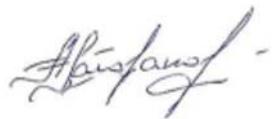


На правах рукописи



Голованов Александр Александрович

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

Специальность 4.3.2. Электротехнологии, электрооборудование
и энергоснабжение агропромышленного комплекса

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Краснодар – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Кубанский государственный технологический университет» (ФГБОУ ВО «КубГТУ»)

Научный
руководитель

Кашин Яков Михайлович кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет», кафедра электротехники и электрических машин, заведующий

Официальные
оппоненты:

Краснов Иван Николаевич доктор технических наук, профессор, Азово-Черноморский инженерный институт- филиал ФГБОУ ВО «Донской государственный аграрный университет» в г. Зернограде, кафедра «Технологии и средства механизации агропромышленного комплекса», профессор

Баракин Николай Сергеевич кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина», кафедра «Электрических машин и электропривода», доцент

Ведущая
организация:

ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова» (г. Новочеркасск)

Защита состоится «26» февраля 2026 года в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета 35.2.019.03 при ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ по адресу: 350044, г. Краснодар, ул. Калинина, 13 (корпус факультета энергетики, 1 этаж, ауд. 110).

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке университета и на сайтах: ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ – <http://kubsau.ru/> и ВАК – <https://vak.gisnauka.ru/>.

Автореферат разослан «___» 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент
Самурганов Евгений Ерманекосович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Сельское хозяйство в Российской Федерации, не смотря на санкционное давление, активно развивается. Рас- тущая экономика сельского хозяйства требует увеличения перераба- тывающих мощностей. Техническое переоснащение предприятий, которые перерабатывают сельскохозяйственное сырье в готовую продукцию, является вопросом продовольственной безопасности страны.

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

Сегодня только в Краснодарском крае работают 15 крупных мо- лочных 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-сливкоотде- лителях.

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

В молочной промышленности одним из наиболее энергозатрат- ных процессов является сепарация молока. Сепараторы потребляют достаточно много энергии на единицу продукции ($0,58 - 1,76 \text{ кВтч/}(\text{м}^3/\text{ч})$), что не только увеличивает себестоимость конеч- ного продукта, но также усугубляет проблемы с электрическими рас- пределительными сетями, описанные ранее. Вопросы энергоэфек- тивности важны для предприятий АПК по причине опережающего роста производства сельскохозяйственной продукции по отношению к возможностям электроснабжения сельского хозяйства.

Таким образом, совершенствование конструкций молочных се- параторов в части энергоэффективности, улучшения массогабарит- ных характеристик является актуальной научно-технической зада- чей.

Тема диссертации связана с планом научной работы ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет»: государственная 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: Б.Х. Гайтов, С.В. Пахомов, 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. 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 мас-согабаритных показателей.

Задачи исследований.

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.

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

Объект исследования: безредукторный электропривод сепаратора молока.

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

Научная новизна работы.

1. Математическая модель безредукторного электропривода сепаратора молока, отличающаяся тем, что в ней 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.

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 исследований. 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 университет» (акт об использовании в учебном процессе результатов научно-исследовательской работы от 14.04.2025 г.).

Степень достоверности и апробация работы. Достоверность результатов исследования подтверждается: компьютерным моделированием в ПО MATLAB с планированием и обработкой экспериментальных данных с помощью ПО STATISTICA, использованием современной измерительной техники. Материалы докторской 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., 2022.11.2024 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 «HI-TECH» (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.).

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликовано 13 научных работ, в том числе 1 патент на изобретение и 12 статей, в том числе 4 статьи в журналах, рекомендованных ВАК.

Объём и структура работы. Диссертация содержит введение, 4 главы, заключение, список литературы, приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении раскрыта актуальность исследований, приведены цель работы, научная новизна, практическая значимость и представлены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен проведенный анализ состояния молочно-животноводческих предприятий на основе статистических данных Интернет-портала Агровестник, информационного агентства Milknews и т.д., который показал, что 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 молока, при этом остро встает вопрос об энергоэффективности технологических процессов.

Сформулирована цель работы и задачи исследований.

