 \cdot 2000 = 87 \text{ A}$$

где $h_{z1} = h_{n1} = 52 \text{ мм}.$

Расчетная индукция в зубцах:

$$B_{z1} = \frac{B_\delta \cdot t_{z1} \cdot l_\delta}{b_{z1} \cdot l_{cm1} \cdot K_c} = \frac{0.76 \cdot 17.5 \cdot 30}{8.6 \cdot 30 \cdot 0.97} = 1.6 \text{ Тл}$$

тогда при $B_{z1} = 1.6 \text{ Тл}, H_{z1} = 2000 \text{ A/м}.$

40 Магнитное напряжение зубцовой зоны ротора:

$$F_{z2} = 2h_{z2}H_{z2} = 2 \cdot 0.0115 \cdot 253 = 5.81 \text{ A}$$

При трапецеидальных закрытых пазах $h_{z2}=h_{п2}-0.1 \cdot b_2=12,3-0.1 \cdot 8,7=11,5$
мм.

Индукция в зубце ротора:

$$B_{z2} = \frac{B_{\delta} \cdot t_{z2} \cdot l_{\delta}}{b_{z2} \cdot l_{cm2} \cdot \kappa_c} = \frac{0.76 \cdot 17,4 \cdot 30}{1,9 \cdot 30 \cdot 0.97} = 7,34 \text{ Тл.}$$

Тогда $H_{z2} = 253 \text{ А/м.}$

41 Коэффициент насыщения зубцовой зоны:

$$k_z = 1 + \frac{F_{z1} + F_{z2}}{F_{\delta}} = 1 + \frac{87 + 5,81}{3771} = 1.025.$$

42 Магнитное напряжение ярма статора:

$$F_a = L_a H_a = 0.91 \cdot 320 = 291 \text{ А}$$

длина средней магнитной силовой линии в ярме статора:

$$L_a = \frac{\pi(D_a - h_a)}{2p} = \frac{3.14(650 - 71,4)}{2} = 908,4 \text{ мм}$$

высота ярма статора:

$$h_a = \frac{D_a - D}{2} - h_{n1} = \frac{650 - 400}{2} - 52,1 = 71,4 \text{ мм.}$$

При отсутствии радиальных вентиляционных каналов в статоре

$$h' = h_a = 71,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Индукция в ярме статора:

$$B_a = \frac{\Phi}{2 \cdot h_a \cdot l_{cm1} \cdot \kappa_c} = \frac{0.0066}{2 \cdot 0.0714 \cdot 0.03 \cdot 0.97} = 1.59 \text{ Тл}$$

для $B_a = 1.59 \text{ Тл}$ [55; с. 696: таблица П 1.6] $H_a = 320 \text{ А/м.}$

43 Магнитное напряжение ярма ротора:

$$F_j = L_j H_j = 0.364 \cdot 62 = 22.5 \text{ А,}$$

$$L_j = \frac{\pi(D_j + h_j')}{2p} = \frac{3.14(0.088 + 0.176)}{2} = 0.364 \text{ м,}$$

$$\text{где } h_j = \frac{D_2 - D_j}{2} - h_{п2} = \frac{400 - 88}{2} - 12,4 = 144 \text{ мм,}$$

$$B_i = \frac{\Phi}{2 \cdot h_j' \cdot l_{cm2} \cdot \kappa_c} = \frac{0.0066}{2 \cdot 0.144 \cdot 0.03 \cdot 0.97} = 0,65 \text{ Тл,}$$

для $B_i = 0,65 \text{ Тл}$ [55; с. 696: таблица П 1.6] $H_i = 62 \text{ А/м.}$

44 Магнитное напряжение на пару полюсов:

$$F_u = F_\delta + F_{z1} + F_{z2} + F_a + F_j = 3771 + 87 + 5,8 + 290 + 22,5 = 4177 \text{ A.}$$

45 Коэффициент насыщения магнитной цепи:

$$k_\mu = \frac{F_u}{F_\delta} = \frac{4177}{3771} = 1.11.$$

46 Намагничивающий ток:

$$I_\mu = \frac{pF_u}{0.9m\omega_1 k_{об1}} = \frac{1 \cdot 4177}{0.9 \cdot 3 \cdot 64 \cdot 0.945} = 25 \text{ A.}$$

47 Относительное значение:

$$I_{\mu*} = \frac{I_\mu}{I_{1H}} = \frac{25}{9,4} = 2,65.$$

48 Активное сопротивление обмотки статора:

$$r_1 = \rho_{115} \frac{L_1}{q_{эф} a} = \frac{10^{-6}}{41} \frac{91.36}{1.1 \cdot 10^{-6}} = 2.21 \text{ Ом},$$

для класса нагревостойкости изоляции Грасчетная температура
 $\nu_{расч} = 115^\circ \text{C}$, для медных проводников $\rho = 10^{-6} / 41 \text{ Ом м}$.

Длина проводников фазы обмотки:

$$L_1 = l_{cp} \cdot w_1 = 1.42 \cdot 64 = 91.2 \text{ м}.$$

Средняя длина витка:

$$l_{cp} = 2(l_{n1} + l_{л1}) = 2(0.03 + 0.68) = 1.42 \text{ м}.$$

Длина лобовой части:

$$l_{л1} = K_{л} b_{KT} + 2B = 1.2 \cdot 0.551 + 0.01 = 0.681 \text{ м}$$

где $B = 0.01$ - длина вылета прямолинейной части катушек из паза от торца сердечника до начала отгиба лобовой части, $K_{л} = 1.2$ [55; с. 399; таблица 9.23].

Средняя ширина катушки:

$$b_{KT} = \frac{\pi(D+h_{П1})}{2p} \beta_1 = \frac{3.14(403+52,1)}{2} 1 = 551 \text{ мм}.$$

Длина вылета лобовой части катушки:

$$l_{выл} = K_{выл} \cdot b_{кт} + B = 0.26 \cdot 0.55 + 0.01 = 0.153 \text{ мм}$$

где $K_{выл} = 0,153$ [1; с.399; таблица 9.23].

Относительное значение:

$$r_{1*} = r_1 \frac{I_{1H}}{U_{1H}} = 2,21 * \frac{9,4}{220} = 0.068.$$

49 Активное сопротивление фазы обмотки ротора:

$$r_2 = \frac{2 * m_1 * 10^{-3} * (w_1^2 * k w_1^2)}{p * q_1} \sqrt{\frac{\mu * f_1}{\gamma}} * \sqrt{s} = 191 \text{ Ом}$$

для $s=0,3$

$$r_c = \rho_{115} \frac{l_2}{q_c} = \frac{10^{-6}}{20,5} * \frac{0.03}{76,3 * 10^{-6}} = 1.99 * 10^{-5} \text{ Ом}$$

где для литой алюминиевой обмотки ротора $\rho_{115} = \frac{10^{-6}}{20,5}$.

Сопротивление участка замыкающего кольца, заключенного между двумя соседними стержнями:

$$r_{кл} = \rho_{115} \frac{\pi D_{кл,ср}}{Z_2 q_{кл}} = \frac{10^{-6}}{20,5} * \frac{3.14 * 0.385}{72 * 1042 * 10^{-6}} = 0.75 * 10^{-6} \text{ Ом}$$

Приводим r_2 к числу витков обмотки статора:

$$r_2' = \frac{4 * 10^{-3} * m (w_1 k_{об1})^2}{p * q_1} \sqrt{\frac{\mu * f_1}{\gamma}} * \sqrt{s} = 0.43 \text{ Ом.}$$

для $s=0,3$

Относительное значение:

$$r_{2*}' = r_2' \frac{I_{1H}}{U_{1H}} = 0.43 * \frac{9,4}{220} = 0.478.$$

для $s=0,3$

50 Индуктивное сопротивление фазы обмотки статора:

$$x_1 = 15.8 \frac{f_1}{100} \left(\frac{\omega_1}{100} \right)^2 \frac{l_{\delta}'}{pq} (\lambda_{II} + \lambda_{л1} + \lambda_{\partial 1}) = 11 \text{ Ом,}$$

где [55; с. 403; таблица 9.26; рисунок 9.50] коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния:

$$\begin{aligned} \lambda_{II} &= \frac{h_2}{3b_1} k_{\beta} + \left(\frac{h_1}{b_1} + \frac{3h_{\kappa}}{b_1 + 2b_{III1}} + \frac{h_{III1}}{b_{III1}} \right) k_{\beta}' = \\ &= \frac{48.6}{3 * 7.3} * 1.25 + \left(\frac{3 * 2.4}{7.3 + 2 * 1.5} + \frac{1.5}{0.7} \right) * 0.9167 = 1.1 \end{aligned}$$

