

*На правах рукописи*



**БАКИРОВ Сергей Мударисович**

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ  
ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ДОЖДЕВАЛЬНЫХ МАШИН  
КРУГОВОГО ДЕЙСТВИЯ ОБОСНОВАНИЕМ СПОСОБОВ  
И СРЕДСТВ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ**

**Специальность**

**05.20.02 – Электротехнологии и электрооборудование  
в сельском хозяйстве**

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук**

Саратов – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Саратовский государственный аграрный университет им. Н.И. Вавилова»

**Научный консультант:** доктор технических наук, профессор  
**Ерошенко Геннадий Петрович**

доктор технических наук, доцент  
**Соловьев Дмитрий Александрович**

**Официальные оппоненты:** **Оськин Сергей Владимирович**, доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина» (г. Краснодар), заведующий кафедрой «Электрические машины и электропривод»

**Шерьязов Сакен Койшыбаевич**, доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный аграрный университет» (г. Троицк), профессор кафедры «Энергообеспечение и автоматизация технологических процессов»

**Линенко Андрей Владимирович**, доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВО «Башкирский государственный аграрный университет» (г. Уфа), профессор кафедры «Электрические машины и электрооборудование»

**Ведущая организация** – Азово-Черноморский инженерный институт – филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Донской государственный аграрный университет» (г. Зерноград).

Защита состоится «\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 года в \_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 220.061.03 на базе ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет им. Н.И. Вавилова» по адресу: 410056, г. Саратов, ул. Советская, 60, ауд. 325.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет им. Н.И. Вавилова» и на сайте: <http://www.sgau.ru/>

Отзывы на автореферат направлять по адресу: 410012, г. Саратов, Театральная пл., 1, ученому секретарю диссертационного совета Д 220.061.03, e-mail: [chekmarev.v@yandex.ru](mailto:chekmarev.v@yandex.ru)

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

**Ученый секретарь  
диссертационного совета**



**Василий Васильевич Чекмарев**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Орошаемое земледелие обеспечивает 2–6-кратное увеличение урожайности традиционных культур и возможность выращивания растений с повышенными требованиями к агрономическим условиям. Однако орошаемое земледелие связано с большим потреблением разнообразных ресурсов (трудовых, водных, энергетических). Особенно велико энергопотребление при орошении дождеванием.

Дождевальные машины (ДМ) имеют разнообразные технологические характеристики. При возделывании пахотных земель эффективность широкозахватных ДМ кругового действия относительно других средств орошения составляет 62 %, из которых на долю электрифицированных машин приходится 52 %.

Энергетическая эффективность полива культурных растений дождеванием пропорциональна размерам поливной площади и расстоянию, на которое необходимо транспортировать поливную воду. Анализ энергопотребления показал, что полив дождеванием условно можно разделить на водоподачу и водораспределение. На водоподачу от водоема до дождевальной машины энергопотребление имеет устойчивый характер развития и включено в тариф на 1 м<sup>3</sup> воды. Энергопотребление на водораспределение по охватываемой площади относится к эксплуатационным издержкам, которые существенно отличаются друг от друга в зависимости от варианта энергоснабжения дождевальных машин. В одинаковых природно-климатических зонах используют, например, до 40 вариантов энергоснабжения: электрическое централизованное и автономное энергоснабжение от дизельных, бензиновых и аккумуляторных установок генерации энергии, от гидравлических, электрических и механических приводов и т. п. Анализ показал, что энергопотребление по вариантам энергоснабжения различается в 1,5–4,2 раза.

Причиной завышенного потребления энергии ДМ является отсутствие практических рекомендаций и принципов выбора оптимального варианта энергоснабжения для конкретных условий эксплуатации дождевальной машины. В одинаковых условиях эксплуатируют ДМ с различными системами энергоснабжения. Для решения этих вопросов предлагают частные заключения по критерию минимума расхода воды или энергии. Такие подходы не обеспечивают существенного повышения энергетической эффективности. Таким образом, проблема поиска условий наименьшего потребления энергии дождевальными машинами является актуальной и недостаточно изученной.

Основанием для данной работы, являющейся продолжением комплекса работ по созданию, совершенствованию и эксплуатации электрифицированных дождевальных машин кругового действия, являются:

- государственная программа Российской Федерации «Развитие науки и технологий» на 2013–2020 годы (утв. 20 декабря 2012 г., № 2433-р);
- федеральная целевая программа «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» (утв. 21 мая 2013 г., № 426);

- государственная программа Саратовской области «Развитие сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия в Саратовской области на 2014–2020 годы», подпрограмма «Техническая и технологическая модернизация, научно-инновационное развитие на 2014–2020 годы» (утв. 2 октября 2013 г., № 520-П);

- приоритетное научное направление ФГБОУ ВО «Саратовский ГАУ им. Н.И. Вавилова» «Модернизация инженерно-технического обеспечения АПК» (рег. № 01201151795).

**Степень разработанности темы.** Разработка дождевальных машин включала в себя ряд этапов. На первых из них основное внимание было уделено обеспечению выполнения таких функций, как подведение и распределение воды на поливном участке. Затем стали разрабатывать темы по улучшению качества функционирования ДМ. В последнее время в исследованиях И.Г. Стрижкова, В.Н. Карпова, З.Ш. Юлдашева, В.Г. Сазыкина, В.И. Чарыкова, Д.А. Соловьева и др. на первый план были выдвинуты проблемы экономии энергетических ресурсов. Смежными вопросами энергосбережения и эксплуатации электроприводов занимались Г.П. Ерошенко, М.А. Таранов, С.В. Оськин, Н.П. Кондратьева, С.К. Шерьязов, В.Г. Петько, А.В. Линенко и др. Определены не только методические вопросы оценки уровня энергоэффективности, но и технические направления достижения этого уровня. Однако, несмотря на глубину разработки тем, задача повышения энергетической эффективности при эксплуатации дождевальных машин кругового действия остается актуальной. Противоречие состоит в том, что номенклатура выпускаемых ДМ и перечень предоставляемых производителем и определяющих свойства изделий технических характеристик позволяет потребителю выбирать и эксплуатировать энергооборудование и решать задачи искусственного орошения при возделывании зернобобовых, кормовых культур, однако улучшению энергоэффективности систем и достижению максимальной результативности использования ресурсов препятствует отсутствие обобщенной совокупности научно обоснованных критериев, позволяющей при сравнении и выборе оборудования в комплексе учесть географические, природно-климатические, технические, технологические, эксплуатационные требования, показатели, характеристики объектов и изделий и добиться повышения энергоэффективности при эксплуатации ДМ кругового действия.

**Цель работы** – снизить энергопотребление дождевальных машин кругового действия за счет обоснования выбора оптимальной системы энергоснабжения, совершенствования способов и средств энергосбережения.

**Задачи исследований:**

1. Выполнить анализ номенклатуры, характеристик и условий эксплуатации дождевальных машин кругового действия и определить подходы к улучшению показателей энергоэффективности для достижения энергосбережения в технологиях искусственного орошения.

2. Исследовать факторы, влияющие на энергопотребление полива дождевальными машинами кругового действия и синтезировать функционально-структурные модели их энергоснабжения.

3. Установить зависимость эффективности энергоснабжения дождевальной машины от условий эксплуатации, разработать обобщающий критерий и алгоритм определения оптимального энергоснабжения, а также обосновать границы, зоны и условия применения различных вариантов энергоснабжения.

4. Разработать способы и технические средства повышения энергетической эффективности электрифицированных дождевальных машин кругового действия.

5. Провести экспериментальные исследования рабочих процессов аккумуляторного источника питания и оценить влияние значимых факторов на продолжительность движения дождевальной машины, а также разработать и исследовать устройство динамической компенсации реактивной мощности электродвигателей с источником питания дождевальных машин на переменном токе.

6. Выполнить полевые испытания, производственную проверку полученных результатов исследования и оценить их экономическую эффективность.

**Объект исследования** – система энергоснабжения дождевальной машины кругового действия, включающая в себя источник энергии, приемник энергии и сети питания и управления.

**Предмет исследования** – закономерности изменения энергопотребления дождевальных машин кругового действия в различных условиях эксплуатации.

**Научную новизну** работы представляют:

- структурно-функциональные модели и составляющие эффективности системы электрического привода опорных тележек дождевальных машин;
- обобщающий критерий эффективности системы энергоснабжения, позволяющий сравнивать различные типы привода опорных тележек эксплуатируемых дождевальных машин с учетом технологических, технико-экономических, природно-климатических условий;
- теоретически обоснованная взаимосвязь условий эксплуатации с параметрами системы энергоснабжения дождевальных машин кругового действия;
- алгоритм и программа выбора оптимальной системы энергоснабжения дождевальных машин кругового действия для конкретных условий эксплуатации;
- модифицированные математические модели зависимости нагрузки электропривода от изменения диаметра водораспределительного трубопровода и параметров движителя опорных тележек дождевальных машин кругового действия;
- зависимость продолжительности движения дождевальной машины от параметров аккумуляторного источника питания электропривода;
- технические средства, позволяющие повысить энергоэффективность электрифицированных дождевальных машин (автономная электрифицированная секция дождевальной машины кругового действия, устройство динамической компенсации реактивной мощности электродвигателей, схемы управления дождевальной машиной кругового действия и устройство определения угла поворота секции).

**Теоретическая и практическая значимость** работы заключается:

- в расширении и дополнении знаний по эксплуатации дождевальных машин, а именно в разработке теоретических положений дискретного выбора оптимальной системы энергоснабжения дождевальных машин кругового действия для конкретных условий эксплуатации на основе обобщающего критерия эффективности, позволяющих повысить энергетическую эффективность полива;
- в совершенствовании математических моделей изменения энергопотребления при использовании средств энергосбережения, которые могут быть использованы при разработке новых электрифицированных дождевальных машин кругового действия;
- в практическом применении научных разработок и результатов исследования в производстве на предприятиях АПК Саратовской, Волгоградской областей и Чеченской Республики, при изготовлении дождевальных машин кругового действия МДЭК «Каскад», а также в учебном процессе образовательных заведений всех форм собственности при чтении лекций, проведении лабораторных и практических занятий по вопросам эксплуатации дождевальных машин.

Методология и методы исследований. Методология исследования основана на поэтапном решении проблемы поиска оптимального энергоснабжения для существующих условий эксплуатации дождевальных машин кругового действия по критерию наименьшего энергопотребления. Исследования проводили с использованием теории эксплуатации электрооборудования с применением программ MS Excel 2010, Statistica v.10. Моделирование схем и устройств выполнено с помощью программ КОМПАС 3D V16 и Multisim v. 8.2.

При определении проблемы использованы эмпирические методы исследования: изучение, наблюдение, измерение и сравнение, а при решении проблемы – системный подход, анализ, синтез, эксперимент, статистические методы обработки данных и обобщение.

**Научные положения и результаты исследований, выносимые на защиту:**

1. Структурно-функциональные модели систем энергоснабжения дождевальных машин, определяемых показателями составляющих эффективности их приводов: гидравлического  $k_{орг} = 0,22$ ; механического  $k_{орг} = 0,21$ ; электрического  $k_{орг} = 0,26...0,31$ .

2. Математическая модель эффективности энергоснабжения, учитывающая обобщающий критерий эффективности  $k_1$ , показатель мощности  $k_2$ , показатель КПД  $k_3$ , показатель стоимости  $k_4$ , показатель надежности  $k_5$ , показатель массы  $k_7$ , поливную норму  $z_1$ , площадь поливного участка  $z_2$ , давление потока жидкости на входе  $z_4$ , удаленность от централизованного энергоснабжения  $z_5$  и водоема  $z_6$ , прирост прибыли  $z_7$ .

3. Установленные зоны, границы и условия применения оптимальных систем энергоснабжения дождевальных машин кругового действия при различных условиях эксплуатации.

4. Полученные аналитические зависимости нагрузки электропривода опорных тележек от ступенчатого снижения диаметра водораспределительного трубопровода секции, а также от посекционного снижения диаметра для всей дождевальной машины.

5. Установленные аналитические зависимости продолжительности движения опорной тележки секции от параметров аккумуляторного источника питания, оснащенного возобновляемыми источниками энергии, и полученные результаты экспериментальных исследований аккумуляторного источника питания.

6. Разработанные устройства динамической компенсации реактивной мощности и определения угла поворота; схемы управления дождевальными машинами, позволяющие снизить ее энергопотребление; результаты экспериментальных исследований устройства динамической компенсации реактивной мощности электродвигателей с источником питания дождевальных машин на переменном токе.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Достоверность полученных результатов подтверждена данными экспериментальных исследований по снижению энергопотребления при эксплуатации дождевальных машин кругового действия и обеспечена применением методик испытаний в соответствии с требованиями ГОСТов, с использованием сертифицированных приборов и оборудования, а также достаточной сходимостью теоретических и экспериментальных данных и их подтверждением при лабораторных, стендовых и полевых испытаниях.

Работа проведена в рамках приоритетного научного направления «Ресурсосберегающее экологически безопасное земледелие» (рег. № 01201151791) ФГБОУ ВО «Саратовский ГАУ». Апробация стендов и промышленных образцов выполнена в учебно-научно-производственном объединении «Поволжье» и учебно-научно-производственном комплексе «Агроцентр» при ФГБОУ ВО «Саратовский ГАУ».

Основные положения работы представлены и обсуждены на национальных научно-практических конференциях с международным участием «Актуальные проблемы энергетики» (г. Саратов, 2017–2020 гг.); конференциях ППС кафедры «Инженерная физика, электрооборудование и электротехнологии» ФГБОУ ВО «Саратовский ГАУ» (г. Саратов, 2015–2020 гг.); национальном научно-техническом семинаре имени В.В. Михайлова «Проблемы экономичности и эксплуатации автотракторной техники» (г. Саратов, 2019 г.); международном научно-практическом семинаре «Мелиорация в процессе климатических изменений» (г. Комарно, Словакия, 2019 г.); на научно-техническом совете Министерства сельского хозяйства Саратовской области (г. Саратов, 2020 г.).

Основные положения диссертации отражены в 52 работах, в том числе в 15 статьях в рецензируемых научных журналах, 7 статьях в изданиях, включенных в базы Web of Science и Scopus, 4 патентах на изобретения и полезные модели. Общий объем публикаций составляет 27,6 печ. л., из которых 12,9 печ. л. принадлежат лично соискателю.

Диссертация обобщает результаты научных исследований и практических разработок автора в период с 2011 по 2021 г. и состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы из 361 наименований, 36 из которых на иностранном языке, и 4 приложений. Материал работы изложен на 406 страницах машинописного текста, включает в себя 169 рисунков и 74 таблицы.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** дана общая характеристика работы, обоснованы актуальность решаемой проблемы, научная новизна, практическая ценность, приведены данные о реализации и апробации результатов, сформулированы научные положения и результаты исследований, выносимые на защиту.

В **первой главе «Состояние проблемы энергоэффективности дождевальных машин кругового действия и обеспечения энергосбережения в технологиях искусственного орошения»** приведен анализ состояния эксплуатации и энергетической эффективности дождевальных машин, обозначена перспектива их развития для орошаемого земледелия.

Изменение климата приводит к постепенному увеличению площади сухих и очень сухих земель, которые нуждаются в регулярном орошении. За последние 50 лет их площадь увеличилась на 14 %. Распределение коэффициента увлажнения для зон РФ показано на рисунке 1.

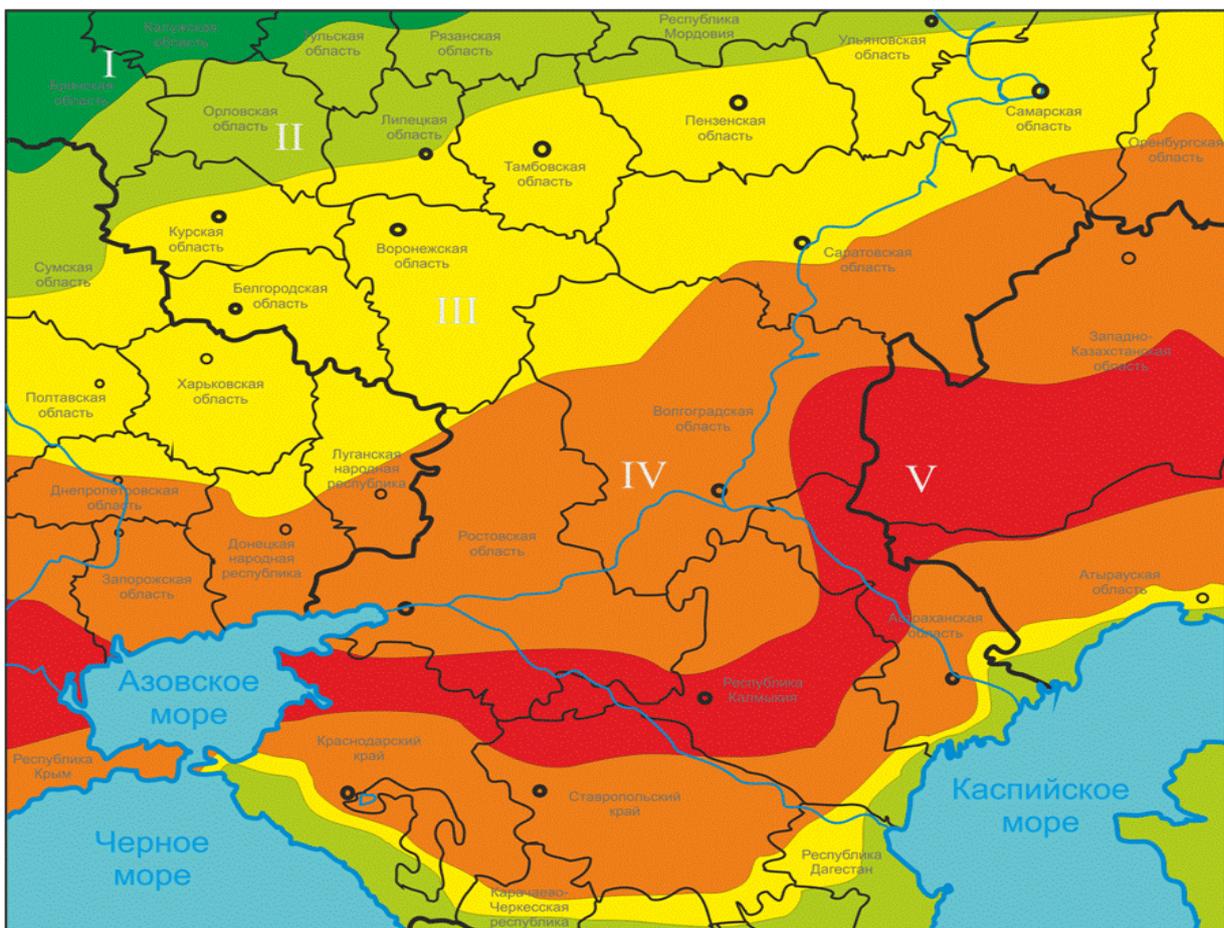


Рисунок 1 – Распределение летнего коэффициента увлажнения  $K_y$  зон РФ в 1996–2019 гг.: V –  $K_y < 0,50$ ; IV –  $0,50 < K_y < 0,70$ ; III –  $0,71 < K_y < 0,80$ ; II –  $0,81 < K_y < 0,90$ ; I –  $0,91 < K_y < 1,10$

Государственная поддержка сельскохозяйственных предприятий в области мелиорации создает основу устойчивого развития дождевальной техники. В настоящий момент прогнозируется потребность в дождевальных машинах кругового действия для РФ в количестве 2479 ед., для Саратовской области – 348 ед. в соответствии с планами развития мелиорации регионов РФ до 2024 года.

Анализ эксплуатации дождевальных машин кругового действия показывает разнообразие систем их энергоснабжения: электрический привод (47 %), гидравлический привод (36 %), механический привод (15 %). При этом комплект оборудования системы энергоснабжения ДМ может существенно различаться. Например, источником питания могут быть: кабельная линия, воздушная линия, переносной дизельный или бензиновый генератор, дизельный или бензиновый двигатель внутреннего сгорания; аккумуляторное питание с кабельной подзарядкой, питание от насосной станции, питание от гидрогенератора. Общее возможное число насчитывает около 40 вариантов энергоснабжения ДМ.

На практике применяют все варианты систем энергоснабжения без детального учета условий эксплуатации ДМ. При этом энергетическая эффективность ДМ систем имеет существенные различия (таблица 1). При поливе также учитывают энергопотребление насоса водоподачи.