Во второй главе представлены теоретические исследования и математическое моделирование безредукторного электропривода сепаратора молока БЭСМ и разработанная на основании этих исследований его конструкция, обеспечивающая повышение энергоэффективности сепараторной установки и улучшение ее массогабаритных показателей.

Для передач части тепловых потерь от электрической машины молоку с целью повышения энергоэффективности сепараторной установки разработана технологическая схема сепарирования молока на базе БЭСМ (рис. 1), которая отличается от ранее существующих тем, что сепарируемая жидкость (молоко) в соответствии с этой схемой первоначально подается насосом в трубки насосом потребляя мощность P_{1fp} , опоясывающие обмотку и магнитопровод статора электродвигателя, затем подается во внешний подогреватель определенной мощности P_{1h} , и после этого сепарируемая жидкость подается в ротор-барабан. Протекая по трубкам, опоясывающие обмотку и

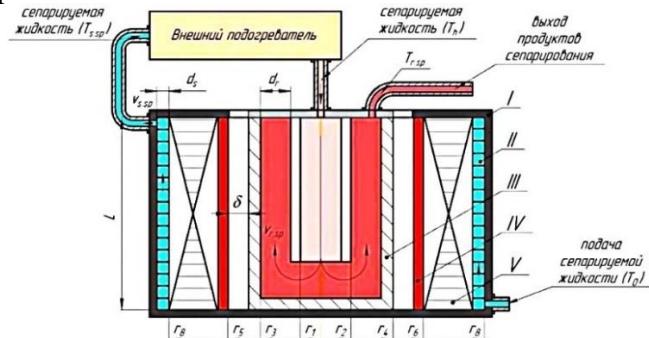
магнитопровод статора электродвигателя, сепарируемая жидкость нагревается за счет тепловых потерь в обмотке и магнитопроводе статора ΔP_{ct} , одновременно охлаждая элементы обмотки и магнитопровода статора, тем самым повышая удельную мощность машины.



Рисунок 1 – Технологическая схема сепарирования молока на базе БЭСМ

У исследуемого БЭСМ гладкий массивный ротор является рабочим органом, в каналах которого протекает продукт, являющийся одновременно хладоагентом. Лобовые части обмотки статора IV и наружная часть сердечника статора V обвиты трубопроводом II, по которому протекает сепарируемый продукт (хладоагент). Тепло потеря массивного ротора III используется для дополнительного подогрева молока в барабане сепаратора. На рис. 2 стрелками схематично показано движение хладоагента жидкости с напором G по маршруту статор-ротор. При этом сечение проводников статорной обмотки можно уменьшить, что позволит улучшить массогабаритные показатели. Двигатель будет работать в режиме перегрузки, КПД уменьшиться, но повышенные потери будут использованы для большего нагрева молока, а двигатель охлаждается до допустимой температуры, определенной классом нагревостойкости (рис. 2). 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, что также

позволит снизить затраты энергии для подогрева жидкости во внешнем подогревателе.



I – корпус сепаратора с теплоизоляционным слоем, II – трубы, 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 – Разрез фрагмента БЭСМ как базовая модель для исследования тепловых процессов

Математическая модель БЭСМ разработана на основе теории обобщённого электромеханического преобразователя энергии и составлена в трехфазной системе координат α, β, γ . (рис. 3) в виде дифференциальных уравнений. Разработанная математическая модель БЭСМ для расчета электромагнитных, электромеханических, тепловых характеристик БЭСМ разбита на несколько подсистем.

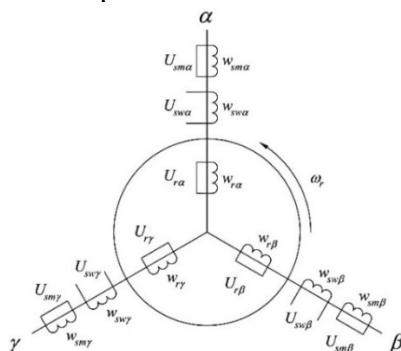


Рисунок 3 – Схема пространственной модели обобщённого электромеханического преобразователя энергии с двумя обмотками на статоре и одной на роторе по осям α, β, γ в заторможенной системе координат

Для возможности при математическом моделирования 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:

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

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_{sis} и изменения магнитного потокосцепления. Уравнения напряжений статора в осях α , β , γ выглядят следующим образом:

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

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, 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.