где $h_2 = h_{п.к} - 2b_{из} = 14.1 - 2 \cdot 0.15 = 13.6$ мм; $b_1 = 7.3$ мм; $h_1 = 0$ - проводники закрепленные крышкой.

$$h_k = 0.5 \cdot (b_1 - b_{из}) = 0.5 \cdot (7.3 - 1.5) = 2.9 \text{ мм};$$

$$k_\beta = 0.25(1 + 3\beta) = 1.25;$$

$$k'_\beta = 0.9176 l'_\delta = l_\delta = 0.03 \text{ м.}$$

Коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния:

$$\lambda_{л1} = 0.34 \frac{q}{l_\delta} (l_l - 0.64 \cdot \beta_1 \tau) = \frac{0.34 \cdot 12}{0.03} (0.68 - 0.64 \cdot 0.2889 \cdot 0.63) = 37.56$$

где $l'_\delta = l_\delta = 0.03 \text{ м.}$

коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния:

$$\lambda_{\partial 1} = \frac{t_{z1}}{12\delta k_\delta} \xi_1 = \frac{17.5}{12 \cdot 3 \cdot 1.19} \cdot 1.48 = 0.67$$

$$\begin{aligned} \xi_1 &= 2k'_{ck} k_\beta - k_{об1}^2 \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 \cdot (1 + \beta_{ck}^2) \\ &= 2 \cdot 0.99 \cdot 1.2 - 0.945^2 \cdot 0.99^2 (1 + 1.26^2) = 1.48 \end{aligned}$$

где $\beta_{ck} = 1.26$, $\left(\frac{t_{z2}}{t_{z1}} \right) = 0.99$, $k'_{ck} = 1.2$ [55; с. 405; рисунок 9.51 д].

Относительное значение:

$$x_{1*} = x_1 \frac{I_{1H}}{U_{1H}} = 11 \frac{9.4}{220} = 0.083.$$

51 Индуктивное сопротивление фазы обмотки ротора:

$$x_2 = 0.6 \cdot r_2 = 114 \text{ Ом},$$

где [55; с.408; таблица 9.27; рисунок 9.52 е]:

$$\begin{aligned} \lambda_{л2} &= \left[\frac{h_0}{3b_1} \left(1 - \frac{\pi b_1^2}{8q_c} \right) + 0.66 - \frac{b_{III}}{2b_1} \right] k_{л} + \frac{h_{III}}{b_{III}} = \\ &= \left[\frac{5.8}{3 \cdot 9} \left(1 - \frac{9^2 \cdot 3.14}{8 \cdot 0.7} \right)^2 + 0.66 - \frac{1.5}{2 \cdot 9} \right] + \frac{0.75}{1.5} + 1.12 \cdot \frac{0.3 \cdot 10^3}{242.5} = 30.2 \end{aligned}$$

$$h_0 = h_1 + 0.4b_2 = 1.8 + 0.4 \cdot 8.7 = 5.3 \text{ мм.}$$

Коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния:

$$\lambda_{л2} = \frac{2.3D_{кл,ср}}{Z_2 l'_\delta \Delta^2} \lg \frac{4.7D_{кл,ср}}{h_{кл} + 2b_{кл}} = \frac{2.3 \cdot 0.385}{72 \cdot 0.03 \cdot 0.088^2} \cdot \lg \frac{4.7 \cdot 0.385}{0.0154 + 2 \cdot 0.067} = 58,16.$$

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния:

$$\lambda_{д2} = \frac{t_2}{12\delta k_\delta} \xi_2 = \frac{17.5}{12 \cdot 3 \cdot 1.19} \cdot 1.0004 = 0.466.$$

$$\frac{Z_2}{p} \geq 10$$

принимаем $\xi = 1.0004$ при p .

коэффициент проводимости скола: $\lambda_{ск} = 0$

Приводим x_2 к числу витков статора:

$$X'_2 = X_2 \frac{4 \cdot 10^{-3} \cdot m(w_1 k_{об1})^2}{p \cdot q_1} \sqrt{\frac{\mu \cdot f_1}{\gamma}} \cdot \sqrt{S} = 0.43 \text{ Ом}.$$

Относительно значение:

$$x'_{2*} = x'_2 \frac{I_{1H}}{U_{1H}} = 0.43 \cdot \frac{9.4}{220} = 0.0175.$$

$$P_{ст.осн} = p_{1.0/5.0} \left(\frac{f_1}{50} \right)^\beta \cdot (k_{\partial a} B_a^2 m_a + k_{\partial z} B_{z1}^2 m_{z1}) =$$

$$= 2,55 (1.6 \cdot 1.6^2 \cdot 29.45 + 1.8 \cdot 1,59^2 \cdot 7.33) = 384 \text{ Вт}$$

где $k_{\partial a} = 1.6$; $k_{\partial z} = 1.6$; $P_{1.0/5.0} = 2.5 \text{ Вт/кГ} [55; \text{с.412; таблица 9.28}]$ для стали марки 2013.

Масса стали ярма статора:

$$m_a = \pi(D_a - h_a)h_a l_{cm1} k_C \gamma_C = 3.14(0.65 - 0.071) \cdot 0.071 \cdot 0.03 \cdot 0.97 \cdot$$

$$7800 = 29.4 \text{ кг},$$

$$\nu_c = 7.8 \cdot 10^3 \text{ - удельная масса стали.}$$

Масса стали зубцов статора:

$$m_{z1} = h_{z1} b_{z1cp} Z_1 l_{cm1} k_C \gamma_C = 0.0165 \cdot 0.0086 \cdot 72 \cdot 0.03 \cdot 0.97 \cdot 7800 = 7.3 \text{ кг}$$

2.6.52 Поверхностные потери ротора:

$$P_{нов2} = p_{нов2} (t_2 - b_{u2}) Z_2 l_{cm2} = 1 \text{ Вт}$$

$$p_{нов2} = 0.5 k_{02} \left(\frac{Z_1 n_1}{10000} \right)^{1.5} (B_{02} t_1 \cdot 10^3)^2 =$$

$$29,16 \text{ Вт}.$$

$$B_{02} = \beta_{02} k_\delta B_\delta = 0,032 \text{ ТлТл}.$$

для $\frac{b_{ш}}{\delta} = 7$ [55; с. 413; рисунок 9.53] $\beta_{02} = 0,235$.

2.6.53 Пульсационные потери в зубцах ротора:

$$P_{нул2} = 0,11 \left(\frac{Z_1 n}{1000} B_{нул2} \right)^2 m_{z2} = 0,11 \left(\frac{72 \cdot 8400}{1000} 0,14 \right)^2 \cdot 0,3 = 146,3 \text{ Вт}.$$

Амплитуда пульсаций индукции в среднем сечении зубцов ротора:

$$B_{нул2} = \frac{\gamma \delta}{2t_2} B_{z2cp} = \frac{0,23 \cdot 3}{2 \cdot 17,4} \cdot 7 = 0,14 \text{ Тл}.$$

$$\gamma_2 = \frac{(b_{ш2}/\delta)^2}{5 + b_{ш2}/\delta} = \frac{1}{6} = 0,23$$

Масса стали зубцов ротора:

$$m_{z2} = h_{z2} \cdot b_{z2cp} \cdot Z_2 \cdot l_{cm2} \cdot k_c \cdot v_c = 0,0115 \cdot 0,019 \cdot 72 \cdot 0,03 \cdot 0,97 \cdot 7800 = 0,35 \text{ кг}.$$

2.6.54 Сумма добавочных потерь в стали:

$$P_{ст.доб.} = P_{пов1} + P_{нул1} + P_{пов2} + P_{нул2} = 1 + 146 = 147 \text{ Вт}.$$

2.6.55 Полные потери в стали:

$$P_{ст} = P_{ст.осн} + P_{ст.доб} = 147 + 383 = 532 \text{ Вт}.$$

2.6.56 Механические потери:

$$P_{мех} = 0,005 \cdot P_{ном} = 20 \text{ Вт}$$

где для двигателей с $2p = 4$ $k_m = 1,3 \cdot (1 - D_a) = 1,3 \cdot (1 - 0,272) = 0,94$.