Таблица 1 – Показатели энергопотребления полива различных систем энергоснабжения

Система энергоснабжения	Мощность 1 ед., кВт	Кол-во, ед.	Средняя продолжительность работы, ч	КПД, %	Требуемое кол-во энергии без учета потерь, кВт·ч		Энергопотребление полива дождевальными машинами, тыс. кВт·ч
					водораспределение	водоподача	
Гидропривод вращательного действия (T-L Irrigation)	0,25...0,40	20	500	0,40	2500	55000	58...95
Гидропривод возвратно-поступательного действия (ДМ «Фрегат»)	0,42...0,80	10		0,36	2100	55000	57...105
Механический привод (электро-механический, «Кубань-ЛК 1М»)	14...30	1		0,31	7000	22500	30...50
Электропривод (Zimmatic, Valley, МДЭК «Каскад»)	0,55...0,75	10		0,84	2750	22500	25...40

Энергопотребление дождевальных машин в зависимости от системы энергоснабжения имеет существенные различия – в 1,5–4,2 раза.

Выбор оптимальной системы энергоснабжения для конкретных условий эксплуатации ДМ, а также разработка комплекса мероприятий и устройств, повышающих энергетическую эффективность ДМ, обеспечит снижение энергопотребления до 20 %.

**Во второй главе «Методология исследования и синтез структуры энергоснабжения дождевальных машин кругового действия»** приведена методология исследования, выделены объект, границы исследования, выполнен функционально-структурный синтез различных типов привода ДМ.

Объектом исследования (рисунок 2) является система энергоснабжения ДМ, которая взаимодействует со смежными системами полива и включает в себя: источник питания; приемник энергии, оборудование управления и защиты, а также силовую и вторичную сети передачи энергии.

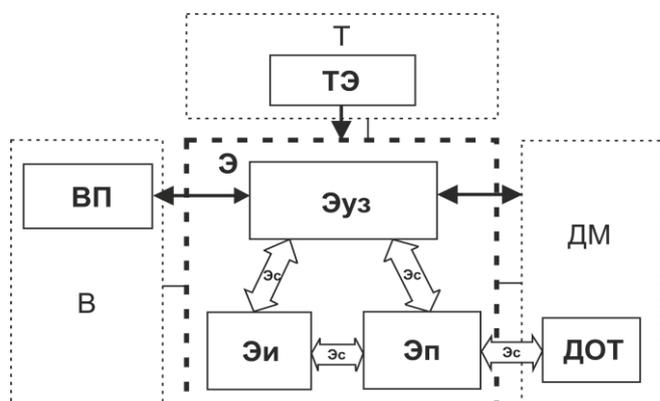


Рисунок 2 – Объект исследования – энергоснабжение дождевальной машины кругового действия:  
ТЭ – техническая эксплуатация;  
ВП – водоподача, Э<sub>уз</sub> – оборудование управления и защиты; Э<sub>и</sub> – источник энергии; Э<sub>п</sub> – приемник энергии; Э<sub>с</sub> – устройства передачи энергии (сеть); ДОТ – двигатели опорных тележек дождевальной машины

Оптимальной можно считать такую систему энергоснабжения (СЭ), при которой полив осуществляется при минимальных энергопотреблении и эксплуатационных затратах. Эффективность  $V$  системы зависит от внутренних и внешних факторов, а также от ограничений, представленных в виде требований к выполнению полива:

$$V = f(\mathcal{E}; Y; O), \quad (1)$$

где  $\mathcal{E}$  – эффективность совокупности показателей, зависящих от эксплуатационных свойств,  $Y$  – совокупность показателей, зависящих от условия эксплуатации;  $O$  – ограничения, наложенные на систему относительно агротехнических, мелиоративных и конструктивных требований к дождевальной машине.

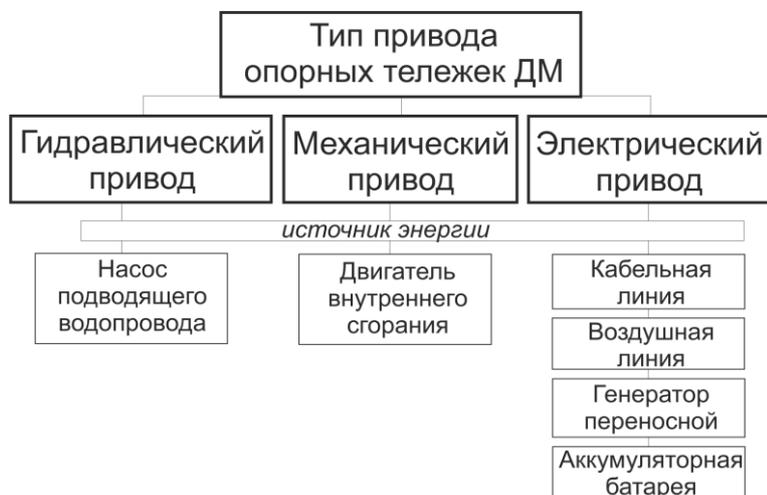


Рисунок 3 – Структурная схема энергоснабжения приводов опорных тележек дождевальной машины

Оценить эффективность привода удобно на основе синтеза функционально-структурных моделей. Для этого рассмотрим одинаковые дождевальные машины, состоящие, например, из пяти секций. На рисунке 4 приведена упрощенная электрическая схема СЭ ДМ с электроприводом и аккумуляторным источником питания, по которой определим количество элементов.

С помощью синтеза структурных моделей установим логическую связь элементов, а также количество основных, вспомогательных функций (рисунок 5); качество связей и их уровень проявления.

Примем допущение, что данные модели состоят из минимального и достаточного числа элементов для выполнения полива дождевальными машинами.

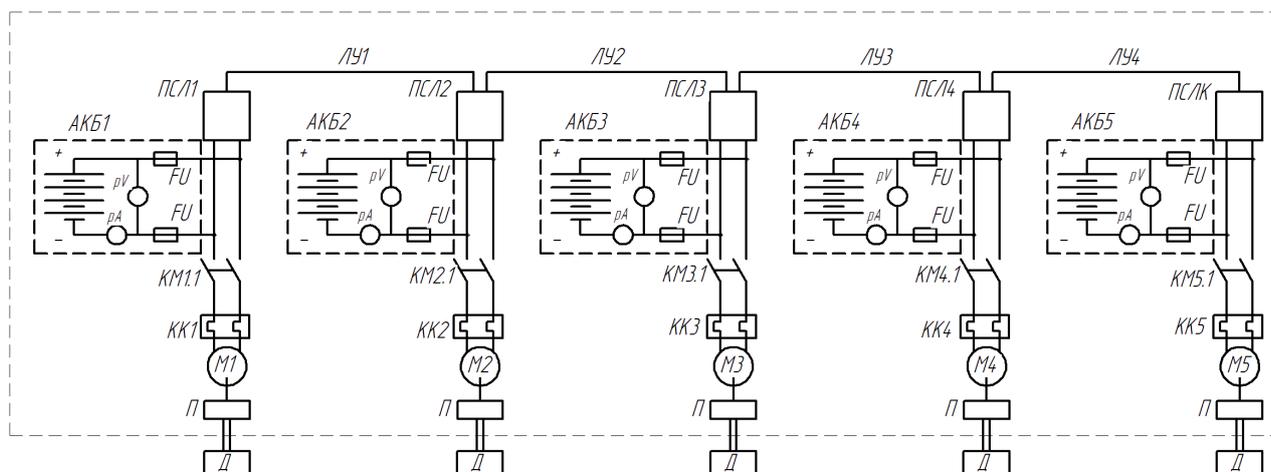
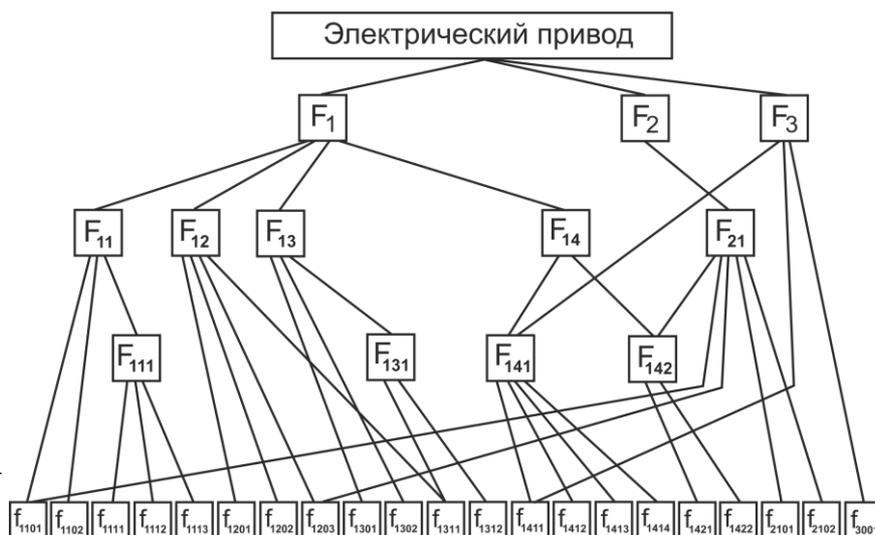


Рисунок 4 – Упрощенная электрическая схема СЭ ДМ с электроприводом и аккумуляторным источником питания, состоящая из 5 секций (ЛУ – линия управления; ПСЛ – прибор синхронизации движения в линию; АКБ – аккумуляторная батарея, FU – плавкий предохранитель; рА, рV – приборы контроля соответственно тока и напряжения; КМ – контактор; КК – тепловое реле; М – электродвигатель; П – передача; Д – движитель)

Рисунок 5 – Функциональная модель системы энергоснабжения с электрическим приводом и с питанием от аккумуляторной батареи. Обеспечение основных функций:  $F_1$  – передача механической энергии ходовой части ДМ;  $F_2$  – безопасность работы системы;  $F_3$  – удобство управления;  $F_{11}$  – источник электрической энергии;  $F_{12}$  – преобразование электро-



энергии в механическую;  $F_{13}$  – передача электрической энергии;  $F_{14}$  – защита и управление оборудованием;  $F_{21}$  – защита персонала;  $F_{111}$  – зарядка аккумуляторных батарей;  $F_{131}$  – устройство силовой и вторичной сетей;  $F_{141}$  – управление электроприводом;  $F_{142}$  – защита от токов короткого замыкания и перегрузок;  $f_{1101}$  – установка герметичного щита;  $f_{1102}$  – закрепление АКБ;  $f_{1111}$  – закрепление солнечных модулей;  $f_{1112}$  – подключение контроллера;  $f_{1113}$  – установка контроллера;  $f_{1201}$  – установка электропривода;  $f_{1202}$  – передача крутящего момента;  $f_{1203}$  – закрытие движущихся частей;  $f_{1301}$  – передача электроэнергии;  $f_{1302}$  – закрепление кабелей и защита их от механических повреждений;  $f_{1311}$  – согласование пропускной способности сети;  $f_{1311}$  – обеспечение работы схем;  $f_{1411}$  – установка блока управления;  $f_{1412}$  – сборка и настройка схемы;  $f_{1413}$  – обеспечение схемы управления режимами полива;  $f_{1414}$  – подключение приборов контроля параметров цепи;  $f_{1421}$  и  $f_{1422}$  – обеспечение защиты силовой сети и вторичной сети от токов короткого замыкания и перегрузок;  $f_{2101}$  – выполнение заземления;  $f_{2102}$  – установка устройства защитного отключения;  $f_{3001}$  – обеспечение возможности дистанционного обслуживания

Каждую систему энергоснабжения следует оценить по степени актуализации  $k_a$ , сосредоточения  $k_c$ , гибкости  $k_r$  и совместимости  $k_{сов}$  ее составных элементов. Функционально-структурную эффективность  $k_{орг}$  системы энерго-

снабжения определяют как произведение средних значений коэффициентов актуализации, сосредоточения, совместимости и гибкости:

$$k_{\text{орг}} = \bar{k}_a \bar{k}_c \bar{k}_{\text{сов}} \bar{k}_r. \quad (2)$$

В ходе синтеза получены данные рассматриваемых вариантов СЭ и установлен коэффициент функционально-структурной эффективности каждой системы (таблица 2).

Таблица 2 – Данные составляющих эффективности рассматриваемых вариантов систем энергоснабжения ДМ

Система энергоснабжения	Коэффициент актуализации				Коэффициент сосредоточения				Коэффициент совместимости				Коэфф. гибкости	Коэфф. эффект.
	$k_{aF}$	$k_{aN}$	$k_{aC}$	$\bar{k}_a$	$k_{cF}$	$k_{cN}$	$k_{cC}$	$\bar{k}_c$	$k_{\text{сов}F}$	$k_{\text{сов}N}$	$k_{\text{сов}C}$	$\bar{k}_{\text{сов}}$	$\bar{k}_r$	$\bar{k}_{\text{орг}}$
<i>Гидравлический привод</i>														
с ГД $V_{\text{крГД}}$	1,0	1,0	0,97	0,99	0,23	0,85	0,14	0,41	0,53	0,64	0,45	0,54	1,0	0,22
с ГЦ $V_{\text{крГЦ}}$	1,0	1,0	0,97	0,99	0,23	0,86	0,14	0,41	0,53	0,62	0,45	0,53	1,0	0,22
<i>Механический привод</i>														
$V_{\text{крМ}}$	1,0	1,0	1,0	1,0	0,13	0,86	0,06	0,35	0,63	0,59	0,62	0,61	1,0	0,21
<i>Электрический привод</i>														
с КЛ $V_{\text{крЭкл}}$	1,0	1,0	0,93	0,97	0,21	0,75	0,27	0,41	0,64	0,50	0,33	0,49	1,5	<b>0,29</b>
с ВЛ $V_{\text{крЭвл}}$	1,0	1,0	0,93	0,97	0,21	0,79	0,26	0,42	0,64	0,50	0,31	0,48	1,5	<b>0,29</b>
с Г $V_{\text{крЭг}}$	1,0	1,0	0,95	0,98	0,25	0,66	0,19	0,37	0,66	0,53	0,37	0,52	1,38	<b>0,26</b>
с АКБ $V_{\text{крЭакб}}$	1,0	1,0	0,95	0,98	0,23	0,80	0,44	0,49	0,67	0,47	0,47	0,54	1,2	<b>0,31</b>

*Примечание.* Индексы коэффициентов:  $F$  – число функциональных связей;  $N$  – число элементов;  $C$  – число связей; ГД – гидродвигатель вращательного действия; ГЦ – гидродвигатель возвратно-поступательного действия; КЛ – кабельная линия; ВЛ – воздушная линия; Г – переносной генератор (дизельный/бензиновый); АКБ – аккумуляторная батарея

На основе функционально-структурного синтеза и значения коэффициента  $k_{\text{орг}}$  однозначного решения при выборе системы энергоснабжения дождевальной машины в пользу какого-либо привода принять нельзя, так как каждая система оценивается индивидуальным уровнем преобразования энергии, стоимости, эксплуатационной надежности и т. п. Однако его следует учесть, включив в обобщающий критерий – критический показатель эффективности СЭ  $V'_{\text{кри}}$ :

$$V'_{\text{кри}} = \frac{V_i}{k_{\text{орг}i}}, \quad (3)$$

где  $V_i$  – эффективность системы энергоснабжения  $i$ -го варианта,  $k_{\text{орг}i}$  – функционально-структурная эффективность  $i$ -го варианта.

**В третьей главе «Теоретическое обоснование выбора системы энергоснабжения дождевальных машин кругового действия»** предложена концепция выбора оптимальной системы энергоснабжения для конкретных условий эксплуатации дождевальных машин кругового действия на основе векторного синтеза.

Выбрать оптимальную систему энергоснабжения можно на основе обобщающего критерия, который позволил бы сравнить различные варианты приводов и источников питания в конкретных условиях эксплуатации дождевальных машин любого типа.

Анализ научно-технической литературы показал, что на выбор влияют множество конструктивных параметров и условия эксплуатации дождеваль-ной машины, из которых можно выделить основные (таблица 3).

Таблица 3 – Основные показатели исследования

Условия эксплуатации ДМ				Параметры системы энергоснабжения			
параметр	ед. измер.	обозн.	услов. обозн.	параметр	ед. измер.	обозн.	услов. обозн.
Поливная (оросительная) норма	м <sup>3</sup> /га	$m_{\text{пн}}$ ( $m_{\text{он}}$ )	$z_1$	Показатель эффективности СЭ	руб.·кВт·ч	$V'_{\text{кр}}$	$k_1$
Площадь поливного участка	га	$S$	$z_2$	Удельная мощность СЭ	кВт/га	$P'$	$k_2$
Стоимость ДМ без энергооборудования СЭ	руб.	$K$	$z_3$	Показатель потерь энергии (мощности)	%	$\eta'$	$k_3$
Давление поливной воды на входе в ДМ	МПа	$p$	$z_4$	Стоимость СЭ	руб.	$C$	$k_4$
Удаленность от централизованного источника энергии	м	$l_{\text{ип}}$	$z_5$	Показатель надежности СЭ (вероятность отказа)	%	$Q_0(t)$	$k_5$
Удаленность от водоема	м	$l_{\text{в}}$	$z_6$	Эксплуатационные затраты	руб.	$z$	$k_6$
Прирост прибыли от полива дождеванием	руб.	$\Delta\Pi$	$z_7$	Масса энергооборудования СЭ	кг	$m_{\text{СЭ}}$	$k_7$

Примем допущение, что все параметры системы энергоснабжения и условия эксплуатации ДМ из таблицы 3 влияют на эффективность энергоснабжения (которая выражается энергопотреблением и эксплуатационными затратами) и связаны друг с другом. Тогда, приведя все параметры СЭ к стандартному виду (чем меньше их значения, тем лучше система), определим их взаимосвязь с условиями эксплуатации ДМ.

Мощность СЭ ДМ будет определяться поливной нормой  $m_{\text{пн}}$  и площадью полива  $S$ :

$$P' = f(m_{\text{пн}}, S). \quad (4)$$

Представим мощность СЭ следующим образом:

$$\Sigma P = P''m_{\text{пн}} + P'S, \quad (5)$$

где  $P''$  и  $P'$  – коэффициенты, зависящие от типа СЭ, (Вт·га)/м<sup>3</sup> и Вт/га.

Тогда, значение мощности с учетом условного обозначения (показатель  $k_2$ ):

$$\left. \begin{aligned} k_2 &= \frac{B}{z_2} \\ B &= \sum P - b = \min \\ z_2 &> 0 \end{aligned} \right\}, \quad (6)$$

где  $b$  – постоянная величина мощности, характеризующая поливную норму  $z_1$ , Вт.

Показатель потерь мощности на разных этапах преобразования энергии представим:

$$\eta' = \frac{\Delta P}{\Sigma P}, \quad (7)$$

где  $\Delta P$  – потери мощности на всех этапах, Вт;  $\Sigma P$  – полная мощность, отпущенная источником энергии, Вт.

Потери в рассматриваемых системах следует оценивать с учетом удаленности от централизованного источника энергии  $l_{\text{ип}}$  и водоема  $l_{\text{в}}$ , а также длины водораспределительного трубопровода дождевальная машины, которую выразим через площадь поливного участка  $S$ .

В гидравлических системах потери будут отличаться от потерь в электрических системах, так как используется разный вид энергии (механическая энергия потока жидкости и электроэнергия).

Для электрической системы потери определяются:

$$\Delta P = \alpha \sqrt{\frac{S}{\pi}} + \beta l_{\text{ип}}, \quad (8)$$

где  $\alpha$  – удельные потери мощности на единицу длины трубопровода ДМ с учетом потерь в электроприемниках, Вт/м;  $\beta$  – удельные потери мощности в линии от централизованного источника питания (трансформаторная подстанция) до неподвижной центральной опоры ДМ, Вт/м.

Для гидравлической системы:

$$\Delta P_{\text{г}} = u_{\text{п}} \sqrt{\frac{S}{\pi}} + y_{\text{п}} l_{\text{в}}, \quad (9)$$

где  $u_{\text{п}}$  – удельные потери мощности потока жидкости на единицу длины трубопровода ДМ с учетом потерь в каждом гидроприводе, Вт/м;  $y_{\text{п}}$  – удельные потери мощности потока жидкости в магистральном трубопроводе от водоема до неподвижной опоры ДМ, Вт/м.