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

где $i_{r\alpha}(t)$, $i_{r\beta}(t)$, $i_{r\gamma}(t)$ – фазные токи в функции времени, протекающие в цепях обмотки роторе; R_r – активное сопротивление массивного ротора; L_r – индуктивность массивного ротора; $\omega_r(t)$ – угловая скорость ротора, M – взаимная индуктивность статорных и роторных обмоток.

Система уравнений в осях α , β , γ , описывающих электромагнитные процессы, протекающие в магнитопроводе статора, составляются аналогично системе уравнений 2 и выглядит следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} 0 &= R_{sm} i_{sm\alpha}(t) + L_{sm} \frac{di_{sm\alpha}(t)}{dt} + M \frac{di_{sw\alpha}(t)}{dt} + M \frac{di_{r\alpha}(t)}{dt} - \\ &\quad - \frac{M}{2} \frac{d}{dt} [i_{sm\beta}(t) + i_{sm\gamma}(t) + i_{sw\beta}(t) + i_{sw\gamma}(t) + i_{r\beta}(t) + i_{r\gamma}(t)] \\ 0 &= R_{sm} i_{sm\beta}(t) + L_{sm} \frac{di_{sm\beta}(t)}{dt} + M \frac{di_{sw\beta}(t)}{dt} + M \frac{di_{r\beta}(t)}{dt} - \\ &\quad - \frac{M}{2} \frac{d}{dt} [i_{sm\gamma}(t) + i_{sm\alpha}(t) + i_{sw\gamma}(t) + i_{sw\alpha}(t) + i_{r\gamma}(t) + i_{r\alpha}(t)] \\ 0 &= R_{sm} i_{sm\gamma}(t) + L_{sm} \frac{di_{sm\gamma}(t)}{dt} + M \frac{di_{sw\gamma}(t)}{dt} + M \frac{di_{r\gamma}(t)}{dt} - \\ &\quad - \frac{M}{2} \frac{d}{dt} [i_{sm\alpha}(t) + i_{sm\beta}(t) + i_{sw\alpha}(t) + i_{sw\beta}(t) + i_{r\alpha}(t) + i_{r\beta}(t)] \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

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

Электромагнитный момент $M_{\text{ЭМ}}(t)$ 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:

$$M_{\text{ЭМ}}(t) = \frac{p\sqrt{3}M}{2} \left[\begin{aligned} &(i_{sw\alpha}(t) + i_{sm\alpha}(t)) \cdot (i_{r\gamma}(t) - i_{r\beta}(t)) + \\ &+ (i_{sw\beta}(t) + i_{sm\beta}(t)) \cdot (i_{r\alpha}(t) - i_{r\gamma}(t)) + \\ &+ (i_{sw\gamma}(t) + i_{sm\gamma}(t)) \cdot (i_{r\alpha}(t) - i_{r\beta}(t)) \end{aligned} \right] \quad (5)$$

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

Протекающую через узлы БЭСМ сепарируемую жидкость условно разбили 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 (Δt) выглядит следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} c_s \cdot \rho_s \cdot \frac{\Delta T_s}{\Delta t} &= \frac{q_s}{V_s} \\ c_r \cdot \rho_r \cdot \frac{\Delta T_r}{\Delta t} &= \frac{q_r}{V_r} \cdot e^{r\sqrt{2\cdot\mu_R\cdot\gamma_R\cdot f_c\cdot s}} + \frac{q_s}{V_s} \cdot a_{s-r} \\ c_{sp} \cdot \rho_{sp} \cdot S_{s.sp} \cdot \left(\frac{\Delta T_{s.sp}}{\Delta t} + \omega_{s-sp} \cdot \frac{\Delta T_{s.sp}}{\Delta L} \right) &= a_{s-sp} \cdot \Pi_{s-sp} \cdot (T_s - T_{s.sp}) \\ c_{sp} \cdot \rho_{sp} \cdot S_{r.sp} \cdot \left(\frac{\Delta T_{r.sp}}{\Delta t} + \omega_{r-sp} \cdot \frac{\Delta T_{r.sp}}{\Delta L} \right) &= a_{r-sp} \cdot \Pi_{r-sp} \cdot (T_r - T_{r.sp}) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где c_s, c_r, c_{sp} – удельные теплоемкости статора, ротора, сепарируемой жидкости, соответственно; $\rho_s, \rho_r, \rho_{sp}$ – плотности материалов статора, ротора и 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, сепарируемой жидкости на выходе из ротора-барабана, соответственно, температуры определяются через время t , которое равно или больше постоянной времени теплового переходного процесса (принято $t_{уст}=1200$ с.); q_s, q_r – теплоизделие 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; 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; $\omega_{s-sp}, \omega_{r-sp}$ – 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.