2.6.57 Холостой ход двигателя:

- ток холостого хода:

$$I_{xx} = \sqrt{I_{xx,a}^2 + I_{\mu}^2} = \sqrt{7^2 + 33^2} = 35 \text{ А}$$

$$I_{xx,a} = \frac{P_{ст} + P_{мех} + P_{\varepsilon 1xx}}{m \cdot U_{1ном}} = \frac{532 + 20 + 118,9}{3 \cdot 220} = 7.$$

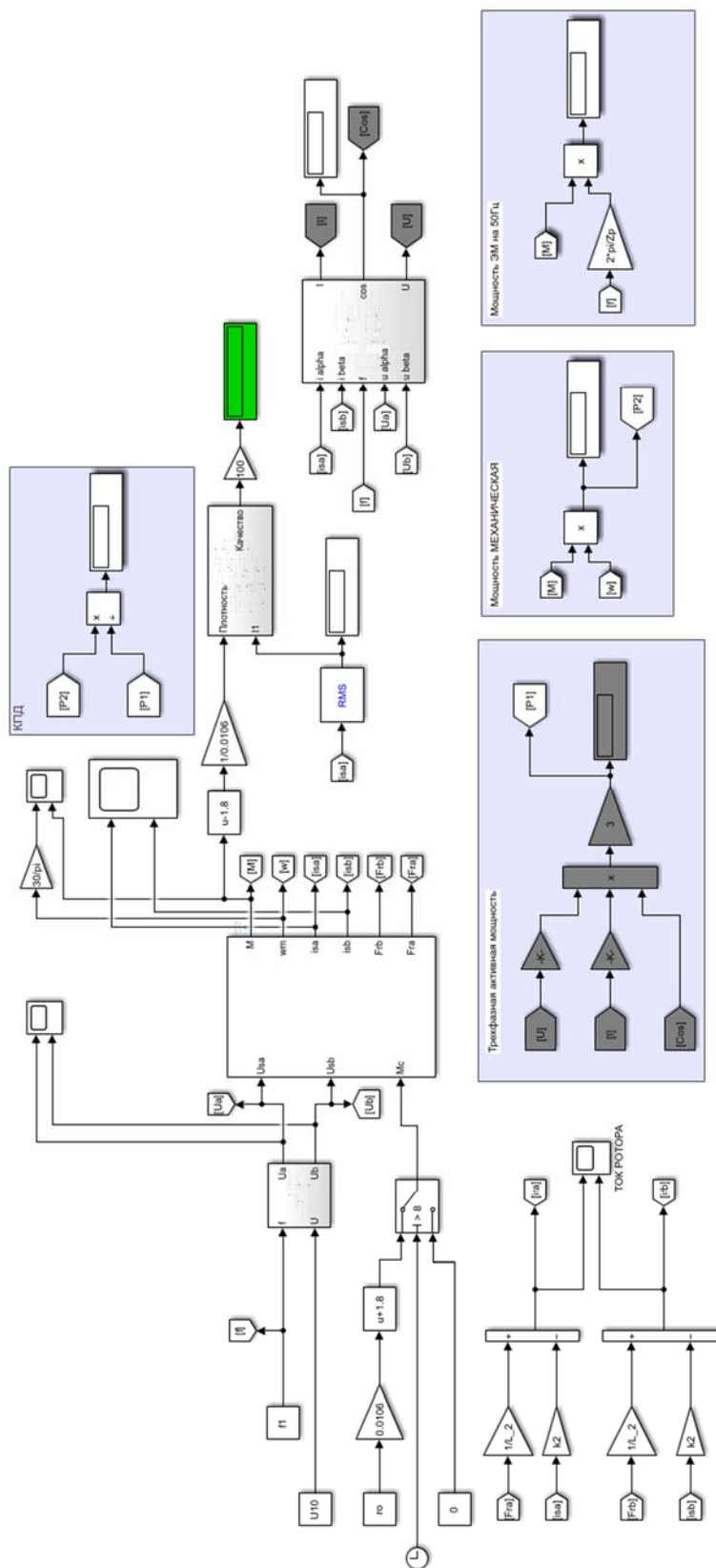
- мощность электрическая при холостом ходу двигателя:

$$P_{\varepsilon 1xx} = 3 \cdot I_{\mu}^2 \cdot r_1 = 3 \cdot 33^2 \cdot 2,21 = 118,9 \text{ Вт}.$$

- косинус угла ϕ на холостом ходу:

$$\cos \phi_{x,x} = \frac{I_{x,x,a}}{I_{x,x}} = \frac{7}{33} = 0,2$$

Приложение В. Скриншоты программы расчёта математической модели БЭСМ.



```

1  U1n=220;
2  f=50;
3  KPD=0.82;
4  cosF=0.82;
5  Zp=2;
6  J=0.1;
7  P2_n=4000;
8  Xm_g=4.86;
9  R1_g=0.068;
10 X1_g=0.083;
11 R2_g=0.478;
12 X2_g=0.175;
13 I1_n=P2_n/(3*U1n*KPD*cosF);
14 A=2*Xm_g*X1_g;
15 B=Xm_g+sqrt(Xm_g^2+4*Xm_g*X1_g);
16 X1_t=A/B;
17 C=X1_g/X1_t;
18 R1_t=R1_g/C;
19 R2_t=R2_g/C;
20 X2_t=X2_g/C^2;
21 Z_baz=U1n/I1_n;
22 r1=R1_t*Z_baz;
23 r2=R2_t*Z_baz;
24 Xm=Xm_g*Z_baz;
25 X1_s=X1_t*Z_baz;
26 X2_s=X2_t*Z_baz;
27 X1=Xm+X1_s;
28 X2=Xm+X2_s;
29 Lm=Xm/(2*pi*f);
30 L1_s=X1_s/(2*pi*f);
31 L2_s=X2_s/(2*pi*f);
32 L_1=Lm+L1_s;
33 L_2=Lm+L2_s;
34 G=1-(Lm^2)/(L_1*L_2);
35 T2=L_2/r2;
36 L2=L_1-(Lm^2)/L_2;
37 k1=Lm/L_1;
38 k2=Lm/L_2;
39 r=r1+r2*k2^2;
40 T1=L2/r;
41 f1=100;
42 U10=220;
43 ro=1030;

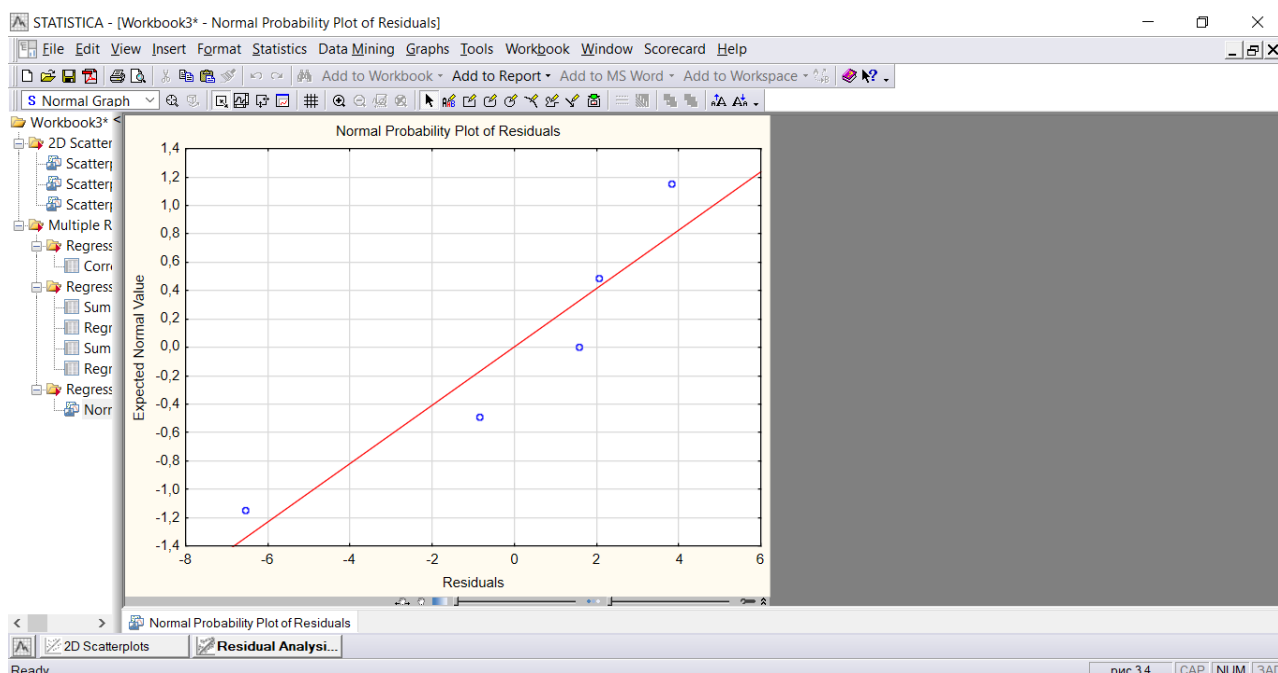
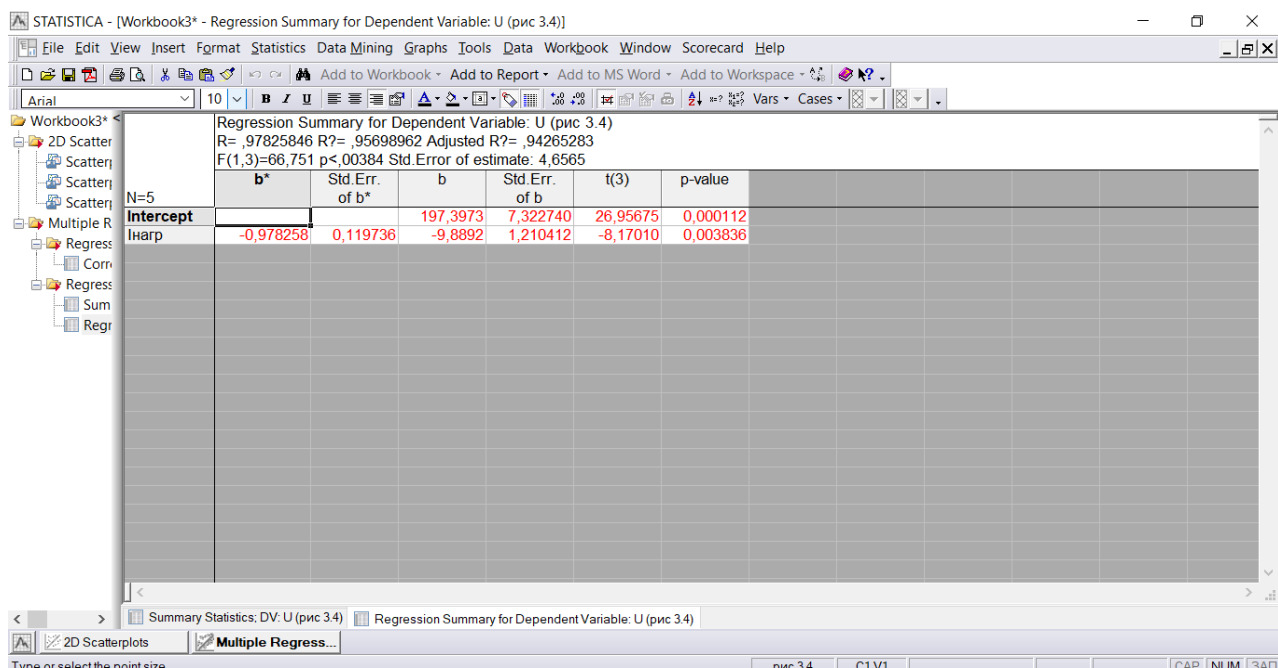
```