В электрической системе потребляемую мощность оценивают по выражению (5), а в гидравлической системе общая мощность потока жидкости зависит от параметров насоса водоподдачи. Выразим мощность в гидравлической системе через давление поливной воды на входе в дождевальную машину  $p(z_4)$ . Тогда в условных обозначениях запишем:

$$\left. \begin{aligned} k_{3\text{г}} &= \frac{u_{\text{п}} \sqrt{\frac{z_2}{\pi}} + y_{\text{п}} z_6}{x z_4} = \min, \\ k_{3\text{э}} &= \frac{\alpha \sqrt{\frac{z_2}{\pi}} + \beta z_5}{b + k_2 z_2} = \min, \\ z_5 &= \min, z_6 = \min, z_4 = \max \end{aligned} \right\}, \quad (10)$$

где  $x$  – постоянная величина, определяющая величину потребления мощности на единицу давления для гидравлической системы, Вт/Па.

Оценить надежность рассматриваемых систем энергоснабжения следует приближенно, так как в процессе эксплуатации ДМ на нее влияет совокуп-

ность конструктивной надежности оборудования, эксплуатационной надежности и воздействия условий окружающей среды. Функция зависимости вероятности отказа СЭ ДМ:

$$Q_0(t) = f(K; C; z), \quad (11)$$

где  $K$  – стоимость ДМ без СЭ, руб.;  $C$  – стоимость СЭ, руб.,  $z$  – эксплуатационные затраты на ДМ, руб.

Выразим вероятность отказа через интенсивность отказа  $\lambda_0$  ( $\text{ч}^{-1}$ ):

$$Q_0(t) = 1 - \frac{1}{e^{\int_0^t \lambda_0(\tau) d\tau}}, \quad (12)$$

где  $t$  – период эксплуатации оборудования СЭ ДМ, ч;  $\tau$  – рассматриваемый период работы оборудования, ч.

Текущая интенсивность отказов зависит от эксплуатационных затрат  $z$ :

$$\lambda_\tau(\tau) = \frac{a_3^2 z}{Y_0}, \quad (13)$$

где  $a_3$  – постоянная безразмерная величина, показывающая отношение базовых эксплуатационных затрат к текущим,  $0 < a_3 < 1$ ;  $Y_0$  – ущерб от отказа электрооборудования, руб.

Тогда текущее значение вероятности отказов, выраженное в условных обозначениях:

$$\left. \begin{aligned} k_5 &= 1 - e^{-\int_0^t \frac{a_3^2 k_6^2}{(z_3 + k_4) \delta_y} dt}, \\ z_3 &= \max, k_4 = \max, k_6 = \min. \end{aligned} \right\}, \quad (14)$$

где  $\delta_y$  – постоянная величина, показывающая величину ущерба  $Y_0$  из-за отказа СЭ при заложенном сроке службы ДМ  $t_{cc}$ , руб.

Стоимость системы энергоснабжения зависит от мощности оборудования, необходимой надежности работы ДМ, удаленности ДМ и т. п. Представим стоимость СЭ в виде функции:

$$C = f(P', Q_0(t), m_{СЭ}, l_{нп}, l_{в}, p). \quad (15)$$

Тип привода также определяет стоимость  $C$  системы энергоснабжения. Общая стоимость складывается из стоимостей основного и дополнительного оборудования, оборудования источника. С учетом условных обозначений значение стоимости для некоторых систем представим как сумму из слагаемых:

$$\left. \begin{aligned} k_{4i} &= c_0(b + k_{2i}z_2) + z_5(c_{иЭклі} + \varepsilon_{иЭклі} + \pi_{иЭклі}) + (c_d^\xi k_5(1 - \tau)), \\ k_{4j} &= c_0(b + k_{2j}z_2) + z_6(\varepsilon_{гj} + \pi_{гj}) + (c_d^\xi k_5(1 - \tau)), \\ k_2 &= \min, z_2 = \min, z_5 = \min, z_6 = \min, k_5 = \min. \end{aligned} \right\}, \quad (16)$$

где  $c_0$  – удельная стоимость энергооборудования СЭ, руб./Вт;  $c_{иЭклі}$  – удельная стоимость кабельной линии  $i$ -го варианта, руб./м;  $\varepsilon_{иЭклі}$  – удельные эксплуатационные затраты  $i$ -го варианта, руб./м;  $\pi_{иЭклі}$  – удельные затраты на покрытие потерь  $i$ -го варианта, руб./м;  $\varepsilon_{гj}$  – удельные эксплуатационные затраты  $j$ -го варианта для гидравлического привода, руб./м;  $\pi_{гj}$  – удельные затраты на по-

крытие потерь  $j$ -го варианта для гидравлического привода, руб./м;  $c_d$  – относительная стоимость дополнительного оборудования на единицу снижения вероятности отказов, руб./%;  $\xi$  – степень чувствительности системы к принятому дополнительному оборудованию;  $\iota$  – коэффициент снижения вероятности отказа,  $0 < \iota < 1$ .

Эксплуатационные затраты отражают влияние условий, в которых работает дождевальная машина, и характеризуют параметры системы энергоснабжения, в том числе энергопотребление. Они складываются из следующих составляющих затрат:

$$z = z_p + z_{\text{ТОР}} + z_y, \quad (17)$$

где  $z_p$  – затраты на ресурс (энергию) системы энергоснабжения, руб.;  $z_{\text{ТОР}}$  – затраты на техническое обслуживание и ремонт оборудования СЭ, руб.;  $z_y$  – затраты на покрытие ущерба из-за отказов или простоя оборудования СЭ, руб.

$$z_p = c_p \Sigma P t_p, \quad (18)$$

где  $c_p$  – цена за единицу ресурса, руб./кВт·ч;  $t_p$  – продолжительность работы источника СЭ, ч.

$$z_{\text{ТОР}} = T_{\text{ТОР}} \tau_{\text{ч}}, \quad (19)$$

где  $T_{\text{ТОР}}$  – трудоемкость работ по техническому обслуживанию и ремонту оборудования за сезон, чел.ч;  $\tau_{\text{ч}}$  – часовая тарифная ставка обслуживающего персонала, руб./чел.ч.

$$z_y = R + z'_y, \quad (20)$$

где  $R$  – размер риска – показатель ущерба как вероятностной характеристики за период времени  $t$  (ч), руб.;  $z'_y$  – затраты на мероприятия по повышению надежности и снижению вероятности отказа за период времени  $t$  (ч), руб.

Риск  $R$  появления ущерба  $Y_o$  – это вероятностный показатель, который рассматривается на интервале времени  $t$ :

$$R = Y_o Q_o(t). \quad (21)$$

Примем допущение, что ущерб оценивается как недополучение прибыли за период времени  $t$  (ч):

$$Y_o = \Delta\Pi - \Delta\Pi_{\text{ф}} = \Delta\Pi (1 - \rho), \quad (22)$$

где  $\Delta\Pi_{\text{ф}}$  – фактическая прибыль от применения ДМ с конкретной системой энергоснабжения, руб.;  $\rho$  – относительный показатель фактической прибыли.

Затраты на мероприятия по повышению надежности и снижению вероятности отказа представим в виде:

$$z'_y = z_{\text{уд}}^{\Psi} (Q_{o1}(t) - Q_{o2}(t)), \quad (23)$$

где  $z_{\text{уд}}$  – удельные затраты на профилактические мероприятия для повышения надежности, руб./%;  $\Psi$  – показатель степени эффективности профилактического мероприятия;  $Q_{o1}(t)$  и  $Q_{o2}(t)$  – вероятности отказов соответственно в случаях отсутствия и выполнения профилактических мероприятий, %.

Обозначим:

$$\left. \begin{aligned} \frac{Q_{o2}(t)}{Q_{o1}(t)} &= g_o, \\ g_o &< 1. \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

где  $g_0$  – показатель эффективности профилактических мероприятий;

$$Q_o(t) = Q_{o1}(t), \quad (25)$$

тогда получим:

$$z_y = Q_o(t)(\Delta\Pi(1-\rho) + z_{\text{уд}}^{\Psi}(1-g_0)). \quad (26)$$

Общие эксплуатационные затраты в условных обозначениях примут вид:

$$k_6 = c_p(b + k_2 z_2)t_p + (t_{1м} z_5 + t'_{1м} z_6 + t_{1кг} k_7)\tau_{ч} + k_5(z_7(1-\rho) + z_{\text{уд}}^{\Psi}(1-g_0)), \quad (27)$$

где  $t_{1м}$  – нормативная трудоемкость технического обслуживания и ремонта (ТОР) линии водопровода, чел.-ч/м;  $t'_{1м}$  – нормативная трудоемкость ТОР линии, чел.-ч/м;  $t_{1кг}$  – нормативная трудоемкость ТОР единицы массы, чел.-ч/кг.

Все сравниваемые варианты СЭ будут различаться массой элементов системы энергоснабжения ДМ. Масса как основной параметр динамической системы определяет уровень энергопотребления и зависит:

$$m_{СЭ} = f(m_{\text{пв}}, S; P'; Q_o(t); C). \quad (28)$$

Целевая функция связи массы элементов СЭ определяется массой основного и дополнительного оборудования:

$$\left. \begin{aligned} k_7 = m_y(b + k_2 z_2) + \frac{\psi_y \lambda t(1-\varepsilon)}{\ln\left(\frac{1}{1-k_5}\right)(1+\chi)} - \frac{k_4(c_1 \zeta - c_2)}{c_1 c_2} = \min, \\ k_2 = \min, z_2 = \min, k_5 = \min, k_4 = \max. \end{aligned} \right\}, \quad (29)$$

где  $m_y$  – удельная масса мощности системы, кг/кВт;  $\varepsilon$  – доля снижения интенсивности отказов из-за внедрения дополнительного оборудования;  $\chi$  – относительное превышение дополнительной массы к основной массе системы;  $\psi_y$  – удельная относительная величина интенсивности отказов на единицу массы, 1/(кг·год);  $c_1, c_2$  – удельная стоимость 1 кг заготовки (конструкции) соответственно тяжелого и легкого материала, руб./кг;  $\zeta$  – коэффициент затрат на оборудование, снижающее общую массу элементов СЭ.

Обобщающий критерий выбора оптимальной системы энергоснабжения дождевальной машины зависит от энергопотребления и эксплуатационных затрат:

$$V_{\text{кр}} = \frac{W(C+z)}{(1-\eta')}, \quad (30)$$

где  $W$  – энергопотребление ДМ, кВт·ч.

С учетом полученных уравнений (6), (27) обобщающий критерий системы энергоснабжения:

$$V_{\text{кр}} = \frac{(b + k_2 z_2)t_p \left[ k_4 + c_p(b + k_2 z_2)t_p + (t_{1м} z_5 + t'_{1м} z_6 + t_{1кг} k_7)\tau_{ч} + k_5(z_7(1-\rho) + z_{\text{уд}}^{\Psi}(1-g_0)) \right]}{(1-k_3)}. \quad (31)$$

Эксплуатационные затраты  $z$  и потребленная энергия ДМ  $W$  являются величинами, зависящими от времени работы  $t_p$ . Интегрируя выражение (31) по времени за один полив  $t_0$  и за сезон использования  $t_{\text{сез}}$ , получим значения обобщающего критерия эффективности:

$$V_{\text{кр-о}} = \int_0^{t_o} \frac{(b + k_2 z_2) t_p [k_4 + \alpha_p (b + k_2 z_2) t_p + (t_{1м} z_5 + t'_{1м} z_6 + t_{1кк} k_7) \tau_ч + k_5 (z_7 (1 - \rho) + 3_{\text{ууд}}^{\Psi} (1 - g_o))]}{(1 - k_3)} dt_o, \quad (32)$$

$$V_{\text{кр-сез}} = \int_0^{t_{\text{сез}}} \frac{(b + k_2 z_2) t_p [k_4 + \alpha_p (b + k_2 z_2) t_p + (t_{1м} z_5 + t'_{1м} z_6 + t_{1кк} k_7) \tau_ч + k_5 (z_7 (1 - \rho) + 3_{\text{ууд}}^{\Psi} (1 - g_o))]}{(1 - k_3)} dt_{\text{сез}}. \quad (33)$$

Продолжительность работы ДМ зависит по поливной и оросительной норм для конкретной культуры. Выразим продолжительность работы ДМ за сезон через мелиоративные параметры:

$$t_{\text{сез}} = \frac{5}{18} \frac{m_{\text{он}}}{q}, \quad (34)$$

где  $m_{\text{он}}$  – оросительная норма полива, м<sup>3</sup>/га;  $q$  – гидромодуль дождевальной машины, м<sup>3</sup>/ч/га.

Выразив гидромодуль через входное давление  $p$  в ДМ, получим:

$$t_{\text{сез}} = \frac{1,1 m_{\text{он}} S}{\mu_p \pi d_{\text{внут}} \sqrt{2 p}} \sqrt{\frac{\rho_{\text{в}}}{2 p}}, \quad (35)$$

где  $\mu_p$  – коэффициент расхода, зависящий от формы гидранта дождевальной машины ( $\mu_p = 0,4 \dots 0,6$ );  $d_{\text{внут}}$  – внутренний диаметр трубопровода ДМ, присоединенного к гидранту, м;  $g$  – ускорение свободного падения,  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup>;  $p$  – давление потока жидкости, Па;  $\rho_{\text{в}}$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>.

В условных обозначениях, если продолжительность одного оборота  $t_{\text{сез}} = t_p$ :

$$t_p = \frac{1,1 z_1 z_2}{\mu_p \pi d_{\text{внут}} \sqrt{2 z_4}} \sqrt{\frac{\rho_{\text{в}}}{2 z_4}}. \quad (36)$$

Тогда обобщающий критерий эффективности  $V_{\text{кр-о}}$  с учетом (36):

$$V_{\text{кр-о}} = \frac{1,1 z_1 z_2 (b + k_2 z_2) \sqrt{\frac{\rho_{\text{в}}}{2 z_4}} \left[ k_4 + \alpha_p (b + k_2 z_2) \frac{1,1 z_1 z_2}{\mu_p \pi d_{\text{внут}} \sqrt{2 z_4}} \sqrt{\frac{\rho_{\text{в}}}{2 z_4}} + (t_{1м} z_5 + t'_{1м} z_6 + t_{1кк} k_7) \tau_ч + k_5 (z_7 (1 - \rho) + 3_{\text{ууд}}^{\Psi} (1 - g_o)) \right]}{\mu_p \pi d_{\text{внут}} (1 - k_3)}. \quad (37)$$

С использованием полученных результатов задача определения оптимальной системы энергоснабжения дождевальной машины упрощается. Однако количественная оценка обобщающего критерия эффективности не гарантирует получения единственного решения. Причина в том, что критерий эффективности всегда определяет оптимальную систему по условиям, например:

$$1 \text{ случай} - V_{\text{крГ}} < V_{\text{крЭ}}; \quad (38)$$

$$2 \text{ случай} - V_{\text{крГ}} > V_{\text{крЭ}}; \quad (39)$$

$$3 \text{ случай} - V_{\text{крГ}} = V_{\text{крЭ}}. \quad (40)$$

Очевидно, что в первом случае лучше гидравлическая система, во втором – электрическая, а в третьем обе системы обладают одинаковой эффективностью. Таким образом, имеют место случаи неоднозначного выбора, так

называемый пологий оптимум. Поэтому сравнение показателей эффективности необходимо рассмотреть на основе векторного синтеза.

При дискретном выборе системы энергоснабжения множество  $M_\delta$  допустимых вариантов (систем) состоит из конечного числа решений  $A_1, A_2, \dots, A_m$ . На рисунке 6 приведено множество  $M_\delta$ , содержащее  $m$  вариантов. Каждой точке  $A_i$  соответствует некоторое значение  $k_1 = \langle k_2, k_3, k_4, k_5, k_6, k_7 \rangle$  вектора и условий эксплуатации ДМ:  $k_1 = \langle z_1, z_2, z_3, z_4, z_5, z_6, z_7 \rangle$  (условные обозначения таблицы 3). Из множества вариантов не все являются лучшими. Требуется выполнение условия минимума показателя эффективности  $V_{кр}(k_1) \rightarrow \min$ . Очевидно, что те варианты, которые являются худшими, при выборе допускается не учитывать.

Изобразить зависимость показателя качества  $k_1$  при действии всех факторов (рисунок 6) невозможно. Рассмотрим изменение  $k_1$  с учетом функционально-структурной эффективности вариантов и весовых коэффициентов в двумерной системе координат, где параметрами по осям ординат и абсцисс принимаются показатели таблицы 3 (рисунок 7).

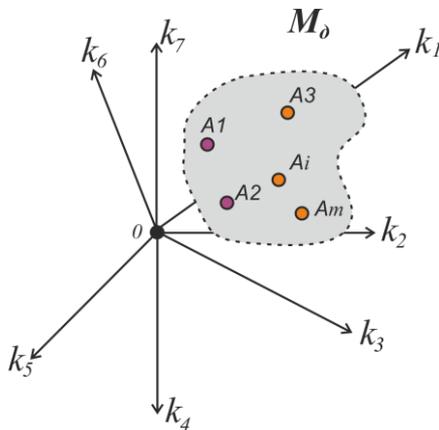


Рисунок 6 – Множество допустимых вариантов энергоснабжения в пространстве показателей качества

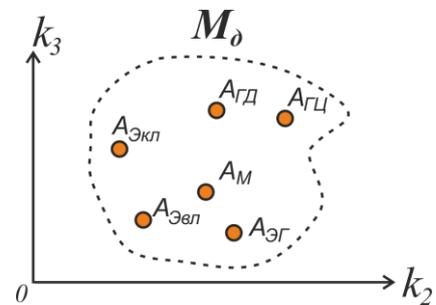


Рисунок 7 – Множество допустимых вариантов энергоснабжения в двумерной системе координат показателей качества

Рассмотрим точку  $A_{ГД}$  (см. рисунок 7). Эта точка является худшей, так как в множестве  $M_\delta$  существует безусловно лучшая точка (например, точка  $A_M$ ). Точка  $A_M$  также худшая, так как существует безусловно лучшая по сравнению с ней точка (точка  $A_{Эвл}$ ). Точка  $A_{ЭГ}$  оказывается нехудшей, так как в множестве  $M_\delta$  не существует безусловно лучшей по сравнению с нею точки (например, точки  $A_{Экп}$  и  $A_{ГД}$  имеют большие значения показателя  $k_3$ ).

Множество  $M'_\delta$ , которое содержит большее число вариантов, имеет вид, изображенный на рисунке 8. Отыскание множества  $M'_н$  всех нехудших вариантов возможно на основе графического метода прямоугольника.

Метод определения границ по рабочим характеристикам в случае двух показателей качества сводится к нахождению любой из следующих двух рабочих характеристик:

$$k_{1\min} = f_{p1}(k_2); \quad (41)$$

$$k_{2\min} = f_{p2}(k_1). \quad (42)$$

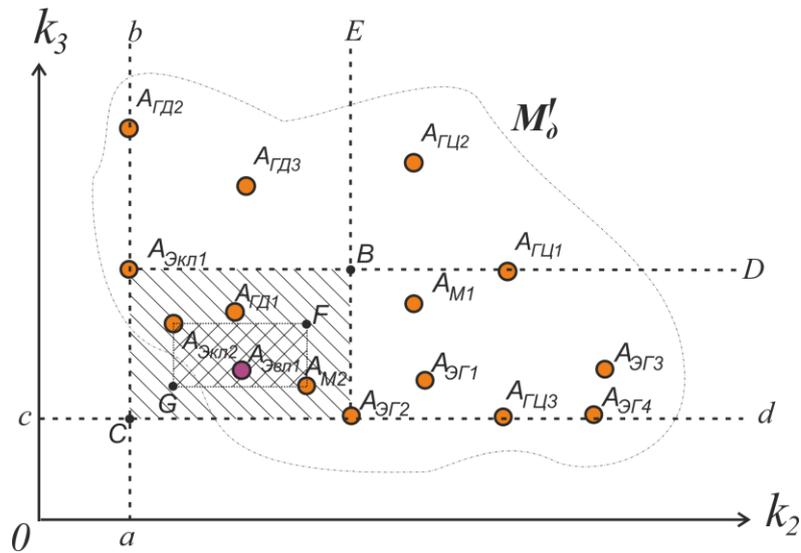


Рисунок 8 – Множество допустимых систем  $M'_d$  по методу прямоугольника

Рабочая характеристика (41) для множества  $M'_d$  примет вид, представленный на рисунке 9. Минимизацию осуществляют для всех допустимых значений показателя  $k_2$ . Она включает в себя все нехудшие точки ( $A_{Экп1} - A_{Экп4}$ ), а также ряд худших точек ( $A_{Эвл1} - A_{Эвл4}$ ,  $A_{ЭГ1} - A_{ЭГ4}$ ,  $A_{Акб1} - A_{Акб4}$ ,  $A_{М1} - A_{М2}$ ,  $A_{ГД1} - A_{ГД4}$ ,  $A_{ГЦ1} - A_{ГЦ4}$ ).