Математическое описание БЭСМ, приведенное в уравнениях (1-6) решается алгоритмами программной среды MATLAB, которая позволяет рассчитать переходные процессы в БЭСМ, определить

функциональные зависимости между электромагнитными и энергетическими параметрами БЭСМ (рис. 4).

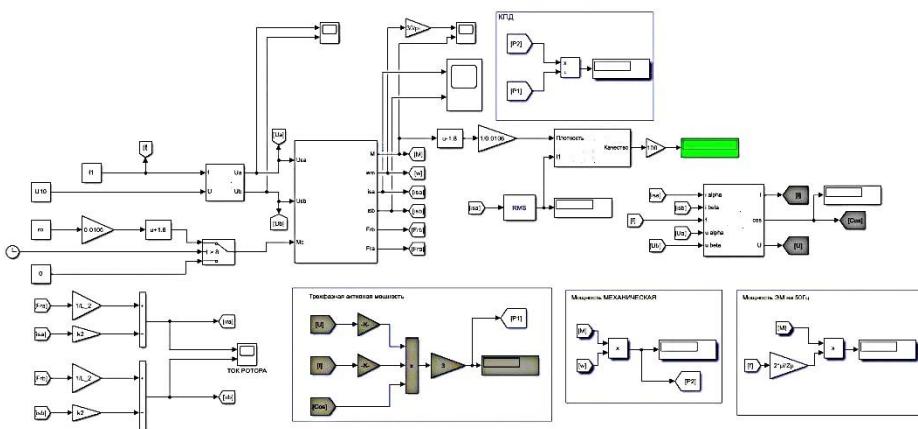


Рисунок 4 – Скриншот программы расчёта математической модели БЭСМ

В работе 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. Получены кривые (рис. 5), характеризующие переходный процесс и функциональную связь между факторами ($I_{\text{старт}}$, $p_{\text{бар}}$ и $M_{\text{эм}}$), определяющие этот процесс в БЭСМ с завышенным, уменьшенным и стандартным воздушным зазором, а также аналогичные характеристики при несинусоидальном питании.

Анализ результатов моделирования показывает, что токи в статоре и роторе изменяются с содержанием экспоненциальной составляющей, что объясняется протекающими в статоре и роторе переходными процессами. При уменьшении воздушного зазора между статором и ротором величина пускового и установившегося токов статора снижается до 5 % и до 10% соответственно, время переходного процесса уменьшается на 18%.