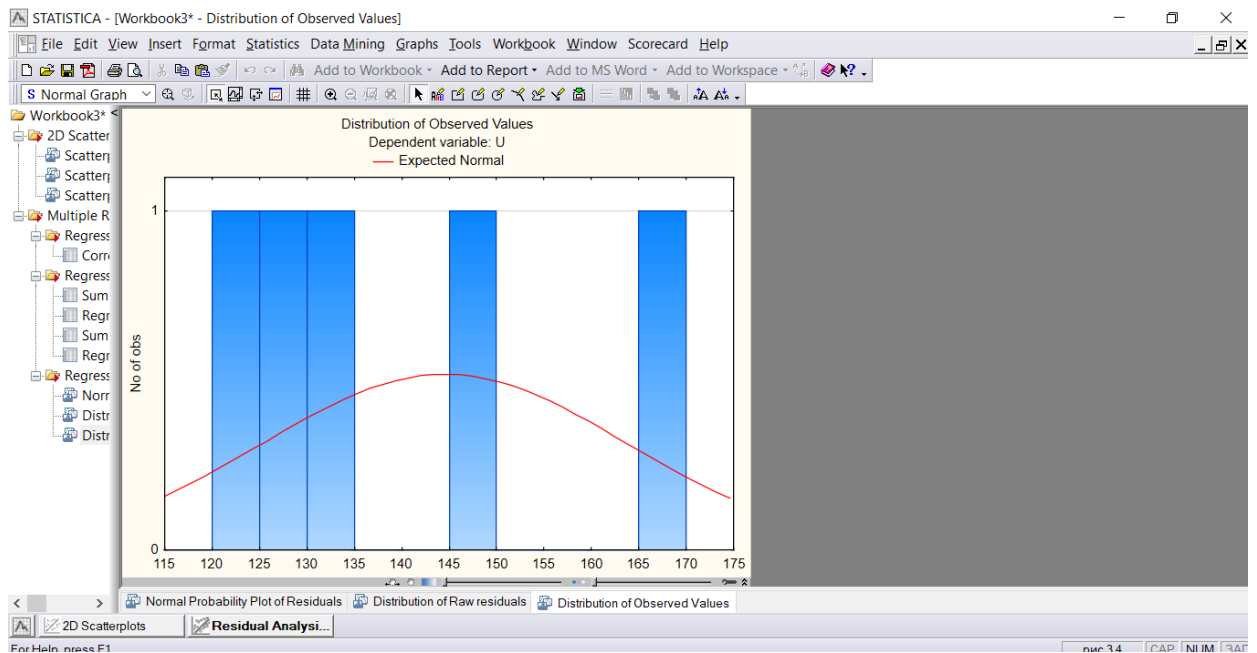
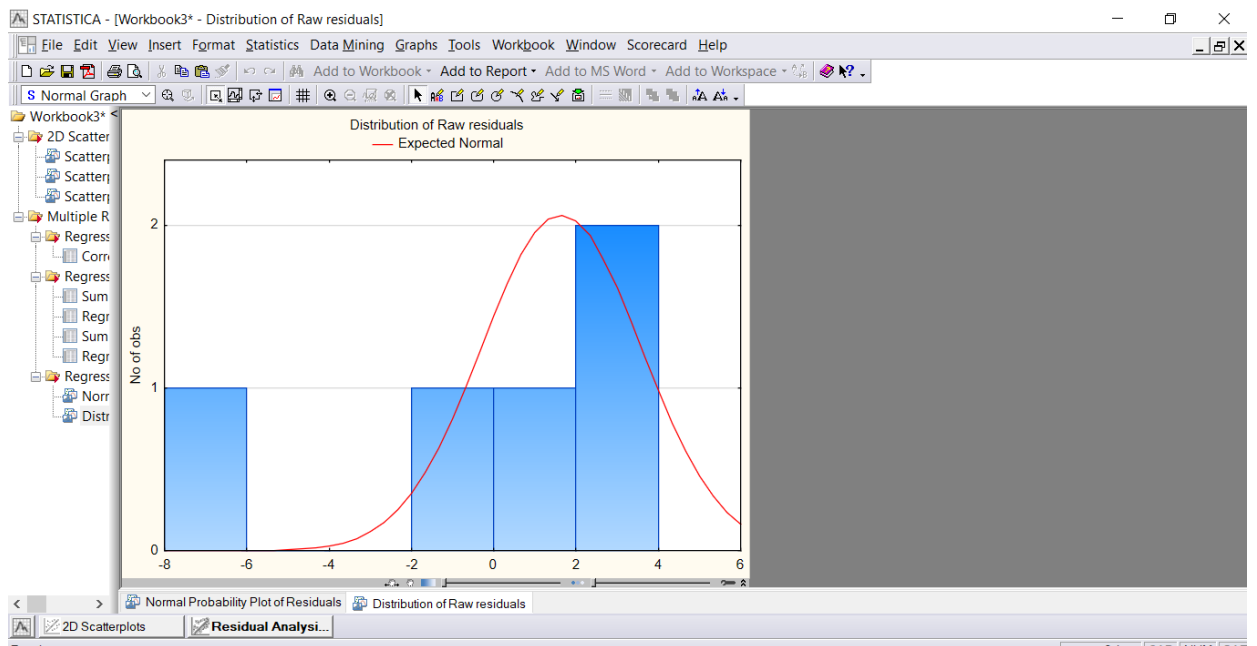
Приложение Г. Фрагмент использования программного комплекса «Statistica» для определения расхождения результатов вычислительного эксперимента и эксперимента на натурном образце.