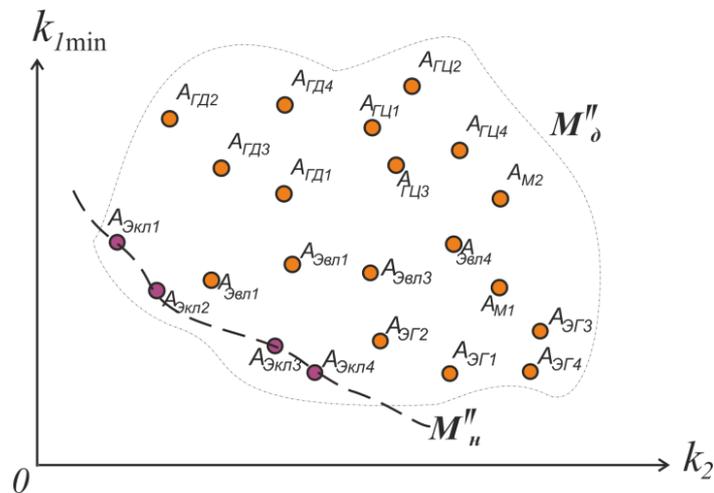


Рисунок 9 – Множество допустимых  $M'_d$  и нехудших  $M''_н$  вариантов рабочей характеристики зависимости (43)

При известных условиях эксплуатации дождевальная машина необходимо определить оптимальную систему из следующих возможных вариантов: ГД – гидропривод с гидродвигателем вращательного действия; ГЦ – гидропривод с гидродвигателем возвратно-поступательного действия; М – механический привод; Э<sub>кп</sub> – электропривод с кабельной линией; Э<sub>вл</sub> – электропривод с воздушной линией; Э<sub>г</sub> – электропривод с переносным генератором; Э<sub>акб</sub> – электропривод с аккумуляторными батареями. Это сводится к решению системы уравнений:

$$\begin{aligned}
k_{1\Gamma Di} &= \frac{1,1z_1z_2(b+k_{2\Gamma Di}z_2)\sqrt{\frac{\rho_B}{2z_4}}(k_{4\Gamma Di}B_1+\Pi_p(b+k_{2\Gamma Di}z_2))\frac{1,1z_1z_2}{\mu_p\pi d_{\text{внут}}}\sqrt{\frac{\rho_B}{2z_4}}+(t_{1M}z_5+t'_{1M}z_6+t_{1\text{кг}}k_{7\Gamma Di})\tau_{\text{ч}}+k_{5\Gamma Di}B_2(z_7(1-\rho)+3_{\text{ууд}}^{\Psi}(1-g_o))}{\mu_p\pi d_{\text{внут}}(1-k_{3\Gamma Di}B_3)}k_{\text{орг}\Gamma D}, \\
k_{1\Gamma Цi} &= \frac{1,1z_1z_2(b+k_{2\Gamma Цi}z_2)\sqrt{\frac{\rho_B}{2z_4}}(k_{4\Gamma Цi}B_1+\Pi_p(b+k_{2\Gamma Цi}z_2))\frac{1,1z_1z_2}{\mu_p\pi d_{\text{внут}}}\sqrt{\frac{\rho_B}{2z_4}}+(t_{1M}z_5+t'_{1M}z_6+t_{1\text{кг}}k_{7\Gamma Цi})\tau_{\text{ч}}+k_{5\Gamma Цi}B_2(z_7(1-\rho)+3_{\text{ууд}}^{\Psi}(1-g_o))}{\mu_p\pi d_{\text{внут}}(1-k_{3\Gamma Цi}B_3)}k_{\text{орг}\Gamma Ц}, \\
k_{1Mi} &= \frac{1,1z_1z_2(b+k_{2Mi}z_2)\sqrt{\frac{\rho_B}{2z_4}}(k_{4Mi}B_1+\Pi_p(b+k_{2Mi}z_2))\frac{1,1z_1z_2}{\mu_p\pi d_{\text{внут}}}\sqrt{\frac{\rho_B}{2z_4}}+(t_{1M}z_5+t'_{1M}z_6+t_{1\text{кг}}k_{7Mi})\tau_{\text{ч}}+k_{5Mi}B_2(z_7(1-\rho)+3_{\text{ууд}}^{\Psi}(1-g_o))}{\mu_p\pi d_{\text{внут}}(1-k_{3Mi}B_3)}k_{\text{орг}M}, \\
k_{1\text{Экли}} &= \frac{1,1z_1z_2(b+k_{2\text{Экли}}z_2)\sqrt{\frac{\rho_B}{2z_4}}(k_{4\text{Экли}}B_1+\Pi_p(b+k_{2\text{Экли}}z_2))\frac{1,1z_1z_2}{\mu_p\pi d_{\text{внут}}}\sqrt{\frac{\rho_B}{2z_4}}+(t_{1M}z_5+t'_{1M}z_6+t_{1\text{кг}}k_{7\text{Экли}})\tau_{\text{ч}}+k_{5\text{Экли}}B_2(z_7(1-\rho)+3_{\text{ууд}}^{\Psi}(1-g_o))}{\mu_p\pi d_{\text{внут}}(1-k_{3\text{Экли}}B_3)}k_{\text{орг}\text{Экл}}, \\
k_{1\text{Эвли}} &= \frac{1,1z_1z_2(b+k_{2\text{Эвли}}z_2)\sqrt{\frac{\rho_B}{2z_4}}(k_{4\text{Эвли}}B_1+\Pi_p(b+k_{2\text{Эвли}}z_2))\frac{1,1z_1z_2}{\mu_p\pi d_{\text{внут}}}\sqrt{\frac{\rho_B}{2z_4}}+(t_{1M}z_5+t'_{1M}z_6+t_{1\text{кг}}k_{7\text{Эвли}})\tau_{\text{ч}}+k_{5\text{Эвли}}B_2(z_7(1-\rho)+3_{\text{ууд}}^{\Psi}(1-g_o))}{\mu_p\pi d_{\text{внут}}(1-k_{3\text{Эвли}}B_3)}k_{\text{орг}\text{Эвл}}, \\
k_{1\text{ЭГi}} &= \frac{1,1z_1z_2(b+k_{2\text{ЭГi}}z_2)\sqrt{\frac{\rho_B}{2z_4}}(k_{4\text{ЭГi}}B_1+\Pi_p(b+k_{2\text{ЭГi}}z_2))\frac{1,1z_1z_2}{\mu_p\pi d_{\text{внут}}}\sqrt{\frac{\rho_B}{2z_4}}+(t_{1M}z_5+t'_{1M}z_6+t_{1\text{кг}}k_{7\text{ЭГi}})\tau_{\text{ч}}+k_{5\text{ЭГi}}B_2(z_7(1-\rho)+3_{\text{ууд}}^{\Psi}(1-g_o))}{\mu_p\pi d_{\text{внут}}(1-k_{3\text{ЭГi}}B_3)}k_{\text{орг}\text{ЭГ}}, \\
k_{1\text{Эакбi}} &= \frac{1,1z_1z_2(b+k_{2\text{Эакбi}}z_2)\sqrt{\frac{\rho_B}{2z_4}}(k_{4\text{Эакбi}}B_1+\Pi_p(b+k_{2\text{Эакбi}}z_2))\frac{1,1z_1z_2}{\mu_p\pi d_{\text{внут}}}\sqrt{\frac{\rho_B}{2z_4}}+(t_{1M}z_5+t'_{1M}z_6+t_{1\text{кг}}k_{7\text{Эакбi}})\tau_{\text{ч}}+k_{5\text{Эакбi}}B_2(z_7(1-\rho)+3_{\text{ууд}}^{\Psi}(1-g_o))}{\mu_p\pi d_{\text{внут}}(1-k_{3\text{Эакбi}}B_3)}k_{\text{орг}\text{Эакб}}
\end{aligned} \tag{43}$$

где  $v_1, v_2, v_3$  – весовые коэффициенты соответственно показателя стоимости, надежности и потерь энергии.

Для ускорения расчетов обобщенного критерия  $k_1$  по отдельным единичным показателям в соответствии с системой уравнений (43) разработаны алгоритм (рисунок 10) и программа на базе Microsoft Excel (рисунок 11) поиска оптимальной системы энергоснабжения.

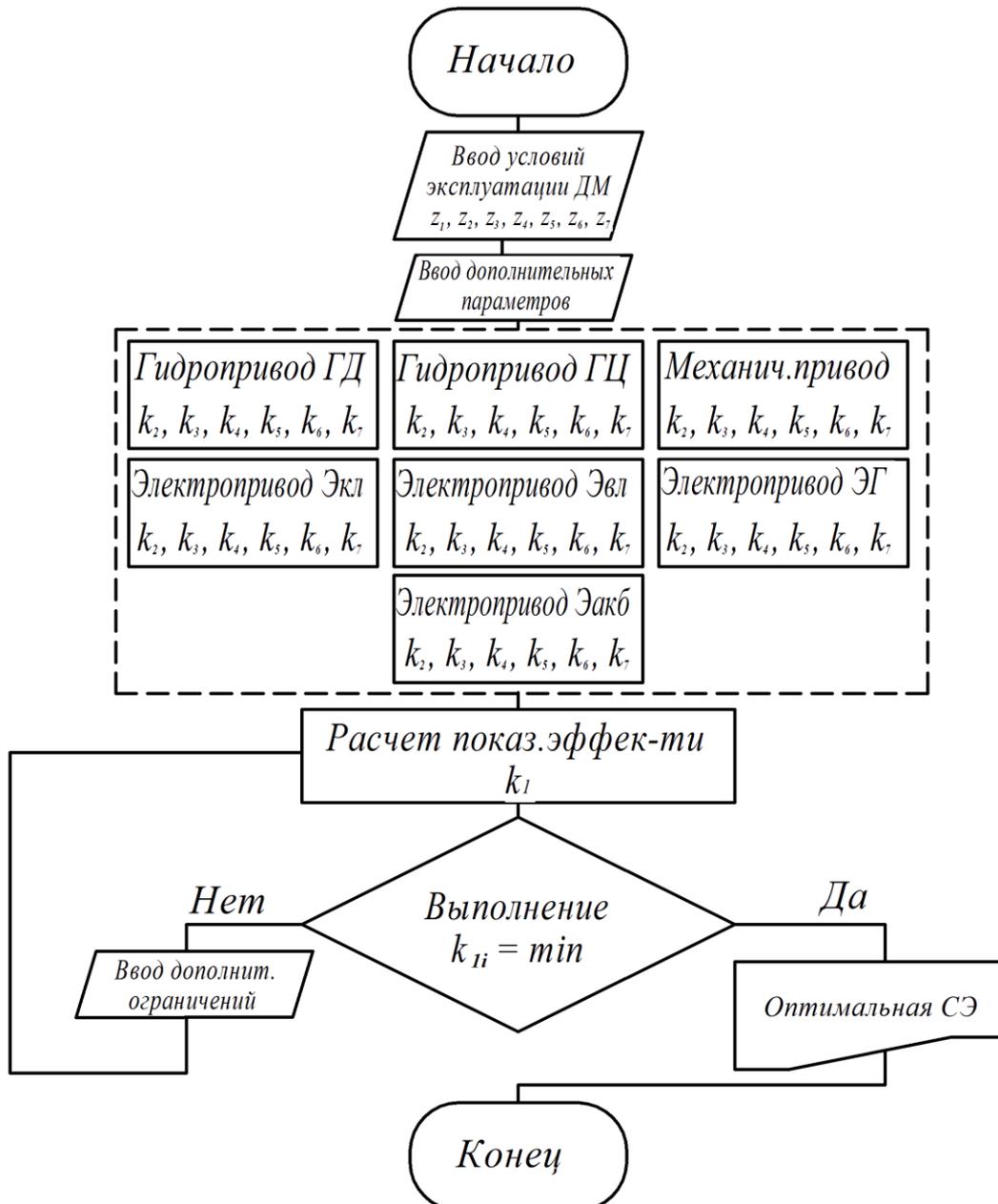


Рисунок 10 – Упрощенная блок-схема алгоритма выбора оптимальной СЭ ДМ

Расположения зон оптимальных систем энергоснабжения приведены на рисунках 12–14 с нелинейной шкалой изменения входных параметров.

При изменении площади поливного участка  $S (z_2)$  и входного давления  $p (z_4)$  на рисунке 12 расположились зоны всех рассматриваемых вариантов систем. ДМ с наружным диаметром трубопровода  $d = 259$  мм, эксплуатируемая в условиях удаленности поливного участка от централизованной энергосистемы и водоема  $l_{\text{нп}} = l_{\text{в}} = 1000$  м с оросительной нормой  $m_{\text{он}} = 1000$  м<sup>3</sup>/га и максимальной

прибылью от полива в 20 тыс.руб. на площади поливного участка  $S = 10$  га с высоким входным давлением  $p > 0,6$  МПа, наименьшие энергопотребление и эксплуатационные затраты будет иметь с системой гидропривода вращательного действия, так как при этих данных обобщающий критерий эффективности СЭ имеет наименьшее значение.

Показатели качества гидропривода с гидродвигателем		Вес показателей												
k2	k3	k4	k5	k6	k7	корг	k3	k4	k5	λ	ν			
0,11	0,5	куд*z2	0,17	28000	куд*z2	0,22	0,37	0,39	0,28	0,024	1			
z1		z2	z3	z4	z5	z6	z7							
1000		100	400000	0,65	1000	1000	200000							
цр	d	b	t <sub>лм</sub>	t' <sub>лм</sub>	t <sub>лг</sub>	τ	ρв	ψ <sub>гвд</sub>	ρ	g				
5	0,219	2	0,02	0,01	0,05	100	1000	2	0,9	0,9				
1	k1	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33	36	39
z1	100	0,008170	0,035998	0,090719	0,179914	0,311506	0,493766	0,735306	1,045086	1,432408	1,906919	2,478612	3,157824	3,9552
200		0,017772	0,079459	0,202654	0,406330	0,710834	1,137896	1,710622	2,453496	3,392381	4,554517	5,968526	7,664404	9,6735
300		0,028805	0,130382	0,335806	0,679248	1,197985	1,932392	2,925948	4,225230	5,879919	7,942795	10,469741	13,519740	17,1548

Рисунок 11 – Внешний вид интерфейса программы в Microsoft Excel

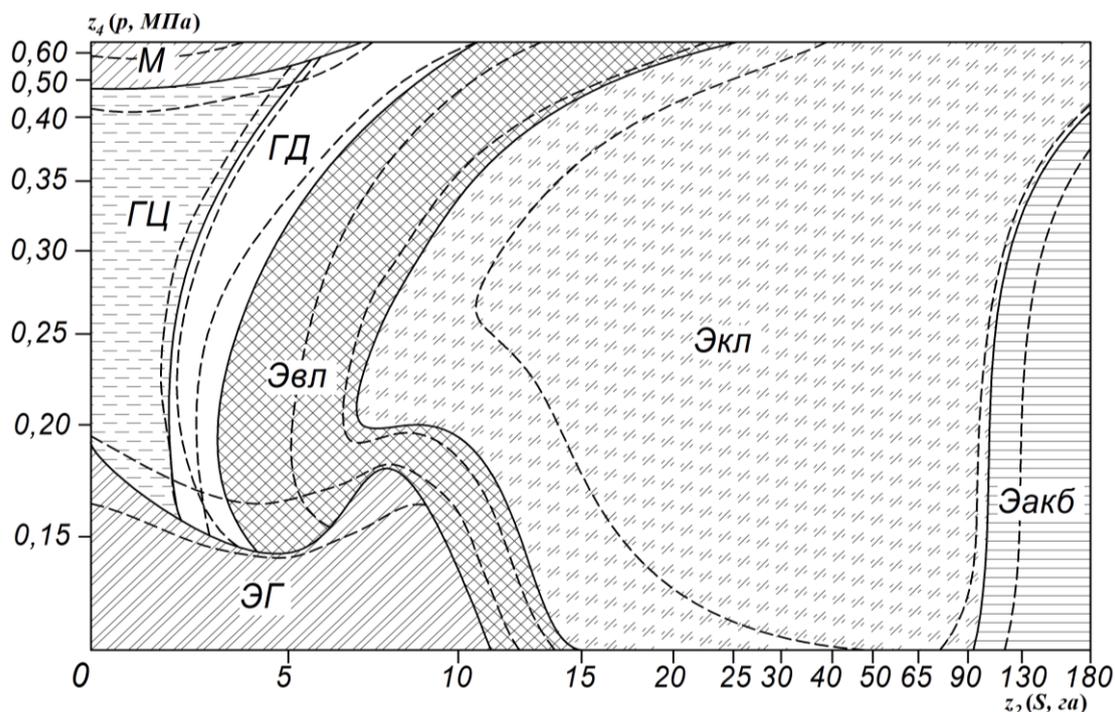


Рисунок 12 – Зоны оптимальных вариантов систем энергоснабжения ДМ при условии:  $d = 259$  мм;  $l_{\text{лп}} = 1000$  м;  $l_{\text{в}} = 1000$  м;  $m_{\text{он}} = 1000$  м<sup>3</sup>/га;  $\Delta\Pi = 20$  тыс. руб.

Если же при тех же исходных данных площадь поливного участка  $S > 50$  га, то оптимальной становится система электропривода с питанием от кабельной линии. Однако при тех же исходных данных и площади  $S = 10$  га с входным давлением  $p < 0,15$  МПа оптимальной будет система электропривода с питанием от переносного генератора. Это обусловлено совокупностью влияющих на каждую систему показателей качества (надежности, стоимости, цены на ресурс и т. п.). Большая зона оптимальности характерна для систем электропривода с питанием

от кабельной линии и аккумуляторной батареи. Это связано со сравнительно низкими показателями мощности  $k_2$  и высокими значениями функционально-структурной эффективности данных систем.

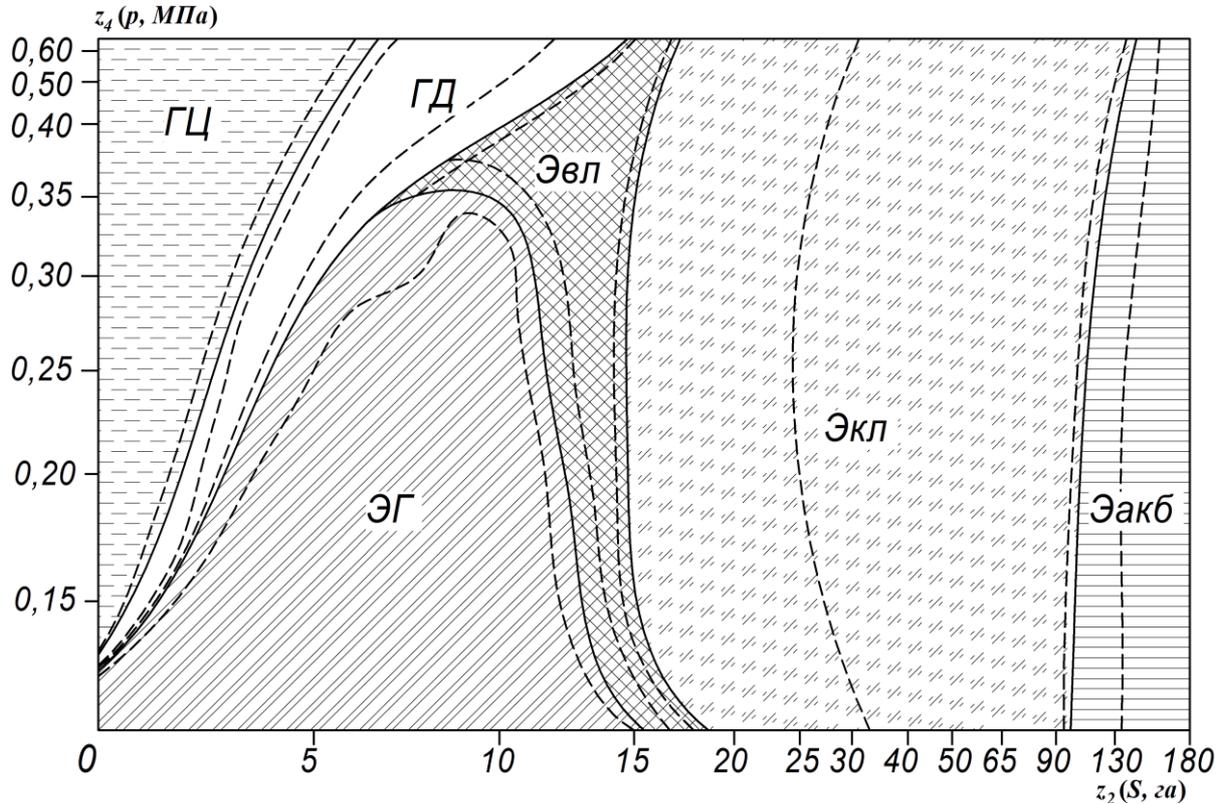


Рисунок 13 – Зоны оптимальных вариантов систем энергоснабжения ДМ при условии:  $d = 219$  мм;  $l_{\text{нп}} = 1000$  м;  $l_{\text{в}} = 1000$  м;  $m_{\text{он}} = 1000$  м<sup>3</sup>/га;  $\Delta\Pi = 200$  тыс. руб.