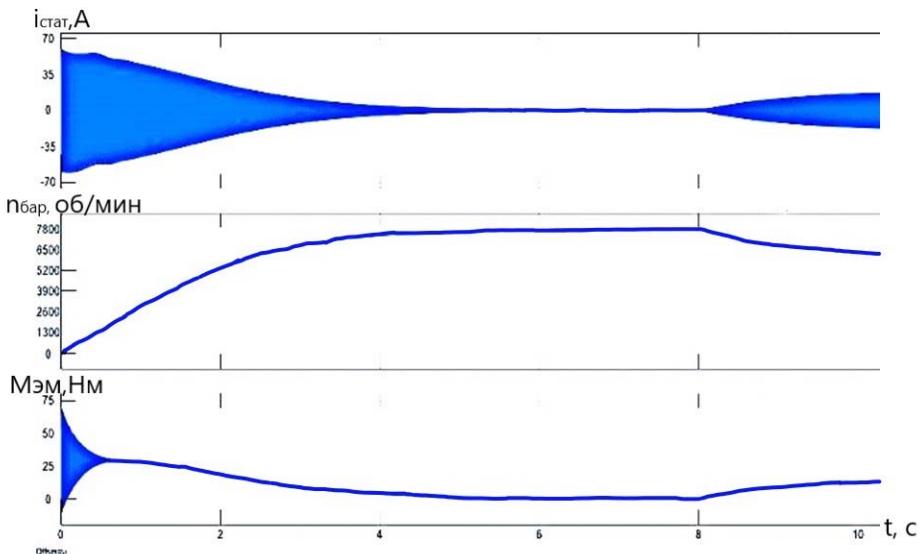


Рисунок 5 – Скриншот зависимостей $i_{\text{ст}}(t) = \phi(t)$; $n_{\text{бар}} = \phi(t)$; $M_{\text{эм}} = \phi(t)$ для БЭСМ при уменьшенном воздушном зазоре между статором и ротором при синусоидальной форме питающего напряжения (на рис. по осям абсцисс указано время (t), по осям ординат указаны ток статора ($i_{\text{ст}}$), , частота вращения ротора-барабана ($n_{\text{бар}}$), момент ($M_{\text{эм}}$))

Для определения эффективности применения исследуемого БЭСМ проведена сравнительная оценка энергетических характеристик (η , $\cos\varphi$) этого БЭСМ с энергетическими характеристиками электроприводов серийных сепараторов. КПД (η) БЭСМ определяется по формуле:

$$\eta = \frac{P_{2fp.sp} + P_{2sm} + P_{2h}}{P_{1fp} + P_{1sm}/\eta_{fc} + P_{1h}} \quad (6)$$

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 третьей главе представлены результаты проведенных экспериментальных исследований, состоящих из двух этапов: вычислительный эксперимент и исследование натурного образца (рис. 6, 7). Определены показатели планирования эксперимента объекта исследования. По результатам расчетов получены регулировочные характеристики зависимости I_1 , $\omega_{\text{бар}}$, T_1 , $T_{\text{ж}}$, $M_{\text{эм}}$, η и созр БЭСМ от входных параметров.



Рисунок 6 – Фото внешнего вида лабораторного стенда

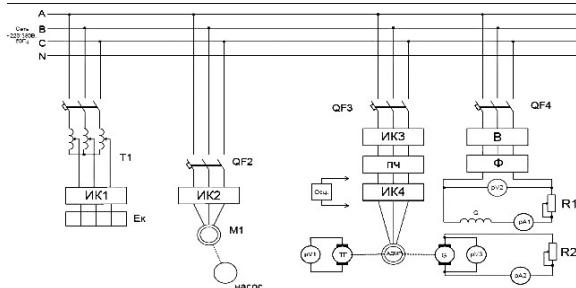
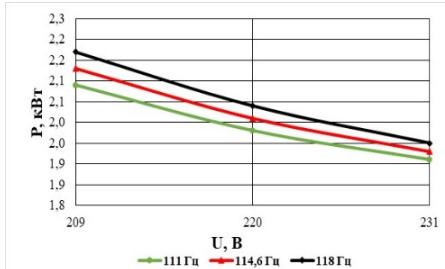


Рисунок 7 – Принципиальная электрическая схема лабораторного стенда

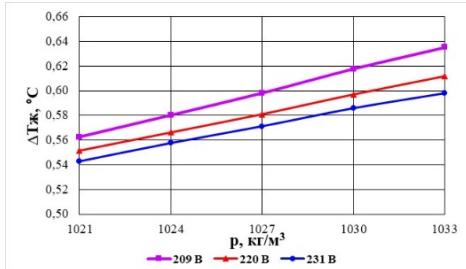
Результаты численного эксперимента позволяют определить и оценить влияние параметров сети (действующего значения напряжения сети, частоты напряжения сети) и плотности сепарируемой жидкости на частоту вращения ротора-барабана, момент БЭСМ, энергетические параметры БЭСМ.