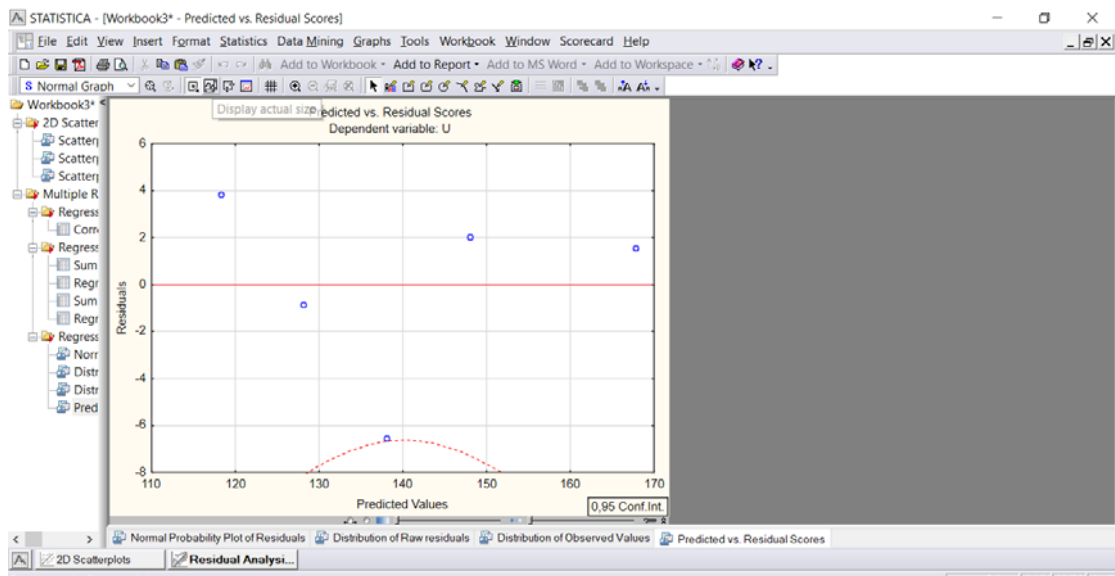
		На основаниях показаний ИК4				На основаниях показаний ИК3			Показания pV3, pA2		Показания pV2, pA1			показ ИК1	На основаниях показаний вычислителя 1				показ ИК2	На основаниях показаний вычислителя 2				Показания манометров		показ ИК2	Расчетные данные						
n2 об/мин	f, Гц	U ₁ , В	P ₃ (АДМ Р, М2) Вт	I ₁ , А	cos φ	U ₁ , В	P ₃ (АДМ Р, М2), Вт	cos j	U ₂ ,В	I ₂ , А	U ₃ , В	I ₃ ,А	M _п , Нм	P ₁ (нагр.), кВт	t ₁ , о С	t ₂ , о С	Q, м³/ч	Θ ₁ , кВт (стат.)	P ₂ (нас.), кВт	t ₃ , °С	t ₄ , °С	Θ ₃ , кВт (ба- раб.)	P _{д1} , м в.ст.	P _{д2} , м в.ст.	P ₂ (M ₁), Вт	г, кг/м³	Н, м в.ст.	M ₂ , Нм	P _Σ потр., кВт	P _Σ по- лез., кВт	КПД уст.		
5959	114,6	209	5 207	10,4	0,799	210	5 287	0,960	209,1	14,3	220,0	4,3	14,0	34,3	27,04	27,34	2,70	0,92	170,3	39,10	39,50	1,22	10,00	20,00	170,3	1021,0	10,00	7,1	39,73	38,51	0,969		
5997	114,6	209	5 314	10,4	0,815	210	5 394	0,965	209,0	14,6	220,0	4,3	14,2	34,3	27,04	27,34	2,70	0,92	170,5	39,10	39,50	1,22	10,00	20,00	170,5	1022,5	10,00	7,2	39,84	38,57	0,968		
5955	114,6	209	5 347	10,5	0,812	210	5 428	0,955	208,9	14,7	220,0	4,3	14,4	34,3	27,04	27,34	2,70	0,92	170,8	39,10	39,50	1,22	10,00	20,00	170,8	1024,0	10,00	7,3	39,87	38,60	0,968		
5954	114,6	209	5 348	10,6	0,805	210	5 430	0,970	207,5	14,8	220,0	4,3	14,4	34,3	27,04	27,34	2,70	0,92	171,1	39,10	39,50	1,22	10,00	20,00	171,1	1025,5	10,00	7,3	39,87	38,60	0,968		
5948	114,6	209	5 591	10,8	0,826	210	5 676	0,950	207,1	15,5	220,0	4,3	15,1	34,3	27,04	27,34	2,70	0,92	171,8	39,10	39,50	1,22	10,00	20,00	171,8	1030,0	10,00	7,6	40,12	38,76	0,966		
5947	114,6	209	5 660	11,0	0,824	210	5 746	0,940	207,0	15,7	220,0	4,3	15,3	34,3	27,04	27,34	2,70	0,92	172,0	39,10	39,50	1,22	10,00	20,00	172,0	1031,5	10,00	7,7	40,19	38,80	0,965		
6300	114,6	215	5 712	11,0	0,807	216	5 799	0,970	207,6	15,8	220,0	4,3	15,0	34,3	27,04	27,34	2,70	0,92	170,3	39,10	39,50	1,22	10,00	20,00	170,3	1027,0	10,00	7,6	40,24	38,95	0,968		
6500	114,6	220	5 907	11,1	0,806	221	5 997	0,960	212,0	16,0	220,0	4,3	15,3	34,3	27,04	27,34	2,70	0,92	170,3	39,10	39,50	1,22	10,00	20,00	170,3	1021,0	10,00	7,7	40,44	39,14	0,968		
6487	114,6	220	5 939	11,2	0,803	221	6 029	0,965	211,8	16,1	220,0	4,3	15,4	34,3	27,04	27,34	2,70	0,92	170,5	39,10	39,50	1,22	10,00	20,00	170,5	1022,5	10,00	7,8	40,47	39,16	0,968		
6474	114,6	220	5 986	11,2	0,807	221	6 077	0,970	211,5	16,3	220,0	4,3	15,6	34,3	27,04	27,34	2,70	0,92	170,8	39,10	39,50	1,22	10,00	20,00	170,8	1024,0	10,00	7,8	40,52	39,19	0,967		
6474	114,6	220	6 046	11,3	0,811	221	6 139	0,970	211,7	16,4	220,0	4,3	15,7	34,3	27,04	27,34	2,70	0,92	171,1	39,10	39,50	1,22	10,00	20,00	171,1	1025,5	10,00	7,9	40,58	39,24	0,967		
6448	114,6	220	6 109	11,5	0,805	221	6 202	0,948	211,3	16,6	220,0	4,3	15,9	34,3	27,04	27,34	2,70	0,92	171,6	39,10	39,50	1,22	10,00	20,00	171,6	1028,5	10,00	8,0	40,65	39,28	0,966		
6419	114,6	220	6 210	11,7	0,808	221	6 305	0,946	211,0	16,9	220,0	4,3	16,3	34,3	27,04	27,34	2,70	0,92	172,0	39,10	39,50	1,22	10,00	20,00	172,0	1031,5	10,00	8,2	40,75	39,35	0,966		
6400	114,6	220	6 254	11,7	0,807	221	6 350	0,960	211,0	17,0	220,0	4,3	16,4	34,3	27,04	27,34	2,70	0,92	172,3	39,10	39,50	1,22	10,00	20,00	172,3	1033,0	10,00	8,3	40,80	39,38	0,965		
6600	114,6	225	6 284	11,8	0,789	227	6 379	0,970	211,0	17,1	220,0	4,3	16,7	34,3	27,04	27,34	2,70	0,92	170,3	39,10	39,50	1,22	10,00	20,00	170,3	1027,0	10,00	8,4	40,82	39,59	0,970		
6800	114,6	231	6 437	11,8	0,787	233	6 535	0,960	214,9	17,2	220,0	4,3	17,8	34,3	27,04	27,34	2,70	0,92	170,5	39,10	39,50	1,22	10,00	20,00	170,5	1021,0	10,00	9,0	40,98	40,02	0,977		