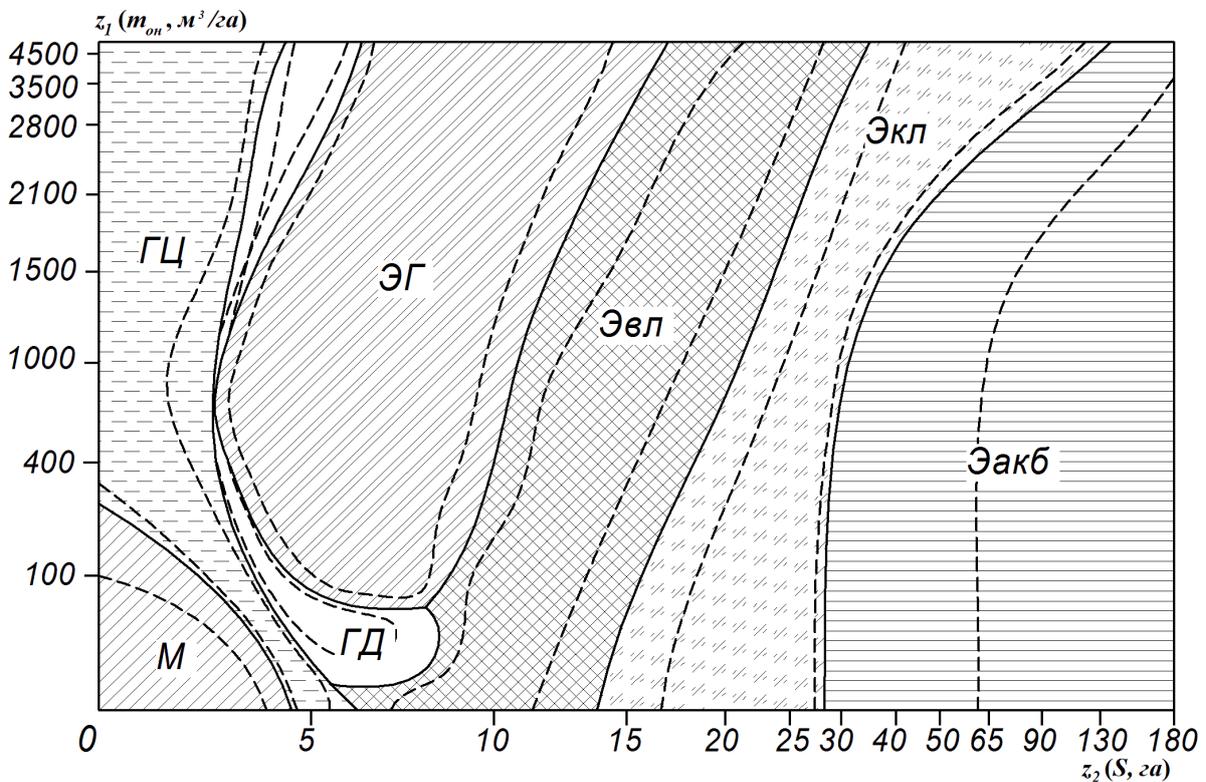


Рисунок 14 – Зоны оптимальных вариантов систем энергоснабжения ДМ при условии:  $d = 159$  мм;  $l_{\text{нп}} = 1000$  м;  $l_{\text{в}} = 1000$  м;  $p = 0,25$  МПа;  $\Delta\Pi = 200$  тыс. руб.

Если же ДМ будет иметь трубопровод диаметром  $d = 219$  мм, а прирост урожая от полива оценен в 200 тыс. руб. ( $l_{\text{пн}} = l_{\text{в}} = 1000$  м;  $m_{\text{он}} = 1000$  м<sup>3</sup>/га – см. рисунок 13), то зоны применения гидропривода расширяются, а также увеличивается зона ЭГ. Однако они применимы на малых поливных площадях ( $S < 20$  га). Для больших поливных площадей ( $S > 20$  га) оптимальными также являются Экл и Эакб. Пунктирными линиями на рисунках 12–14 показаны смежные части пересечения зон оптимальности в пределах статистической ошибки расчетов значений обобщающего критерия эффективности  $k_1$ .

Зоны оптимальных систем при изменении оросительной нормы  $m_{\text{он}}$  и площади поливного участка показаны на рисунке 14. При малых поливных нормах и площади полива ( $m_{\text{пн}} < 300$  м<sup>3</sup>/га;  $S < 5$  га) оптимальной будет система с механическим приводом, причем с увеличением диаметра (с 159 до 259 мм) и давления на входе в ДМ (с 0,25 до 0,45 МПа) ее зона расширится.

В большинстве случаев оптимальной является система с электроприводом.

**В четвертой главе «Способы и технические средства повышения энергоэффективности электрифицированных дождевальными машинами кругового действия»** рассмотрены способы снижения энергопотребления и представлены разработанные средства, позволяющие повысить энергоэффективность дождевальных машин кругового действия.

Энергопотребление электроприводов опорных тележек секций ДМ зависит от многих факторов, в том числе от нагрузки на валу электроприводов.

Мощность, потребляемая электродвигателем опорной тележки секции:

$$P_{\text{двТ1}} = \frac{\mu \left[ b_{\text{ст}}^2 (G - B) + b_{\text{ст}} d (B - G) + G \frac{d^2}{4} + P_{\text{вО}} \right] r \omega_{\text{дв}}}{i \eta_{\text{дв}} \eta_{\text{пер}}}, \quad (44)$$

где  $b_{\text{ст}}$  – толщина стенки трубопровода, м;  $d$  – диаметр трубопровода, м;  $\mu$  – коэффициент сцепления колес с грунтом;  $r$  – радиус колес, м;  $\omega_{\text{дв}}$  – угловая скорость электродвигателя, рад/с;  $B$  и  $G$  – постоянные, зависящие от плотности стали и поливной воды, ускорения свободного падения и длины трубопровода ( $l = 65$  м),  $B = 16,54$  МН/м<sup>2</sup>;  $G = 2,00$  МН/м<sup>2</sup>;  $\eta_{\text{дв}}$  и  $\eta_{\text{пер}}$  – КПД электродвигателя и передачи;  $P_{\text{вО}}$  – вес опоры секции, Н.

Допустим, что при снижении диаметра трубопровода на величину  $\Delta d$  в пределах одной секции ДМ эта мощность изменится на величину  $\Delta P'$ :

$$\Delta d = \frac{d - d_0}{d}, \quad (45)$$

или

$$d_0 = d (1 - \Delta d), \quad (46)$$

$$\Delta P' = 1 - \frac{b_{\text{ст}}^2 (G - B) + b_{\text{ст}} d (B - G) \left[ \frac{2 - \Delta d}{2} \right] + G \frac{d^2}{4} \left[ \frac{(2 - \Delta d)^2}{4} \right] + P_{\text{вО}}}{b_{\text{ст}}^2 (G - B) + b_{\text{ст}} d (B - G) + G \frac{d^2}{4} + P_{\text{вО}}}, \quad (47)$$

где  $d$  – наружный диаметр в начале трубопровода,  $d = d_{\text{внут}} + 2b_{\text{ст}}$ , м;  $d_0$  – наружный диаметр в конце трубопровода,  $d_0 = d_{\text{внут0}} + 2b_{\text{ст}}$ , м.

Плавное снижение диаметра на 50 % изменяет нагрузку на электропривод на 32–35 % (рисунок 15), однако при этом увеличиваются потери давления в 1,5 раза относительно потерь давления по длине при неизменном диаметре.

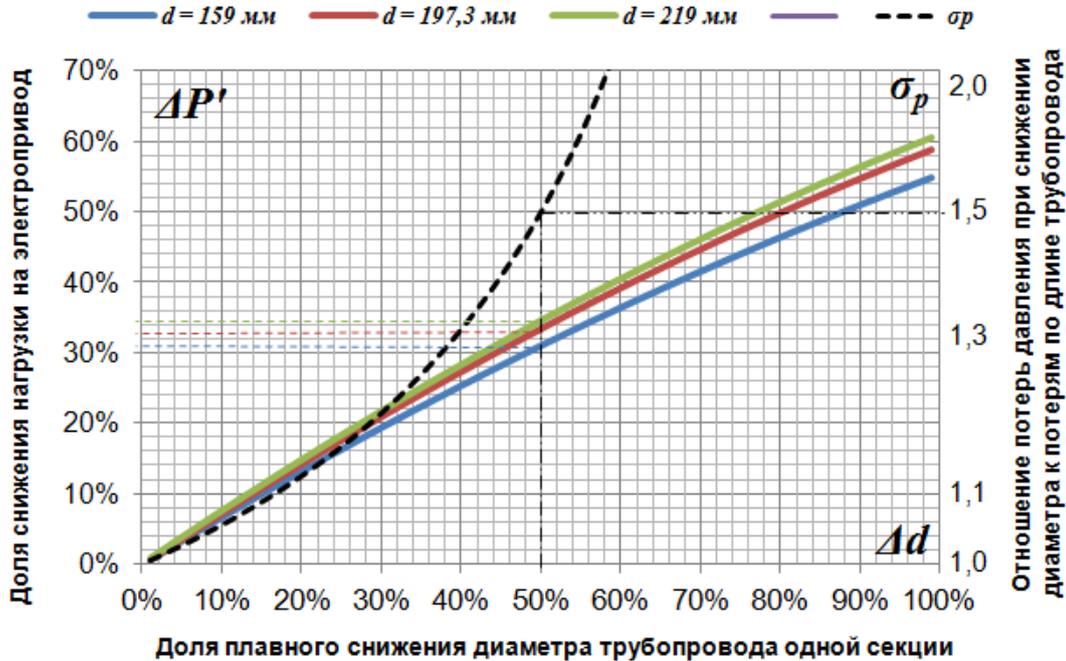


Рисунок 15 – Зависимость доли снижения нагрузки электропривода от плавного снижения диаметра водораспределительного трубопровода

Плавное снижение диаметра водораспределительного трубопровода является ориентиром для максимально возможного снижения мощности. Эффект снижения энергопотребления можно получить при дискретном уменьшении диаметра (рисунок 16).

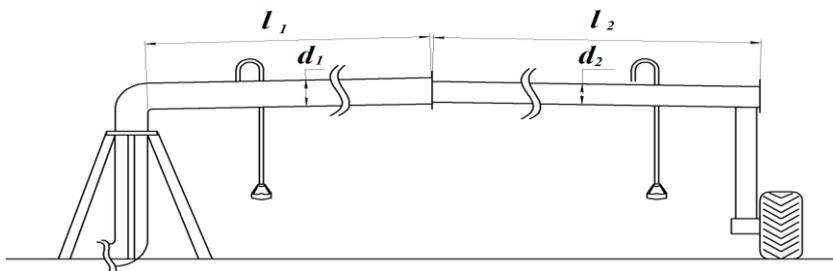


Рисунок 16 – Вид одноступенчатого снижения диаметра водораспределительного трубопровода одной секции ДМ

Тогда потребляемая электродвигателем мощность:

$$P''_{\text{двГ1-1/2}} = \frac{\mu r \omega_{\text{дв}}}{i \eta_{\text{дв}} \eta_{\text{пер}}} \left[ b_{\text{ст}}^2 (G' - B')(l_1 + l_2) + b_{\text{ст}} (B' - G')(d_1 l_1 + d_2 l_2) + \frac{G'}{4} (d_1^2 l_1 + d_2^2 l_2) + P_{\text{во}} \right], \quad (48)$$

где  $l_1$  и  $l_2$  – длины трубопровода в секции соответственно диаметром  $d_1$  и  $d_2$ , м;  $B'$  и  $G'$  – постоянные, зависящие от плотностей стали, поливной воды и ускорения свободного падения,  $B' = 240,3 \text{ кН/м}^2$ ;  $G' = 30,8 \text{ кН/м}^2$ .

Если представить длину первого участка  $l_1$  с диаметром  $d_1$  как

$$\frac{l_1}{l} = a, \quad (49)$$

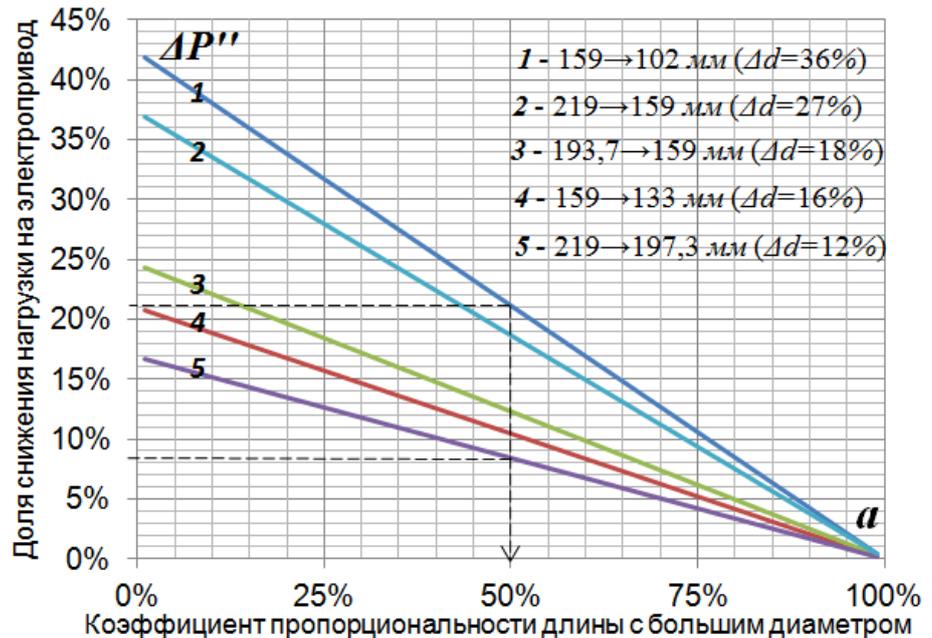
то

$$l_2 = l(1 - a), \quad (50)$$

где  $a$  – коэффициент пропорциональности длины  $l_1$  с большим диаметром ( $d_1 > d_2$ ) ближайшего стандартного значения на величину  $\Delta d$  ( $0 < a < 1$ ).

Тогда доля снижения нагрузки электропривода при одинаковой толщине стенок этих трубопроводов ( $b_{ст1} = b_{ст2} = b_{ст}$ ) (рисунок 17).

Рисунок 17 –  
Зависимость изменения нагрузки электропривода от ступенчатого снижения диаметра одной секции ДМ и пропорциональности длины  $a$  (при  $l = 65$  м) стандартных значений диаметров



Уменьшение диаметра на одну ступень при длине пролета секции  $l = 65$  м и коэффициенте пропорциональности длины  $a = 50$  % (например, длиной  $l_1$  выполнен трубопровод диаметром  $d_1 = 159$  мм, а длиной  $l_2$  – диаметром  $d_2 = 102$  мм, доля снижения диаметра  $\Delta d = 36$  %) потребляемая мощность электродвигателя опорной тележки снижается на 8,7–21,5 %. Максимальное снижение мощности наблюдается при переходе с 159 на 102 мм – 21,5 % (при  $\Delta d = 36$  %), а минимальное – при переходе с 219 на 193,7 мм – 8,7 % (при  $\Delta d = 12$  %).

Снижение энергопотребления при ступенчатом изменении диаметра по секциям (рисунок 18) зависит от времени работы электропривода каждой тележки.

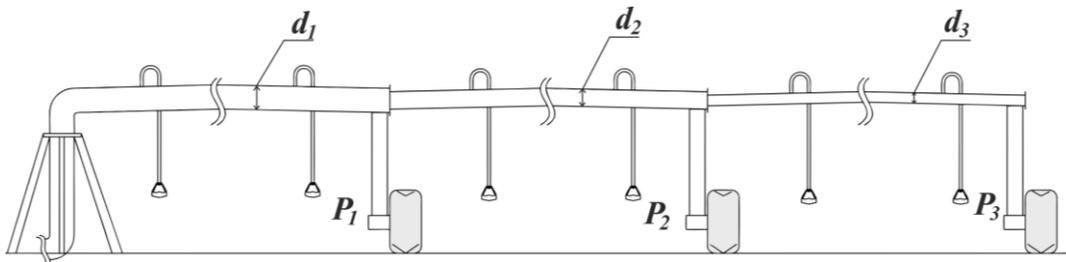


Рисунок 18 – Вид ступенчатого уменьшения диаметра трубопровода по секциям ДМ

Потребленная энергия:

$$W = P_{двТ1}t_{p1} + P_{двТ2}t_{p2} + \dots + P_{двТn}t_{pn}, \quad (51)$$

где  $t_{p1}, t_{p2}, \dots, t_{pn}$  – продолжительность работы 1-го, 2-го, ...,  $n$ -го электродвигателя мощностью  $P_{двТ1}, P_{двТ2}, \dots, P_{двТn}$ , ч.

При одноступенчатом уменьшении диаметра ДМ количество секций с большим диаметром  $d_1$  обозначим  $n_1$ :

$$n_1 = un, \quad (52)$$

где  $n$  – общее количество секций ДМ;  $u$  – коэффициент пропорциональности секций с большим диаметром  $d_1$  к общему числу секций  $n$ ,  $0 < u < 1$ .

Тогда количество секций с меньшим диаметром  $d_2$ :

$$n_2 = n(1 - u). \quad (53)$$

Снижение энергопотребления дождевальной машиной  $\Delta W$  в этом случае:

$$\Delta W = \frac{W - W_1}{W} = 1 - \frac{\left[ un \left( \frac{1 + un}{2} \right) + n(1 - u)(1 - \Delta P^n) \left( \frac{un + 1 + n}{2} \right) \right]}{n \left[ \frac{1 + n}{2} \right]}, \quad (54)$$

где  $\Delta P^n$  – доля изменения мощности электродвигателя опорных тележек для секций  $n_2$  с меньшим диаметром трубопровода.

При  $u = 50\%$  снижение энергопотребления достигает 7,3–21,8% в зависимости от ступени изменения диаметров и, соответственно, доли снижения нагрузки электропривода (рисунок 19).