Установлено, 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, падает, а с увеличением частоты питающего напряжения исследуемая температура падает, а мощность возрастает.

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 (рис. 8 а). Увеличение 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 %.



а) Характеристика изменения мощности, идущей на нагрев жидкости БЭСМ в зависимости от отклонения напряжения и частоты тока



б) Характеристика изменения температуры нагрева жидкости в статоре и роторе БЭСМ в зависимости от её плотности и отклонения напряжения

Рисунок 8 – Регулировочные характеристики БЭСМ

Увеличение плотности сепарируемой жидкости p (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 (рис. 8 б). Данное обстоятельство объясняется тем, что при определении КПД и $\cos\phi$ БЭСМ 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 на 0,7 %, $\cos\phi$ БЭСМ практически остается неизменным, а температура нагрева сепарируемой жидкости в статоре и барабане-роторе БЭСМ увеличивается на 6 %.

Определены (в сравнении) значения энергетических показателей (КПД и $\cos\phi$) сепараторной установки на базе БЭСМ и серийной сепараторной установки. Так, на базе двигателя мощностью 4 и 7,5 кВт КПД БЭСМ, определенный расчетным путем, составляет 0,962 и 0,983 соответственно, что на 1,46 % и 3,5 % выше, чем КПД серийной сепараторной установки (0,948).

Адекватность математической модели и результатов математического экспериментов оценивалось с применением программного комплекса «Statistica». Результаты тестирования показали, что значения точек графиков $n_2 = \varphi(U)$, $f_c = \text{var}$; $\cos\phi_1 = \varphi(U)$, $f_c = \text{var}$; $n_2 = \varphi(p)$,

$U = \text{var.}$; $M_h = \phi(\rho)$, $U = \text{var}$, $\Delta T = \phi(U)$ находятся в пределах допустимого интервала (отклонение 5%).

В четвертой главе приведены анализ годового энергопотребления сепараторных установок и расчет экономической эффективности применения БЭСМ при постановке на серийное производство. Экономический эффект получен за счет снижения мощности нагревателя молока и габарита электрической машины на одну ступень, так как повышенные потери будут использованы для подогрева молока. При производстве 100 шт. БЭСМ чистый дисконтированный доход за 3 года составил 11443 тыс. рублей. Срок окупаемости инвестиций проекта составил 2,83 года.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги выполненного исследования

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 параметров серийного сепаратора производительностью 3 т/ч, который является оптимальным для малых и средних фермерских хозяйств. Этой мощности соответствуют активное сопротивление ротора-барабана $R_{\text{rot}} = 195 - 205$ Ом для марки стали X13, 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. 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 материальноёмкости 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.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ

- в изданиях рекомендованных ВАК:

1. Кащин, Я. М. Разработка перспективного сепаратора совмещенной конструкции с двухслойным ротором-барабаном/ Я. М. Кащин, Л. Е. Копелевич, А. В. Самородов, А. А. Голованов [и др.] // Сельский механизатор. – 2025. – № 9. – С. 18-21. - DOI: 10.47336/0131-7393-2025-9-18-19-20-21.

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

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

4. Кашин, Я. М. 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 политехнический журнал "Научные труды КубГТУ". – 2023. – № 1. – С. 130-142.

- в прочих изданиях:

5. **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.

6. **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.

7. Мараховский, Е.А. Анализ существующих сепараторных установок молочной промышленности / Е.А. Мараховский, В.А. Ким, Я.А. Авраменко, **А. А. Голованов** // Технические и технологические системы: Матер. XV Международ. научн. конф., Краснодар, 20–22.11.2024 г. – Краснодар: ООО "Издательский Дом - Юг", 2024. – С. 30-32.

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

9. Кашин, Я. М. 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.

10. Кашин, Я. М. 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.

11. 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.

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

13. 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".

Подписано к печати 25.12.2025 г.
Бумага офсетная
Уч.-изд. л. 1
Тираж 100 экз.

Формат 60×84 1/16
Офсетная печать
Заказ № 17

Отпечатано в типографии ООО «Крон»
350051, г. Краснодар, ул. Дальняя, 39\3