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
6780	114,6	231	6 471	11,9	0,788	233	6 569	0,965	214,8	17,3	220,0	4,3	18,0	34,3	27,04	27,34	2,70	0,92	170,8	39,10	39,50	1,22	10,00	20,00	170,8	1022,5	10,00	9,0	41,01	40,05	0,976
6760	114,6	231	6 505	11,9	0,789	233	6 604	0,955	214,7	17,4	220,0	4,3	18,1	34,3	27,04	27,34	2,70	0,92	171,1	39,10	39,50	1,22	10,00	20,00	171,1	1024,0	10,00	9,1	41,05	40,07	0,976
6760	114,6	231	6 498	11,9	0,790	233	6 597	0,970	214,4	17,4	220,0	4,3	18,1	34,3	27,04	27,34	2,70	0,92	171,3	39,10	39,50	1,22	10,00	20,00	171,3	1025,5	10,00	9,1	41,04	40,07	0,976
6750	114,6	231	6 531	11,9	0,792	233	6 631	0,960	214,3	17,5	220,0	4,3	18,2	34,3	27,04	27,34	2,70	0,92	171,6	39,10	39,50	1,22	10,00	20,00	171,6	1027,0	10,00	9,2	41,08	40,10	0,976
6740	114,6	231	6 546	12,0	0,787	233	6 646	0,968	214,2	17,6	220,0	4,3	18,3	34,3	27,04	27,34	2,70	0,92	171,8	39,10	39,50	1,22	10,00	20,00	171,8	1028,5	10,00	9,2	41,09	40,11	0,976
6730	114,6	231	6 561	12,1	0,782	233	6 661	0,950	214,1	17,6	220,0	4,3	18,4	34,3	27,04	27,34	2,70	0,92	172,0	39,10	39,50	1,22	10,00	20,00	172,0	1030,0	10,00	9,2	41,11	40,12	0,976
6720	114,6	231	6 594	12,1	0,786	233	6 695	0,945	213,9	17,7	220,0	4,3	18,5	34,3	27,04	27,34	2,70	0,92	172,3	39,10	39,50	1,22	10,00	20,00	172,3	1031,5	10,00	9,3	41,14	40,14	0,976
6700	114,6	231	6 609	12,2	0,782	233	6 710	0,960	213,8	17,8	220,0	4,3	18,6	34,3	27,04	27,34	2,70	0,92	172,3	39,10	39,50	1,22	10,00	20,00	172,3	1033,0	10,00	9,4	41,16	40,16	0,976
6060	118,0	209	5 542	11,0	0,804	210	5 627	0,965	208,0	15,3	220,0	4,3	14,7	34,3	27,04	27,34	2,70	0,92	171,3	39,10	39,50	1,22	10,00	20,00	171,3	1027,0	10,00	7,4	40,07	38,72	0,966
6400	118,0	215	5 756	11,1	0,806	216	5 843	0,970	210,5	15,7	220,0	4,3	14,9	34,3	27,04	27,34	2,70	0,92	171,3	39,10	39,50	1,22	10,00	20,00	171,3	1021,0	10,00	7,5	40,29	38,98	0,968
6700	118,0	220	5 876	11,0	0,809	221	5 965	0,960	214,9	15,7	220,0	4,3	14,8	34,3	27,04	27,34	2,70	0,92	171,3	39,10	39,50	1,22	10,00	20,00	171,3	1022,5	10,00	7,4	40,41	39,12	0,968
6800	118,0	225	6 357	11,8	0,798	227	6 454	0,968	216,0	16,9	220,0	4,3	16,4	34,3	27,04	27,34	2,70	0,92	171,3	39,10	39,50	1,22	10,00	20,00	171,3	1024,0	10,00	8,3	40,90	39,64	0,969
6950	118,0	231	6 600	11,9	0,800	233	6 701	0,960	217,8	17,4	220,0	4,3	17,9	34,3	27,04	27,34	2,70	0,92	171,3	39,10	39,50	1,22	10,00	20,00	171,3	1025,5	10,00	9,0	41,15	40,15	0,976
5700	111,0	209	5 063	10,0	0,807	210	5 140	0,965	204,0	14,3	220,0	4,3	14,3	34,3	27,04	27,34	2,70	0,92	171,1	39,10	39,50	1,22	10,00	20,00	171,1	1028,5	10,00	7,2	39,58	38,41	0,970
6090	111,0	215	5 518	10,6	0,809	216	5 602	0,970	204,4	15,5	220,0	4,3	15,0	34,3	27,04	27,34	2,70	0,92	171,1	39,10	39,50	1,22	10,00	20,00	171,1	1030,0	10,00	7,6	40,05	38,82	0,969
6300	111,0	220	5 717	10,7	0,813	221	5 804	0,960	209,1	15,7	220,0	4,3	15,3	34,3	27,04	27,34	2,70	0,92	171,1	39,10	39,50	1,22	10,00	20,00	171,1	1031,5	10,00	7,7	40,25	39,01	0,969
6400	111,0	225	5 849	10,7	0,810	227	5 938	0,968	208,6	16,1	220,0	4,3	16,1	34,3	27,04	27,34	2,70	0,92	171,1	39,10	39,50	1,22	10,00	20,00	171,1	1033	10,00	8,1	40,38	39,28	0,973
6590	111,0	231	6 026	10,8	0,809	233	6 118	0,960	209,7	16,5	220,0	4,3	17,2	34,3	27,04	27,34	2,70	0,92	171,1	39,10	39,50	1,22	10,00	20,00	171,1	1033,	10,00	8,7	40,56	39,71	0,979
Классический привод																															
6600	50,0	220	4641	8,4	0,837	220	4 641	0,84	211,5	12,6	220,0	4,3	12,7	36,3	27,04	27,34	2,70		170,8	39,10	39,50		10,00	20,00	170,8	1024	10,00	6,0	41,38	39,17	0,947

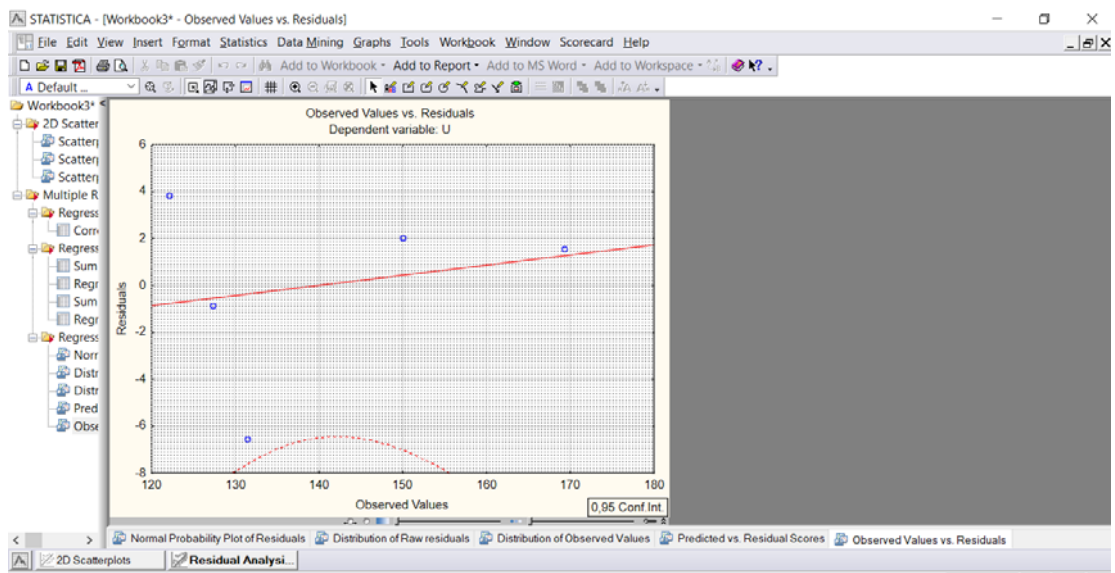
Приложение Д. Фрагмент использования программного комплекса «Statistica» для определения расхождения результатов вычислительного эксперимента и эксперимента на натурном образце.