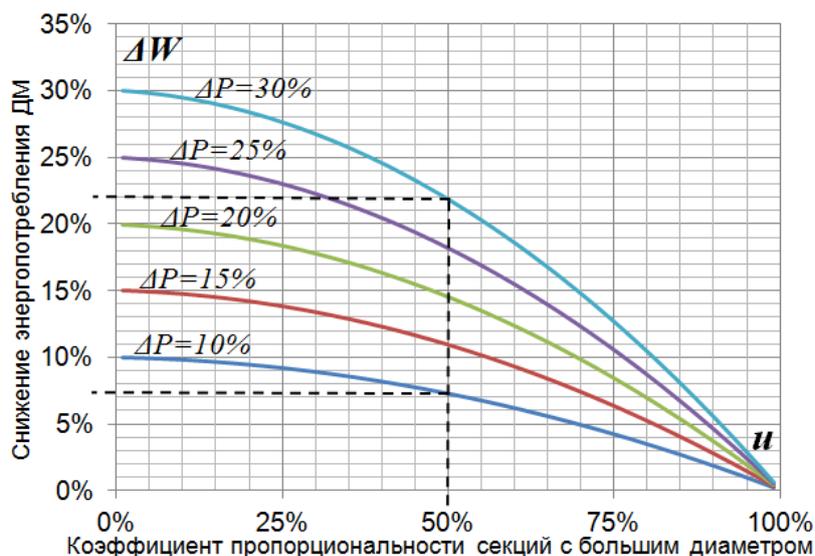


Рисунок 19 – Зависимость изменения энергопотребления при одноступенчатом уменьшении диаметра ДМ с коэффициентом пропорциональности  $u$  с количеством секций  $n = 10$  стандартных значений диаметров при пропорциональном снижении нагрузки электропривода на 10–30%

Уменьшение диаметра трубопровода сопровождается увеличением нагрузки насоса водоподачи. Оценим совокупное изменение энергопотребления полива  $\Delta W_{\Pi}$  (ДМ и насоса водоподачи) при изменении диаметра водораспределительного трубопровода на величину  $\Delta d$ :

$$\Delta W_{\Pi} = \pi_{\text{ДМ}} \Delta W + \pi_{\text{нас}} \Delta W_{\text{нас}}, \quad (55)$$

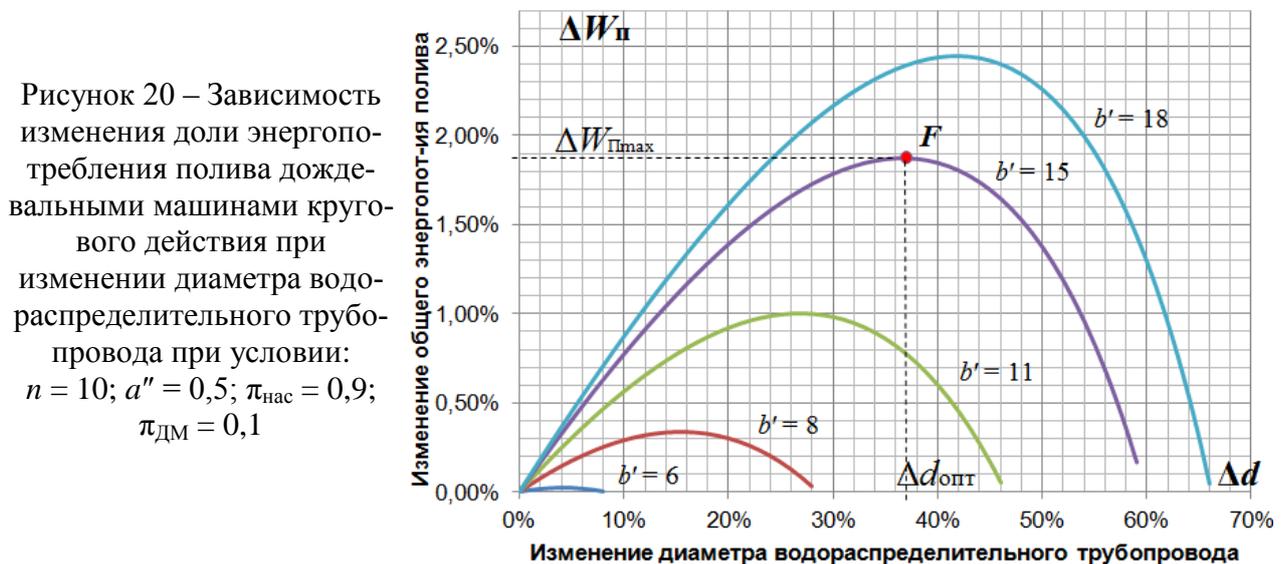
где  $\pi_{\text{ДМ}}$  и  $\pi_{\text{нас}}$  – критерии подобия соответственно энергопотребления ДМ на водораспределение и энергопотребления насоса водоподачи,  $\Delta W_{\text{нас}}$  – доля изменения энергопотребления насоса водоподачи.

Учитывая ограничения подачи насоса, определим условия, при которых достигается снижение энергопотребления полива:

$$\Delta W_{\Pi} = \pi_{\text{нас}} \left[ 1 - \frac{b' + \left( \frac{a''(1 - \Delta d) + (1 - a'')}{1 - \Delta d} \right)}{b' + 1} \right] +$$

$$+ \pi_{\text{ДМ}} \left[ 1 - \frac{\left[ a'' \left( \frac{1 + a''n}{2} \right) + (1 - a'')(1 - 1,4\Delta d) \left( \frac{a''n + 1 + n}{2} \right) \right]}{\left[ \frac{1 + n}{2} \right]} \right], \quad (56)$$

где  $b'$  – коэффициент, учитывающий отношение суммы статического напора и потерь напора в водоподводящем трубопроводе оросительной сети к потерям напора в водораспределительном трубопроводе;  $a''$  – доля секций ДМ с большим диаметром;  $n$  – общее количество секций ДМ.



При изменении (уменьшении) диаметра водораспределительного трубопровода на величину  $\Delta d$ , начиная с середины ( $a'' = 0,5$ ), для дождевальной машины, состоящей из 10 секций ( $n = 10$ ), увеличивается нагрузка на электродвигатель насоса водоподдачи, но в то же время снижается нагрузка на электропривод опорных тележек. Если же дождевальная машина расположена на значительном расстоянии от водоема (насоса водоподдачи) так, что при той же подаче насоса сумма статического напора и потерь на трение водоподводящего трубопровода будет в 15 и более раз больше потерь на трение водораспределительного трубопровода ДМ ( $b' = 15$ , фиолетовая линия рисунка 20), то при снижении диаметра до оптимального значения ( $\Delta d_{\text{опт}} = 37\%$ ) находим точку  $F$  на рисунке 20, которая соответствует максимальному снижению общего энергопотребления полива на 1,9 % в том случае, когда энергопотребление насоса водоподдачи от общего энергопотребления составляет 90 % ( $\pi_{\text{нас}} = 0,9$ ).

Тип колеса (жесткое или с пневматической шиной) также влияет на потребляемую мощность двигателя электропривода. Деформируемое колесо характеризуется нормальной, тангенциальной и поперечной деформациями. Движение ДМ по окружности вызывает действие всех деформаций даже при малых

скоростях. Потребляемые мощности, обеспечивающие движение колес на пневматических шинах  $P_{\text{двПШ}}$  и жестких колес  $P_{\text{двЖК}}$ , различаются. При равных габаритных размерах колес мощность для жесткого колеса будет отличаться на величину  $\Delta P'''$  (рисунок 21):

$$\Delta P''' = \frac{P_{\text{двПШ}} - P_{\text{двЖК}}}{P_{\text{двЖК}}} = \frac{(F_{\text{СК}} + F_y)(1 - \sigma) - F_{\text{СК}}}{F_{\text{СК}}} = \frac{\left( \mu + k_{\text{корд}} \sqrt[3]{\frac{x_{\text{ПШ}}}{2r}} \right) (1 - \sigma)}{\mu}, \quad (57)$$

где  $F_{\text{СК}}$  – сила трения качения, Н;  $\sigma$  – коэффициент проскальзывания (буксирования), на который уменьшается свободный радиус колеса;  $F_y$  – сила упругости нормальной, тангенциальной и поперечной деформаций шины колеса, Н;  $k_{\text{корд}}$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от профиля, типа корда шины,  $k_{\text{корд}} = 0,1 \dots 0,8$ ;  $x_{\text{ПШ}}$  – значение средней деформации шины (при оптимальном давлении воздуха в ней), определяющая гистерезисные потери сжатия и восстановления, м;  $r$  – статический радиус колеса, м.

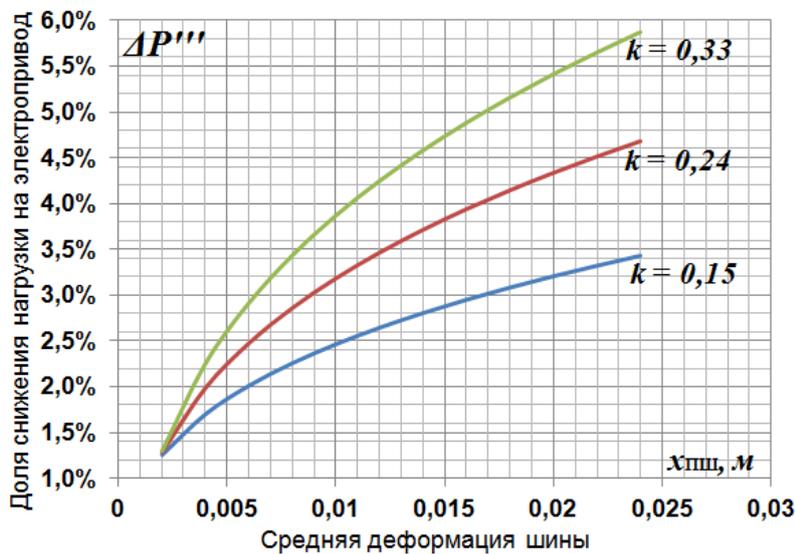


Рисунок 21 – Доля изменения нагрузки на электропривод при коэффициентах пропорциональности пневматических шин  $k_{\text{корд}1} = 0,15$ ;  $k_{\text{корд}2} = 0,24$ ;  $k_{\text{корд}3} = 0,33$  и средней деформации колеса  $x_{\text{ПШ}}$

Нагрузка на электропривод на 1,25–5,87 % ниже у жестких колес, чем у колес на пневматических шинах при одинаковом радиусе (см. рисунок 21).

Развитие технологий изготовления электрохимических источников тока открывает возможность их применения для питания мобильных сельскохозяйственных машин, например, для тех условий эксплуатации ДМ, где оптимальным является автономный аккумуляторный источник питания. Для электродвигательной нагрузки предназначены тяговые аккумуляторные батареи (ТАБ).

Аккумуляторный источник питания ДМ размещают на каждой опорной тележке около электропривода. Электрическая схема замещения представлена на рисунке 22.

Мощность нагрузки  $P_n$  и продолжительность  $t_p$  потребления определяют энергию разряда ТАБ:

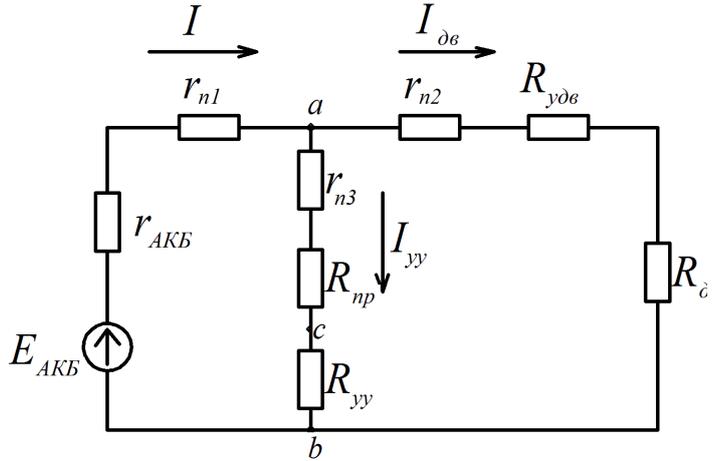
$$P_n t_p = (E_{\text{акб}} - I r_{\text{акб}}) C_{Nд}, \quad (58)$$

где  $P_n$  – мощность нагрузки (электродвигателя и устройств управления), Вт;  $C_{Nд}$  – допустимая разрядная емкость аккумуляторной батареи, А·ч:

$$C_{Nд} = C_N (1 - k_q), \quad (59)$$

где  $C_N$  – номинальная емкость аккумуляторной батареи, А·ч;  $k_q$  – допустимый коэффициент разряда емкости АКБ от номинальной,  $0,05 < k_q < 0,5$ .

Рисунок 22 – Упрощенная схема замещения питания электродвигателя от аккумуляторного источника питания: сопротивление электродвигателя  $R_{дв}$  (Ом), электродвижущая сила источника  $E_{акб}$  (В), его внутреннее сопротивление  $r_{акб}$  (Ом), сопротивление устройства управления  $R_{уу}$  (Ом), преобразователя  $R_{пр}$  (Ом), управления электродвигателем  $R_{удв}$  (Ом), проводников  $r_{n1, n2, n3}$  (Ом) и действующие токи  $I$  в цепи АКБ,  $I_{дв}$  электродвигателя,  $I_{уу}$  устройстве управления (А)



Преобразуя выражение (58), оценим продолжительность работы электропривода секции ДМ в зависимости от количества  $N_{акб}$  и схемы последовательно  $n_{акб}$  и параллельно  $m_{акб}$  соединенных батарей:

$$t_p = \frac{N_{акб} C_{N1} (1 - k_q) E_1 - \frac{N_{акб} P_H m_{акб} C_{N1} (1 - k_q) r_1}{n_{акб}^2 E_1}}{P_H (1 + k_W w) + N_{акб} C_{N1} E_1 k_t}, \quad (60)$$

где  $C_{N1}$  – номинальная емкость стандартной ТАБ, А·ч;  $E_1$  – ЭДС стандартной ТАБ, В;  $k_W$  – коэффициент, учитывающий продолжительность и мощность пуска;  $w$  – количество пусков;  $k_t$  – коэффициент временного использования тока;  $r_1$  – внутреннее сопротивление стандартной ТАБ, Ом.

Увеличить продолжительность работы  $\Delta t_p$  можно за счет большего числа последовательно соединенных ТАБ, т. е.  $n_{акб} > m_{акб}$ . Эту разницу можно оценить отношением параллельно включенных к последовательно включенным ТАБ:

$$\Delta v = \frac{m_{акб}}{n_{акб}}; \quad (61)$$

$$m_{акб} = \Delta v n_{акб}. \quad (62)$$

Тогда изменение продолжительности работы электропривода (рисунок 23):

$$\Delta t_p = \frac{t_p(m_{акб} = 1) - t_p(m_{акб} \neq 1)}{t_p(m_{акб} = 1)} = 1 - \frac{\left( \frac{\Delta v n_{акб}^2 C_{N1} (1 - k_q) E_1 - \frac{\Delta v^2 n_{акб} P_H C_{N1} (1 - k_q) r_1}{E_1}}{P_H (1 + k_W w) + \Delta v n_{акб}^2 C_{N1} E_1 k_t} \right)}{\left( \frac{n_{акб} C_{N1} (1 - k_q) E_1 - \frac{P_H C_{N1} (1 - k_q) r_1}{n_{акб} E_1}}{P_H (1 + k_W w) + n_{акб} C_{N1} E_1 k_t} \right)}. \quad (63)$$

При большем числе последовательно включенных аккумуляторов продолжительность работы электропривода увеличивается на 1,0–12,0 % (см. рисунок 23).

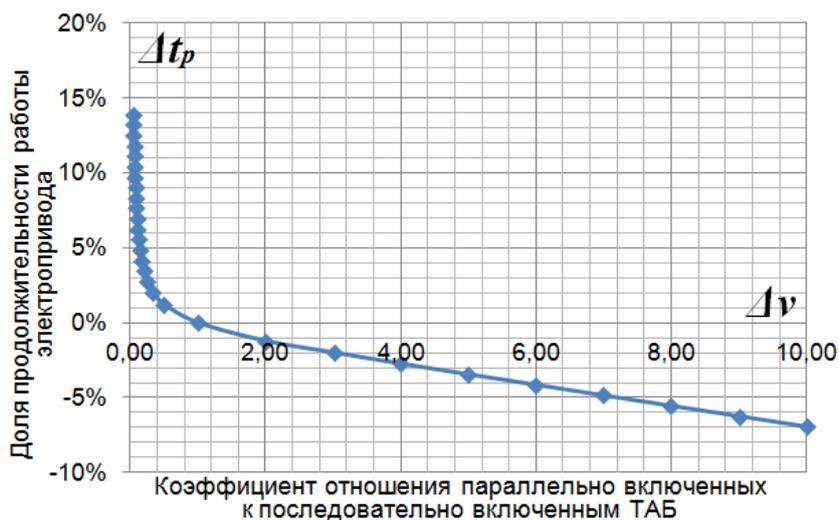


Рисунок 23 – Изменение продолжительности работы электропривода в зависимости от коэффициента отношения параллельно включенных к последовательно включенным ТАБ

Общее количество ТАБ для выполнения полива дождевальной машиной (рисунок 24):

$$N_{\text{акбДМ}} = \frac{P_{\text{двГТ}} t_{\text{рДМ}} \left( \frac{1+j}{2} \right)}{E_1 C_{N1}}, \quad (64)$$

где  $j$  – количество секций (опорных тележек) дождевальной машины, ед.;  $N_{\text{акбДМ}}$  – суммарное число аккумуляторов, зависящее от индивидуальной продолжительности работы электропривода каждой опорной тележки, шт.

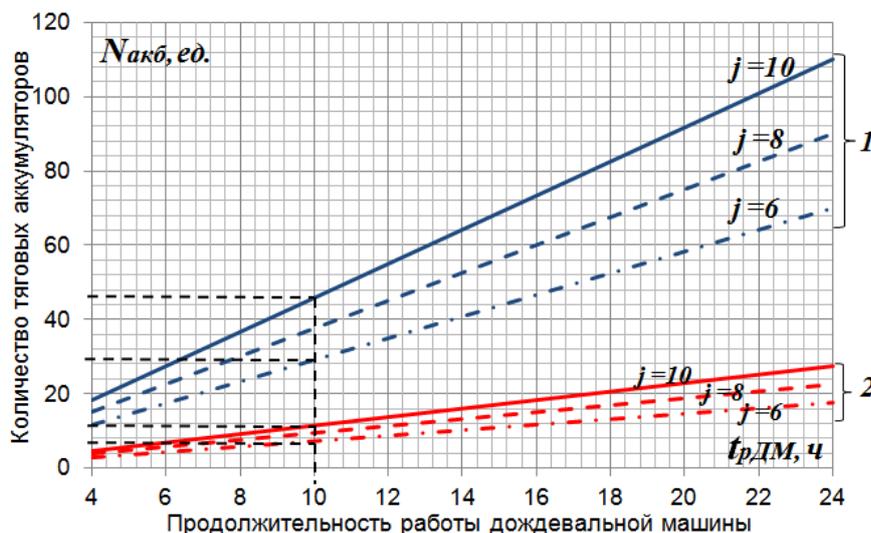


Рисунок 24 – Зависимость количества ТАБ от продолжительности работы дождевальной машины при условиях:  
 1 –  $E_1 = 12$  В,  
 $C_{N1} = 55$  А·ч;  
 2 –  $E_1 = 24$  В,  
 $C_{N1} = 110$  А·ч

Для обеспечения работы дождевальной машины, состоящей из 10 секций, в течение 10 часов потребуется 12 батарей с ЭДС 24 В номинальной емкостью 110 А·ч или 44 батареи с ЭДС 12 В номинальной емкостью 55 А·ч.

Аккумуляторные батареи необходимо периодически заряжать, что в полевых условиях открывает возможность использования возобновляемых источников энергии – солнечных батарей и ветрогенераторов.

Для того, чтобы восполнить энергию, переданную АКБ нагрузке, требуется энергия для заряда в соотношении:

$$W_3 = (1,2 \dots 1,3) W_p, \quad (65)$$

где  $W_3$  и  $W_p$  – соответственно количество энергии заряда и разряда, кВт·ч.

Если от возобновляемых источников энергии (ВИЭ), например, от солнечной батареи стандартного типоразмера можно получить в сутки для каждой секции  $(0,2...0,4)W_3$  с вероятностью  $M(t) = 0,9$ , то по значению разности затраченной и приобретенной энергий можно определить продолжительность заряда АКБ.

Остаточная энергия АКБ с учетом продолжительности включения (ПВ), выраженная в долях:

$$W_{\text{АКБ}i} = W_{\Sigma\text{АКБ}} - P_{\text{двГ1}} t_{\text{р-сут}} \text{ПВ} + \frac{k_3}{k_{\text{ЭКВ}}} P_{\text{двГ1}} t_{\text{р-сут}}, \quad (66)$$

где  $W_{\Sigma\text{АКБ}}$  – номинальное максимальное количество энергии, запасенное в АКБ, кВт·ч;  $k_3$  – коэффициент, учитывающий полученную энергию от ВИЭ относительно затраченной энергии,  $k_3 = 0,2...0,3$  с вероятностью  $M(t) = 0,9$ ;  $k_{\text{ЭКВ}}$  – коэффициент эквивалентного заряда АКБ,  $k_{\text{в}} = 1,2...1,3$ ;  $t_{\text{р-сут}}$  – продолжительность работы секции за 1 сут., ч.

Если за одни сутки ( $n_{\text{сут}} = 1$ ,  $t_{\text{сут}} = 24$  ч) можно получить энергию от ВИЭ согласно (66), то промежуток времени восполнения энергии АКБ  $y'$ :

$$y' = t_{\text{сут}} \frac{k_{\text{ЭКВ}} \text{ПВ}}{k_3}, \quad (67)$$

где ПВ – продолжительность включения электродвигателя в цикле, указанная в относительных единицах  $(0,1...1,0)$ ;  $n_{\text{сут}}$  – количество суток работы ДМ.