X



Приложение Е. Зависимости момента БЭСМ от плотности продукта сепарирования

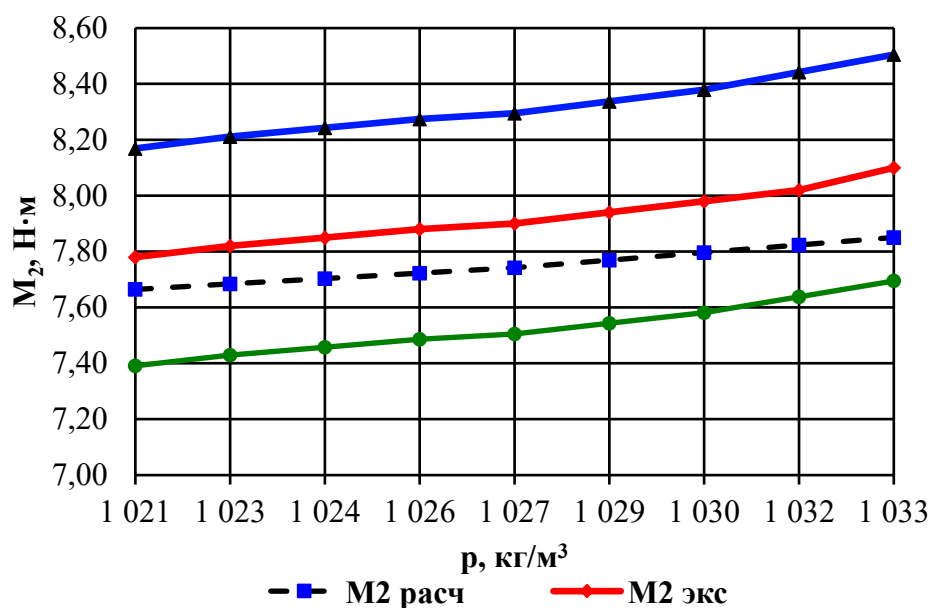


Рисунок 3.26 – Зависимости момента БЭСМ от плотности продукта сепарирования (момента сопротивления) при величине действующего значения напряжения сети $U=220$ В, частоте сети $f=114,6$ Гц, полученные в ходе вычислительного эксперимента и эксперимента на натурном образце

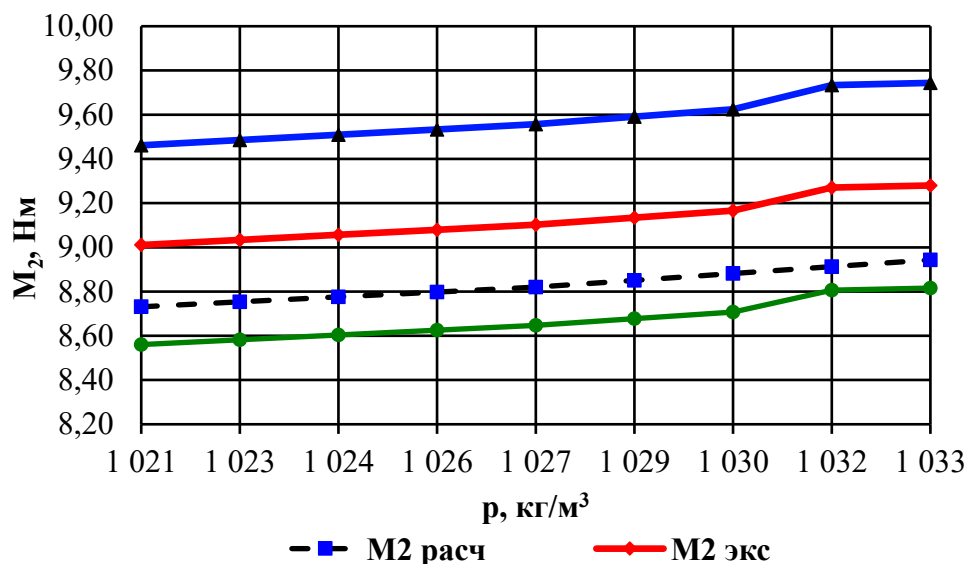


Рисунок 3.27 - Зависимости момента БЭСМ от плотности продукта сепарирования (момента сопротивления) при величине действующего значения напряжения сети $U=231$ В, частоте сети $f=114,6$ Гц, полученные в ходе вычислительного эксперимента и эксперимента на натурном образце

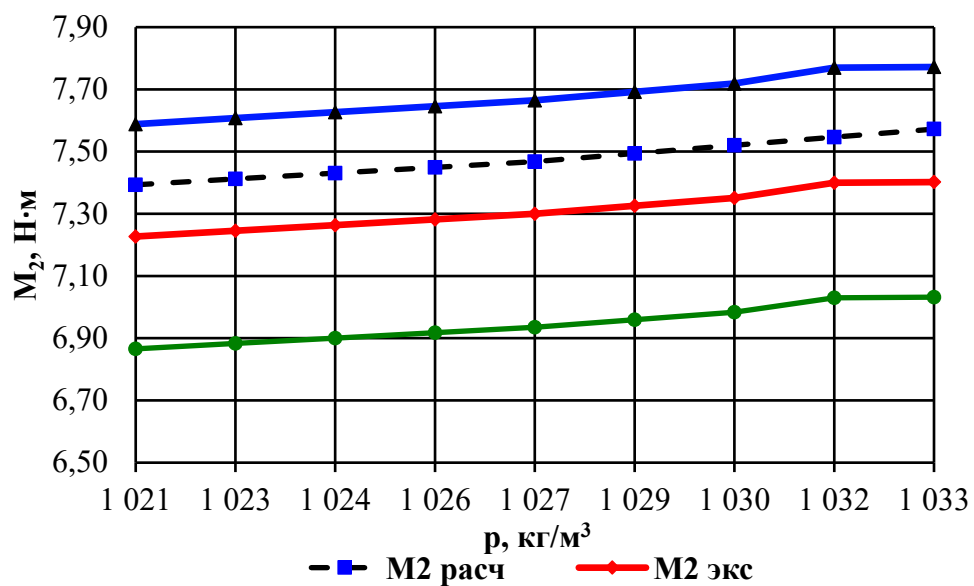


Рисунок 3.28 – Зависимости момента БЭСМ от плотности продукта сепарирования (момента сопротивления) при величине действующего значения напряжения сети $U=209$ В, частоте сети $f=114,6$ Гц, полученные в ходе вычислительного эксперимента и эксперимента на натурном образце

Приложение Ж. Документы подтверждающие результаты внедрения.

Приложение Ж.1



УТВЕРЖДАЮ

Глава КФХ «Алекс»

Н.А.Сотникова.

«30» июня 2023 г.

АКТ
производственных испытаний
опытного образца электропривода
на базе двигателя сепаратора совмещенной конструкции

Настоящий акт составлен комиссией в составе Председателя комиссии: директора КФХ «Алекс» Сотникова Александра Николаевича, членов комиссии: доцента кафедры электротехники и электрических машин ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет» (ФГЮОУ ВО «КубГТУ») канд. техн. наук Белова Антона Алексеевича, главного инженера КФХ «Алекс» Терехова Олега Николаевича.

15 июня 2023 г. в КФХ «Алекс», расположенном по адресу: РФ 350020, Краснодарский край, ст. Новопокровская, ул. Московская, 34, произведены производственные испытания опытного образца электропривода на основе двигателя сепаратора совмещенной конструкции (патент РФ на изобретение № 27776987, авторы Кашин Я.М., Копелевич Л.Е., Самородов А.В., Ким В.А., Голованов А.А.), разработанного и изготовленного в соответствии с договорами на выполнение научно-исследовательской работы № 2.45.05.04-19 от 25.10.2019 г. «Обоснование и разработка двигателя-сепаратора совмещенной конструкции для очистки технологических жидкостей с частотно-управляемым электроприводом», и 2.45.05.05-23 от 17.04.2023 г. «Разработка безредукторного электропривода сепаратора молока», заключенными между КФХ «Алекс» и ФГБОУ ВО «КубГТУ» (научный руководитель х/д НИР к.т.н., доц. Кашин Я.М., исполнители: к.т.н., доц. Копелевич Л.Е., к.т.н., доц. Самородов А.В., Ким В.А., Голованов А.А.).

Двигатель для электропривода сепаратора содержит корпус, статор и ротор из электропроводящего, немагнитного материала, выполненный в виде барабана сепаратора. Статор содержит цилиндрический магнитопровод, в пазы которого уложена обмотка, в лобовых частях которой размещены трубки для охлаждения статора и подогрева сепарируемого продукта, замоноличенные компаундом, а ротор жестко закреплен на оси, установленной в подшипниковых опорах, с возможностью вращения. С внутренней стороны барабана сепаратора, в нижней его части параллельно оси его вращения на равном расстоянии друг от друга установлены токопроводящие ферромагнитные стержни, соединённые сверху и снизу токопро-

водящими короткозамыкающими ферромагнитными кольцами, образующие короткозамкнутый ротор.

В ходе испытаний экспериментально подтверждена работоспособность электропривода на основе двигателя сепаратора совмещенной конструкции, его высокий пусковой момент, присущий двигателям с массивным ротором, высокий КПД и $\cos \varphi$.

В ходе испытаний построены рабочие и регулировочные характеристики электропривода на базе разработанного двигателя сепаратора совмещенной конструкции, определено соответствие характеристик разработанного и изготовленного электропривода при проведении производственных испытаний, соответствующим характеристикам, полученным расчетным путем. Оценены энергетические показатели разработанного электропривода при различных режимах его работы.

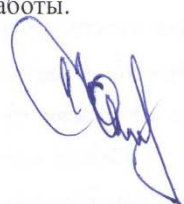
Выводы:

1. Испытания показали полную работоспособность, хорошие технико-экономические и эксплуатационные характеристики электропривода на основе двигателя сепаратора совмещенной конструкции, а также их соответствие в допустимых пределах характеристикам, полученным расчетным путем и посредством математического моделирования.

2. Полученные регулировочные и рабочие характеристики электропривода на основе двигателя сепаратора совмещенной конструкции дают возможность учитывать влияние его параметров (активные сопротивления обмоток) и внешних факторов (плотность сырья на входе в сепаратор), на выходные параметры этого электропривода (скорость вращения и момент).

3. Полученные рабочие характеристики позволяют оценивать энергетические показатели электропривода на основе двигателя сепаратора совмещенной конструкции при различных режимах его работы.

Председатель комиссии:
Директор КФХ «Алекс»



А.Н. Сотников

Члены комиссии:

Доцент кафедры электротехники и электрических машин
ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет»
канд. техн. наук

Главный инженер КФХ «Алекс»



А.А. Белов

О.Н. Терехов

Приложение Ж.2



УТВЕРЖДАЮ

Глава КФХ «Алекс»

Н.А.Сотникова.

«50» июня 2023 г.

АКТ

**внедрения результатов диссертационной работы
Голованова А.А. (научный руководитель к.т.н., доц. Кашин Я.М.)
по разработке электропривода на основе двигателя
сепаратора совмещенной конструкции**

На предприятии КФХ «Алекс» под руководством к.т.н., доц. Кашина Я.М. при непосредственном участии Голованова А.А. в рамках договоров на выполнение научно-исследовательской работы № 2.45.05.04-19 от 25.10.2019 г. «Обоснование и разработка двигателя-сепаратора совмещенной конструкции для очистки технологических жидкостей с частотно-управляемым электроприводом» и № 2.45.05.05-23 от 17.04.2023 г. «Разработка безредукторного электропривода сепаратора молока», заключенных между КФХ «Алекс» и ФГБОУ ВО «КубГТУ» испытан электропривод на основе двигателя сепаратора совмещенной конструкции (патент РФ на изобретение № 27776987, авторы Кашин Я.М., Копелевич Л.Е., Самородов А.В., Ким В.А., Голованов А.А.).

Рассчитанный Головановым А.А. опытный образец электропривода на основе двигателя сепаратора совмещенной конструкции при испытании показал полную работоспособность, хорошие технико-экономические и эксплуатационные характеристики. Полученные регулировочные характеристики электропривода позволяют разработать алгоритмы регулирования частоты вращения ротора барабана сепаратора молока.

Теоретические разработки и практические рекомендации диссертационного исследования Голованова А.А. представляют практический интерес и были использованы нашим предприятием для формирования заказа на изготовление сепараторов молока для нужд КФХ «Алекс» с рассчитанным Головановым А.А. электроприводом.

Главный инженер КФХ «Алекс»

О.Н.Терехов

Приложение Ж.3

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
КУБАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ



ИНСТИТУТ НЕФТИ, ГАЗА И ЭНЕРГЕТИКИ

350058 г. Краснодар, ул. Старокубанская, 88/4
Тел./факс 8 (861) 233-18-45

www.kubstu.ru, E-mail: gogilaev@kubstu.ru



14.04.2025. № 04-3102/06
на № _____ от _____



СВЕРЖДАЮ
Директор института нефти, газа и
энергетики ФГБОУ ВО «КубГТУ»
к.т.н., проф.
Г.Г.Гиляев.
14 апреля 2025 г.

А К Т

о реализации в учебном процессе кафедры электротехники и электрических машин Института нефти, газа и энергетики ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет» результатов диссертационной работы соискателя Голованова Александра Александровича на тему «Параметры и режимы работы безредукторного электропривода сепаратора молока»

Комиссия в составе председателя заместителя директора Института нефти, газа и энергетики по учебно-методической работе канд. техн. наук, доц. Квона А.М. и членов: канд. техн. наук, доц. Копелевича Л.Е., канд. техн. наук, доц. Самородова А.В., канд. физ.-мат. наук Климентьева С.В. установила, что на кафедре электротехники и электрических машин Института нефти, газа и энергетики ФГБОУ ВО «КубГТУ» реализованы:

1) разработанная Головановым А.А. конструкция двигателя сепаратора совмещенной конструкции для безредукторного электропривода сепаратора молока (патент РФ № 2776987, опубл. 29.07.2022. Бюл № 22) использована при разработке лекции «Пуск и регулирование частоты вращения асинхронного двигателя. Специальные типы асинхронной машины» по дисциплине «Электрические машины» для студентов направления 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника».

2) предложенная Головановым А.А. модернизированная математической модели безредукторного электропривода сепаратора молока, включающего в себя массивную и короткозамкнутую части ротора-барабана, позволяющая оценить процессы теплообмена между статором, ротором и сепарируемой жидкостью использована при разработке лекции «Методы математического моделирования» по дисциплине «Электрические машины» для студентов направления 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника».

3) разработанный Головановым А.А. экспериментальный образец безредукторного электропривода сепаратора молока и стенд для его исследования использованы при выполнении лабораторных работ и при дипломном проектировании студентами направления 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника».

Председатель комиссии:

канд. техн. наук, доц.

Члены комиссии:

канд. техн. наук, доц.

канд. техн. наук, доц.

канд. физ.-мат. наук

А.М.Квон

Л.Е.Копелевич

А.В.Самородов

С.В.Климентьев

Приложение 3. Патенты и авторские свидетельства

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



(19) **RU** (11) **2 776 987**⁽¹³⁾ **C1**

(51) МПК
B04B 9/04 (2006.01)
H02K 1/22 (2006.01)
H02K 17/12 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
B04B 9/04 (2022.02); H02K 1/22 (2022.02); H02K 17/12 (2022.02)

(21)(22) Заявка: 2021115713, 31.05.2021
(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
31.05.2021
Дата регистрации:
29.07.2022

Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: 31.05.2021
(45) Опубликовано: 29.07.2022 Бюл. № 22

Адрес для переписки:
350072, г. Краснодар, ул. Московская, 2,
ФГБОУ ВО "КубГТУ", отдел
интеллектуальной собственности, начальнику
ОИС Тихомировой Н.А.

(72) Автор(ы):
Кашин Яков Михайлович (RU),
Копелевич Лев Ефимович (RU),
Самородов Александр Валерьевич (RU),
Ким Владислав Анатольевич (RU),
Голованов Александр Александрович (RU)

(73) Патентообладатель(и):
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования "Кубанский государственный
технологический университет" (ФГБОУ ВО
"КубГТУ") (RU),
Федеральное государственное казенное
военное образовательное учреждение
высшего образования "Краснодарское
высшее военное авиационное училище
летчиков имени Героя Советского Союза
А.К. Серова" (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: RU 2593626 C1, 10.08.2016. SU
1106538 A1, 07.08.1984. SU 1427501 A1,
30.09.1988. SU 1321471 A1, 07.07.1987. JP
2006167677 A, 29.06.2006.

(54) Двигатель сепаратора совмещенной конструкции

(57) Реферат:

Изобретение относится к электротехнике и может быть использовано в качестве привода барабанов сепараторов. Технический результат - уменьшение диапазона изменения скорости вращения ротора-барабана двигателя сепаратора при изменении момента его нагрузки при одновременном сохранении высокого пускового момента, увеличение КПД и $\cos\phi_1$ двигателя сепаратора. Двигатель сепаратора совмещенной конструкции содержит корпус, статор и ротор из электропроводящего, немагнитного материала, выполненный в виде барабана сепаратора. Статор содержит цилиндрический магнитопровод,

в пазы которого уложена обмотка, в лобовых частях которой размещены трубки для охлаждения статора и подогрева сепарируемого продукта, замкнутые компаундом. Особенность изобретения заключается в том, что с внутренней стороны барабана сепаратора, в нижней его части параллельно оси его вращения на равном расстоянии друг от друга установлены токопроводящие ферромагнитные стержни, соединенные токопроводящими короткозамыкающими ферромагнитными кольцами, образующие короткозамкнутый ротор. Количество токопроводящих ферромагнитных