Графическое решение восстановления энергии АКБ показано на рисунке 25.

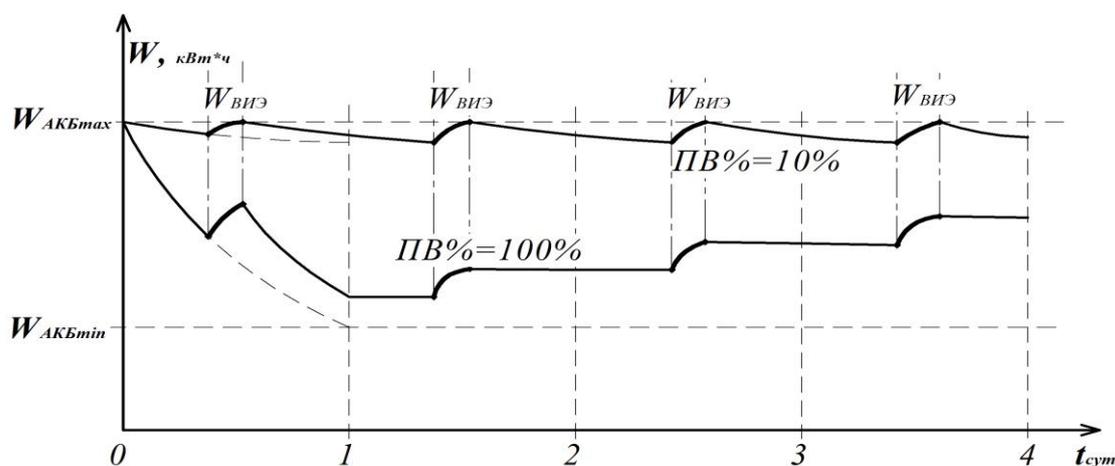


Рисунок 25 – Диаграмма восполнения энергии АКБ при получении 20 % от ВИЭ с ПВ = 10 % и ПВ = 100 %

Дождевальные машины, работающие с источниками переменного тока (переносной генератор, кабельная линия, воздушная линия), комплектуют приводами с электродвигателями переменного тока. Их частые пуски и потребление реактивной мощности оказывают существенное влияние на энергопотребление.

Общее число запусков электроприводов за 12 ч работы ДМ составляет около 2–4 тыс. раз. Долю энергии на пуск  $W_{nj}$  определяют (рисунок 26):

$$\frac{W_{nj}}{W_{\text{нж}}} = \frac{wk_{\text{пуск}} \cos \varphi_{\text{п}} t_{\text{п}}}{\cos \varphi_{\text{п}} t_{\text{рн}}}, \quad (68)$$

где  $W_{nj}$  – количество энергии номинального режима, кВт·ч;  $k_{\text{пуск}}$  – кратность пускового тока;  $\cos \varphi_n$  и  $\cos \varphi_{\text{п}}$  – соответственно значения коэффициентов мощности в номинальном и пусковом режимах;  $t_{\text{п}}$  – продолжительность пуска, ч;  $w$  – количество пусков;  $t_{\text{рн}}$  – продолжительность номинального режима, ч.

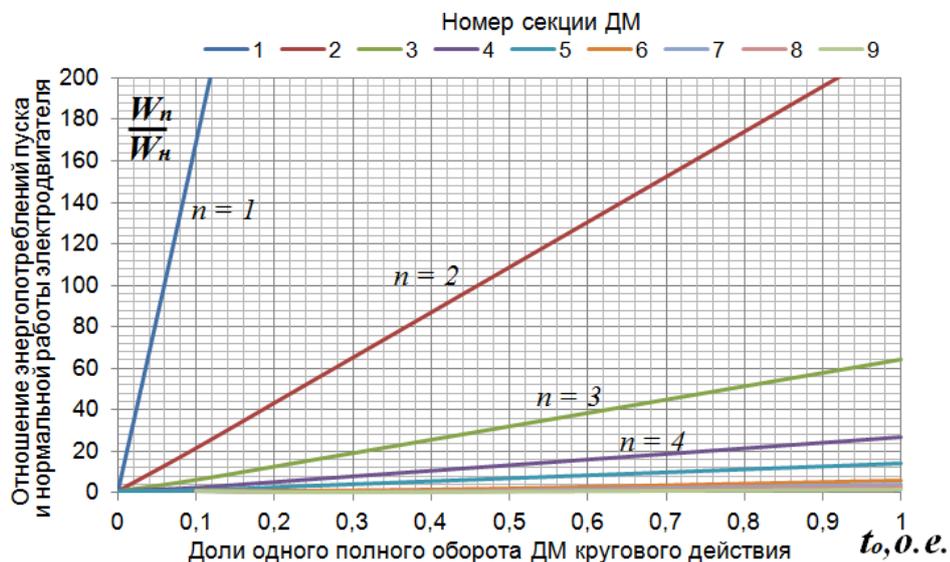


Рисунок 26 – Изменение доли потребления пусковой энергии к энергии, потребляемой в нормальном режиме электроприводами каждой опорной тележки ДМ, состоящей из 10 секций ( $n$  – номер секции) за один полный оборот  $t_o$  при условии:  $k_{\text{пуск}} = 7$ ;  $\cos \varphi_n = 0,86$ ;  $\cos \varphi_{\text{п}} = 0,2$ ;  $t_{\text{п}} = 2$  с

Потребление энергии в момент пуска зависит от номера секции. Энергопотребление пускового режима, который длится всего 1–3 с, значительно больше энергопотребления нормального режима работы (см. рисунок 26).

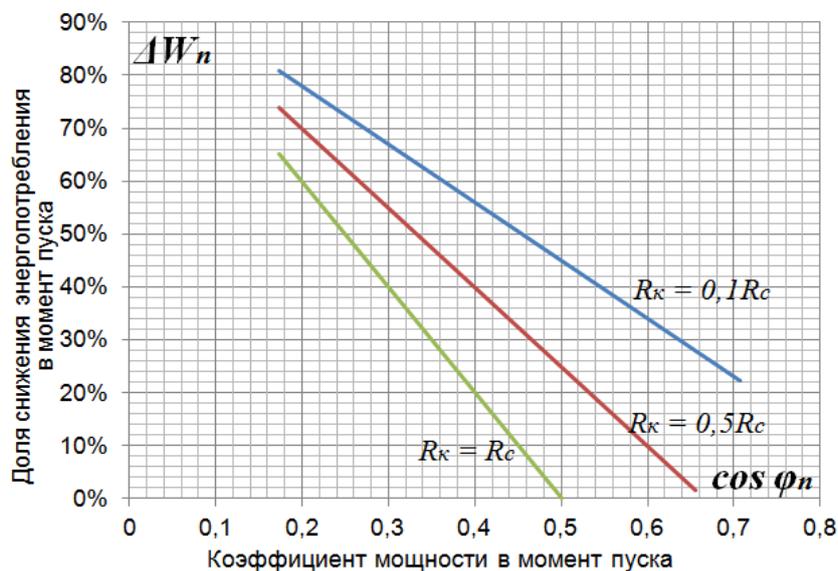


Рисунок 27 – Доля снижения потребления энергии на пуск ( $R_c$  – активное сопротивление сети, Ом;  $R_k$  – активное сопротивление конденсатора, Ом)

Применив устройство компенсации реактивной мощности даже в момент пуска, получим эффект снижения энергопотребления (рисунок 27). Устройство динамической компенсации реактивной мощности на полярных электролитических конденсаторах (рисунок 28) позволяет снизить действие пусковых токов на источник электроэнергии и повысить КПД системы, что в результате уменьшит энергопотребление на запуск на 14,5–80,4 %.

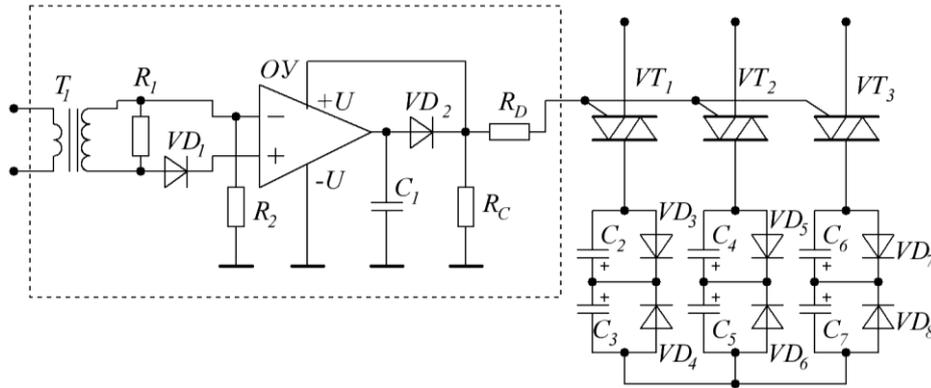


Рисунок 28 – Схема включения устройства динамической компенсации реактивной мощности с помощью тиристорного пускателя ( $VT_{1-3}$  – тиристорный пускатель;  $C_{2-7}$  – полярные электролитические конденсаторы;  $VD_{1-8}$  – диоды;  $R_{1-2}, C_1$  – балластные сопротивления схемы;  $OY$  – компаратор)

Дискретное управление неизбежно сопровождается случаями одновременного запуска двигателей электроприводов нескольких опорных тележек. Для источника питания ДМ в виде переносного генератора следует учитывать эти случаи. Используя схему логического управления, можно исключать одновременный пуск электродвигателей. Однако продолжительность выполнения полива будет увеличена:

$$T_{\text{ДМmin}}^{\text{лог}} = t_j + t_{j-1} + \dots + t_1 = \frac{j(t_j + t_1)}{2}, \quad (69)$$

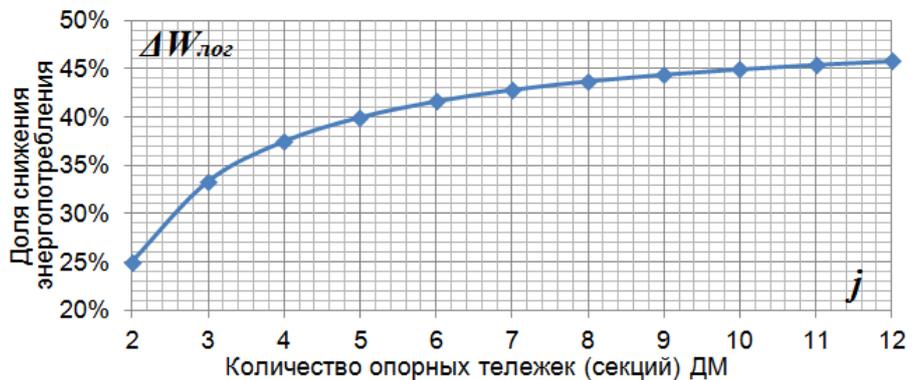
где  $t_1$  и  $t_j$  – промежутки времени работы первой и крайней опорной тележек, ч;  $j$  – количество опорных тележек (секций).

Изменение энергопотребления при использовании схемы логического управления для переносного генератора  $W_{\text{г}}$  (рисунок 29):

$$\Delta W_{\text{лог}} = \frac{W_{\text{г}} - W_{\text{г}}^{\text{лог}}}{W_{\text{г}}} = 1 - \frac{P_{\text{иг}} t_{\text{р1}} (j+1)}{2j P_{\text{иг}} t_{\text{р1}}} = 1 - \frac{j+1}{2j}, \quad (70)$$

где  $P_{\text{иг}}$  – мощность переносного генератора, кВт.

Рисунок 29 – Зависимость изменения энергопотребления от числа опорных тележек (секций) ДМ с использованием схемы логического управления



Использование схемы логического управления дождевальными машинами, состоящей из 10 секций, позволяет экономить до 45 % энергии на водораспределение, но только при высокой поливной норме ( $m_{\text{пн}} > 300 \text{ м}^3/\text{га}$ ).

Существенное влияние на надежность работы машины оказывает прибор синхронизации движения в линию (ПСЛ), который характеризует энерго-

потребление системы управления. Рассмотрим устройство на ультразвуковом приемопередатчике (рисунок 30) и оценим его энергопотребление.

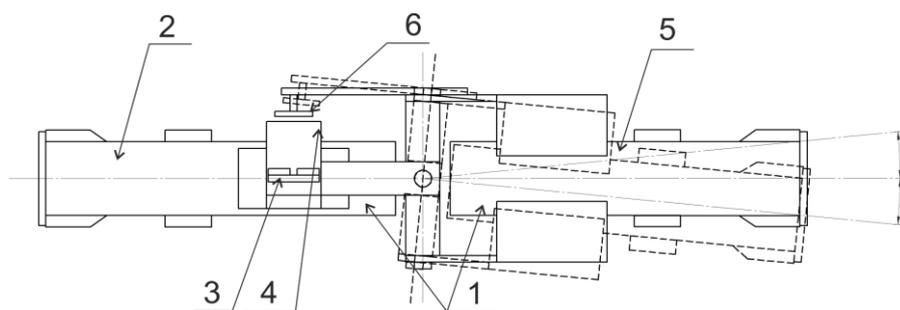


Рисунок 30 – Устройство определения угла поворота секции ДМ: 1 – шарнир; 2 – неподвижная часть шарнира; 3 – ультразвуковой приемопередатчик; 4 – изолирующий экран; 5 – подвижная часть шарнира; 6 – отражатель

Предположим, что энергопотребление устройства на ультразвуковом (УЗ) приемопередатчике  $W_{уз}$  ниже за счет более низкого напряжения, чем энергопотребление электромеханического устройства прибора ПСЛ  $W_{псл}$ . Однако продолжительность работы УЗ выше за счет режима ожидания. Тогда доля энергопотребления устройств управления  $\Delta W_{yo}$  (рисунок 31):

$$\Delta W_{yo} = \frac{W_{псл} - W_{уз}}{W_{псл}} = 1 - \frac{U_2^2 t_{пу} R_1}{R_2 U_1^2 t_{рп}}, \quad (71)$$

где  $U_1$  и  $U_2$  – номинальные напряжения соответственно устройства ПСЛ и УЗ;  $B$ ,  $R_1$  и  $R_2$  – эквивалентные сопротивления соответственно ПСЛ и ультразвукового устройства, Ом;  $t_{рп}$  и  $t_{пу}$  – продолжительность работы соответственно ПСЛ и ультразвукового устройства, ч.

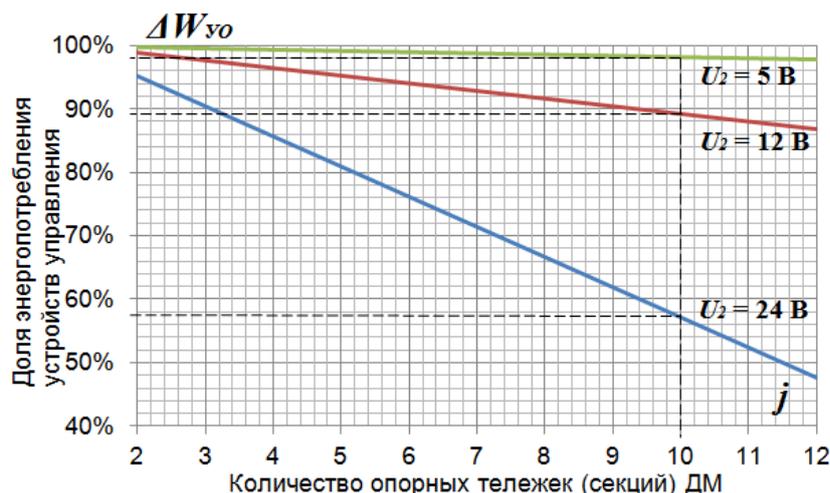


Рисунок 31 – Сравнительные характеристики энергопотребления устройств управления на ультразвуковых приемопередатчиках, работающих на номинальном напряжении 5, 12, 24 В с электромеханическим прибором ПСЛ, работающем на номинальном напряжении 110 В (при  $R_1 = R_2$ )

Использование устройства определения угла поворота позволяет снизить энергопотребление на управление в 2,3–47,8 раза, что в структуре общего энергопотребления ДМ составляет около 0,2–2,1 %.

**В пятой главе «Экспериментальные исследования аккумуляторного источника питания и устройства динамической компенсации реактивной мощности»** представлены разработанные программа и лабораторные стенды для экспериментального исследования продолжительности движения опорной

тележки секции ДМ от аккумуляторного источника питания и устройства динамической компенсации реактивной мощности.

Экспериментальные исследования обусловлены необходимостью получения характеристик работы АКБ как основного источника питания электроприводов дождевальная машины и подтверждения теоретических положений.

В ходе выполнения многофакторного анализа установлено, что на продолжительность работы ДМ влияют ЭДС АКБ  $E_{акб}$  (В), номинальная емкость батареи  $C_N$  (А·ч), а также число пусков  $w$ . Общий вид экспериментальной установки показан на рисунке 32.

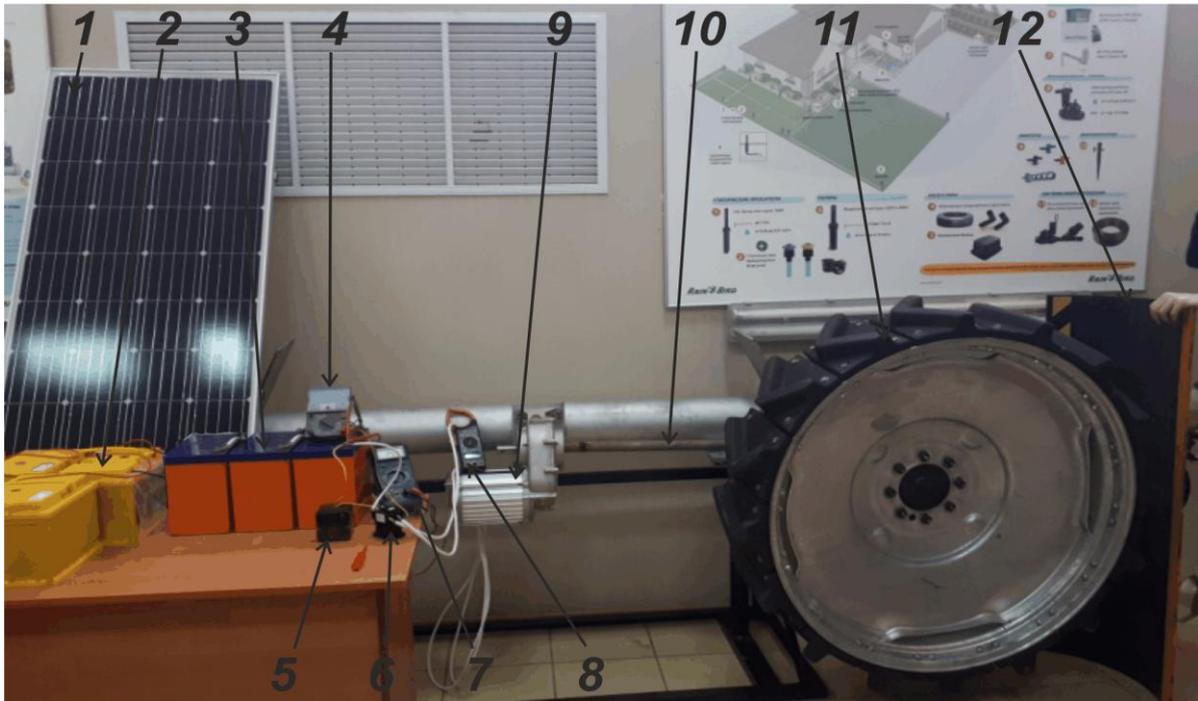


Рисунок 32 – Общий вид экспериментальной установки: 1 – солнечная панель (не подключена); 2 – аккумуляторы Discover EV 34A-A; 3 – аккумуляторы Delta GEL 12-65; 4 – измеритель емкости заряда АКБ; 5 – кнопки пуск/стоп; 6 – контактор с катушкой 24 В (DC); 7 – вольтметр; 8 – амперметр; 9 – электродвигатель (мотор-редуктор); 10 – вал; 11 – движитель (жесткое колесо типа Rainefine Plastic tire); 12 – нагрузка на колесо

Оценки коэффициентов регрессии полинома второго порядка рассчитаны с помощью многочленов Чебышева, так как для таких уравнений отклик не отражается в интервале  $[-1; +1]$ .

Получен регрессионный полином:

$$t_{pi} = 7,47 + \frac{3,63(C_{Ni} - 97,5)}{32,5} - \frac{0,27(E_{AKBi} - 48)}{12} \frac{(C_{Ni} - 97,5)}{32,5} - \frac{0,48(E_{AKBi} - 48)}{12} \frac{(w - 55)}{45} - 0,23 \left( \frac{E_{AKBi} - 48}{12} \right)^2 + 0,03 \left( \frac{C_{Ni} - 97,5}{32,5} \right)^2 + 0,05 \left( \frac{w - 55}{45} \right)^2. \quad (72)$$

Поверхности откликов зависимостей  $t_p = f(E_{акб}; C_N)$ ;  $t_p = f(E_{акб}, w)$  соответственно при других значениях факторов, считающихся неизменными и постоянными, определенные на нижнем (-1) уровне влияния, представлены на рисунках 33, 34.

Полученные данные подтверждают результаты теоретических исследований продолжительности работы электропривода на АКБ с погрешностью не более 8 %.

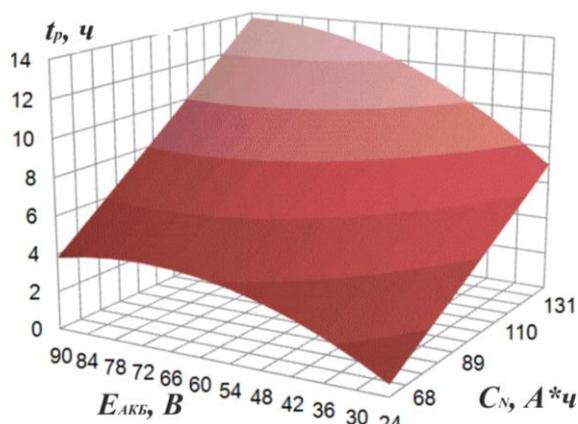


Рисунок 33 – Зависимость  $t_p = f(E_{акб}; C_N)$  при  $w(-1) = 10$

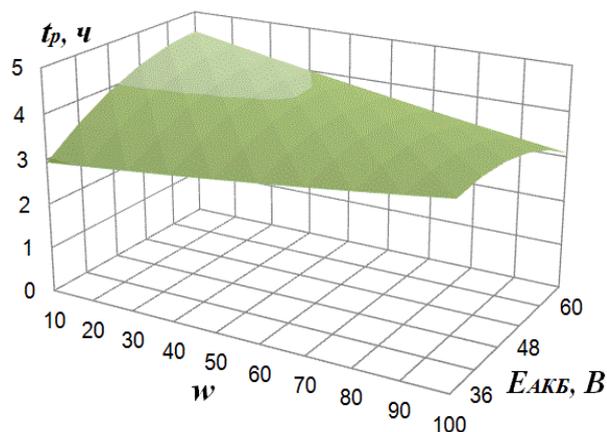
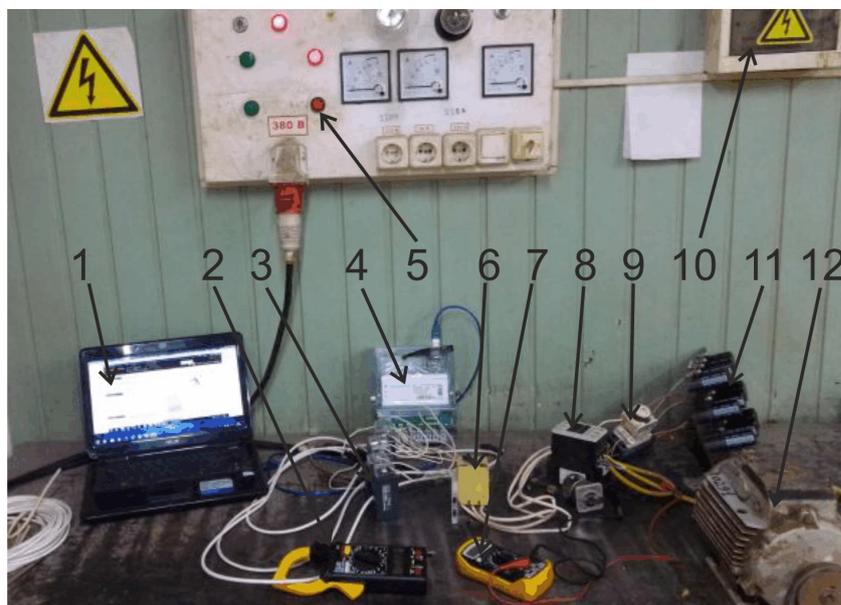


Рисунок 34 – Зависимость  $t_p = f(w; E_{акб})$  при  $C_N(-1) = 65 \text{ А}\cdot\text{ч}$

Для оценки снижения энергопотребления электродвигателя в пусковом режиме при подключении устройства компенсации реактивной мощности (УДКРМ) необходимо оценить влияние продолжительности пуска и емкости конденсаторной батареи, подключенной в момент пуска. Общий вид стенда для испытания УДКРМ показан на рисунке 35.

Рисунок 35 – Внешний вид стенда проверки УДКРМ:  
 1 – ноутбук; 2 – токовые клещи; 3 – трансформаторы тока; 4 – счетчик; 5 – кнопки пуск/стоп; 6 – контактор электродвигателя;  
 7 – вольтметр; 8 – контактор УДКРМ; 9 – реле времени; 10 – автоматический выключатель; 11 – УДКРМ; 12 – электродвигатель



Потребление реактивной мощности электродвигателем на интервале пуска изменяется. Тогда для оценки наибольшего снижения энергопотребления необходимо варьировать величину емкости конденсаторной батареи и продолжительность включения УДКРМ. В ходе выполнения экспериментальных исследований проверки УДКРМ получены результаты, позволяющие определить регрессионные полиномы, характеризующие снижение энергопотребления  $\Delta W_{PM-п}$  и КПД  $\Delta \eta_{п}$  пускового режима при емкости  $C_{ук}$  конденсаторной батареи и продолжительности ее включения  $t_{п}$ :

$$\Delta W_{PM-ni} = 0,62 + 0,15 \frac{C_{yKi} - 40,5}{9,5} - 0,019 \frac{t_{ni} - 2,5}{0,5} - 0,050 \left( \frac{C_{yKi} - 40,5}{9,5} \right)^2 +$$

$$+ 0,004 \left( \frac{t_{ni} - 2,5}{0,5} \right)^2 - 0,022 \left( \frac{C_{yKi} - 40,5}{9,5} \right) \left( \frac{t_{ni} - 2,5}{0,5} \right); \quad (73)$$

$$\Delta \eta_{ni} = 0,207 + 0,073 \frac{C_{yKi} - 40,5}{9,5} - 0,152 \frac{t_{ni} - 2,5}{0,5} + 0,075 \left( \frac{C_{yKi} - 40,5}{9,5} \right)^2 -$$

$$- 0,020 \left( \frac{t_{ni} - 2,5}{0,5} \right)^2 - 0,149 \left( \frac{C_{yKi} - 40,5}{9,5} \right) \left( \frac{t_{ni} - 2,5}{0,5} \right). \quad (74)$$

Поверхности откликов показаны на рисунках 36, 37.

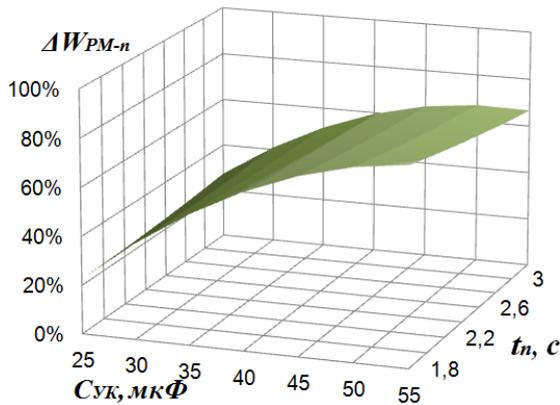


Рисунок 36 – Поверхность отклика  $\Delta W_{PM-n} = f(C_{yK}; t_n)$

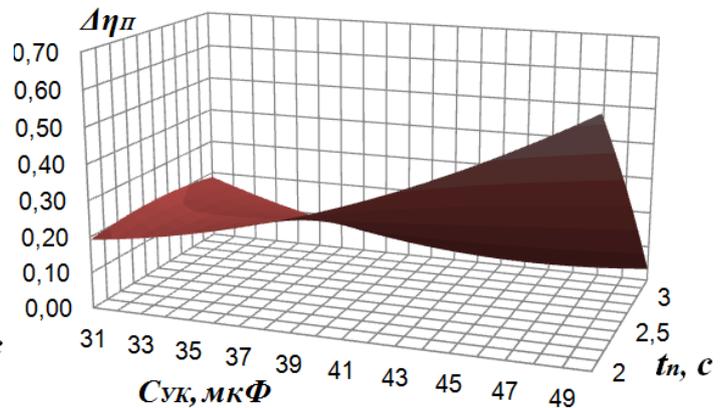


Рисунок 37 – Поверхность отклика  $\Delta \eta_{п} = f(C_{yK}; t_n)$

Максимальная компенсация реактивной мощности в пусковом режиме для традиционных асинхронных электродвигателей номинальной мощностью 550 Вт достигается при емкости конденсатора  $C_{yK-опт} = 50$  мкФ и продолжительности включения реле не более  $t_{п-опт} = 2,0$  с, что способствует снижению энергопотребления при пуске до 84,1 %.

**В шестой главе «Производственная проверка способов повышения энергоэффективности и полевые испытания дождевальных машин кругового действия. Экономические оценки внедрения»** приведены данные результатов внедрения и производственных испытаний алгоритма поиска оптимальной системы энергоснабжения дождевальных машин, эксплуатируемых в различных условиях, аккумуляторного источника питания с использованием возобновляемых источников энергии.

В испытаниях использованы дождевальные машины сельскохозяйственных предприятий (рисунки 38, 39), действующих как на территории Саратовской области (УНПК «Агроцентр» СГАУ, г. Саратов; УНПО «Поволжье» СГАУ, Энгельский район Саратовской области; ООО «Наше дело», Марковский район Саратовской области; ИП Глава К(Ф)Х Вязовов В.В., Екатериновский район Саратовской области; ООО «Мелиоративные машины», г. Саратов), так и в других регионах (ООО «Стандарт-С», Ачхой-Мартановский район Чеченской республики; ООО «АПК «Райгород», Светлоярский район Волгоградской области).



Рисунок 38 – Полив кукурузы МДЭК «Каскад» в Саратовской области на предприятии УНПО «Поволжье» СГАУ



Рисунок 39 – Аккумуляторный способ питания ДМ с использованием солнечных батарей на предприятии УНПК «Агроцентр» СГАУ

В ходе производственной проверки определены критерии эффективности каждой машины, участвовавшей в испытаниях (21 ед.). Часть дождеваль-ных машин (6 ед.) оказались с завышенным энергопотреблением (рисунок 40).

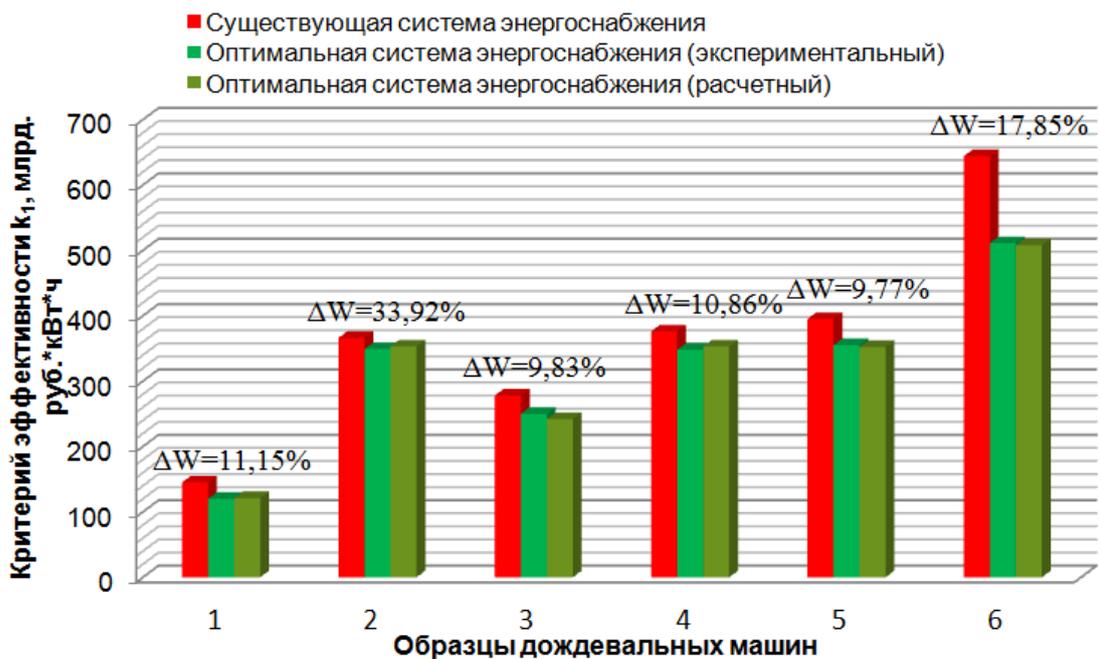


Рисунок 40 – Сравнение теоретических и экспериментальных данных дождевальных машин с оптимальными системами энергоснабжения на основе обобщающего критерия эффективности с указанием доли снижения энергопотребления

Ожидаемая годовая экономия от применения предлагаемой энергоэф-фективной системы эксплуатации ДМ в условиях Саратовской области для 10–30 % дождевальных машин – 10,54–28,92 млн руб.

Отклонение теоретических и экспериментальных данных производст-венной проверки изменения нагрузки электропривода при изменении конст-руктивных параметров ДМ составило не более 11 %.

Производственные испытания аккумуляторного способа питания секции дождевальной машины реализованы с целью проверки теоретических поло-жений в полевых условиях. Отклонение теоретических и экспериментальных

данных продолжительности работы ДМ на АКБ, оснащенных солнечными панелями, составляет менее 8 %. Комплектование дождевальная машины кругового действия аккумуляторным источником питания дает ряд преимуществ по сравнению с источником питания переменного тока (таблица 4).

Таблица 4 – Сравнение 6-секционных ДМ с источниками питания от аккумуляторных батарей и переносным генератором

№ п/п	Наименование элемента системы энергоснабжения	ДМ (6 секций) с источником переменного тока	ДМ (6 секций) с источником постоянного тока	Индекс (относительно аккумуляторного источника питания)
1	Источник энергии	переносной генератор 12 кВт·А	аккумуляторы 42 шт. (12 В, 55 А·ч)	-0,8
1.1	Стоимость электроэнергии	11,2 руб./кВт·ч	1,0 руб./кВт·ч	+11,2
1.2	Затраты на техническую эксплуатацию источника	4550 руб./год	1280 руб./год	+3,7
1.3	Источник питания	кабельная линия 4×25 с длиной прокладки до 3840 м / более 3890 м	аккумуляторы 42 шт. (12 В, 55 А·ч)	-/+
1.4	Стоимость электроэнергии	5,51 руб./кВт·ч	1,0 руб./кВт·ч	+5,5
1.5	Затраты на техническую эксплуатацию источника	550 руб./год	1280 руб./год	-0,47
1.6	Дополнительные элементы	–	солнечная батарея 18 шт. (1550×700, 150 Вт)	–
2	Электропривод	УМС 380VAC, 1,5 А, $i = 2000$ 550 Вт (22500 руб.)	BM18-20 36-60 VDC, 10 А, $i = 2000$ 360–600 Вт (10200 руб.)	+2,5
2.1	Передача энергии электродвигателю	кабель 3×1,5 длиной 8 м	кабель 2×6 длиной 2 м	-0,6
2.2	Передача энергии электродвигателю (силовая сеть)	кабель 10×6 длиной 360 м	–	+
2.3	Дополнительные элементы	токосъемник круговой	–	+
3	Управление электродвигателем	ПСЛ на концевых выключателях (12000 руб.)	ПСЛ на ультразвуковом приемопередатчике (4500 руб.)	+2,7
3.1	Потребление энергии за один оборот ДМ, кВт·ч	1,10	0,25	+4,1
4	Масса элементов системы энергоснабжения в составе общей массы ДМ	388	1045	-2,7

Применение аккумуляторного источника питания по сравнению с переносным дизельным генератором в одинаковых условиях экономически целесообразно при максимальном использовании дождевальной машины за сезон ( $t_{\text{сез}} > 1250$  ч). Дополнительные капиталовложения 296,6 тыс. руб. окупятся в среднем за 4,0 года со средней годовой экономией 73,3 тыс. руб.

При эксплуатации дождевальных машин в условиях, оптимальных для системы энергоснабжения на аккумуляторном источнике питания с возобновляемыми источниками энергии (около 40 ед. в Саратовской области), ожидаемая годовая экономия составит 0,54–2,92 млн руб.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С целью повышения эффективности технологий искусственного орошения при эксплуатации дождевальных машин кругового действия путем определения условий наименьшего энергопотребления при их эксплуатации разработаны и исследованы новые способы и средства энергосбережения, позволяющие определить оптимальную систему энергоснабжения дождевальных машин кругового действия и в совокупности снизить энергопотребление на 10,2–20,8 %.

1. Анализ эксплуатации дождевальных машин кругового действия позволил установить, что в одних и тех же условиях применяют до 40 вариантов энергоснабжения ДМ, энергопотребление которых существенно различается – в 1,5–4,2 раза. Разработка обобщающего критерия эффективности дождевальных машин кругового действия, объединяющего взаимосвязь различных типов привода, позволяет сравнить их системы энергоснабжения с учетом географических, природно-климатических, технических, технологических, эксплуатационных требований и снизить энергопотребление на 20–22 %.

2. На основе методологии исследования определено, что энергопотребление и эффективность системы энергоснабжения зависят от поливной нормы  $m_{\text{пн}}$  ( $m_{\text{он}}$ ), площади поливного участка  $S$ , давления потока жидкости на входе в ДМ  $p$ , удаленности поливного участка от централизованной энергосистемы  $l_{\text{нп}}$  и водоема  $l_{\text{в}}$ , прироста прибыли от полива  $\Delta\Pi$ , а также от параметров привода: удельной мощности  $P'$ , показателя потерь энергии  $\eta'$ , стоимости системы  $C$ , надежности  $Q_0(t)$ , эксплуатационных затрат  $z$  и массы элементов системы  $m_{\text{сэ}}$ . На основе функционально-структурного анализа синтезированы варианты систем энергоснабжения дождевальных машин кругового действия и установлено, что наиболее эффективными являются системы с электроприводом ( $k_{\text{оргЭ}} = 0,26 \dots 0,31$ ) по сравнению с системами на гидравлическом ( $k_{\text{оргГ}} = 0,22$ ) и механическом ( $k_{\text{оргМ}} = 0,21$ ) приводе.

3. На основе обобщающего критерия эффективности определены зоны, границы и условия применения оптимальных систем энергоснабжения дождевальных машин кругового действия:

- электрический привод – при площади поливного участка  $S > 40$  га, удаленности от водоёма  $l_{\text{в}} > 1000$  м; при удаленности от централизованной сети энергоснабжения  $l_{\text{нп}} < 1000$  м предпочтительнее кабельная или воздушная линия; при удаленности от централизованной сети энергоснабжения  $l_{\text{нп}} > 1000$  м и стоимости ресурса  $ц_{\text{р}} < 7,5$  руб./кВт·ч рекомендуется аккумуляторное питание, а питание от переносного генератора – при  $l_{\text{нп}} > 1000$  м и  $ц_{\text{р}} > 7,5$  руб./кВт·ч;

- гидравлический привод – при площади поливного участка  $S < 40$  га, с входным давлением в трубопроводе  $p > 0,35$  МПа и удаленности от водоема  $l_{\text{в}} < 1000$  м;

- механический привод – при площади поливного участка  $S < 6$  га, с входным давлением в трубопроводе  $p < 0,30$  МПа и удаленности от централизованной сети энергоснабжения  $l_{\text{нп}} > 10000$  м и водоёма  $l_{\text{в}} > 10000$  м.

4. На основе усовершенствованных математических моделей разработаны способы и технические средства повышения энергетической эффективности при эксплуатации дождевальных машин кругового действия:

- снижение энергопотребления на 0,37–1,91 % за счет изменения конструктивных параметров дождевальная машины, влияющих на нагрузку электроприводов опорных тележек;

- снижение потерь энергии (на 0,05–1,00 %) за счет обоснования продолжительности работы дождевальная машины от параметров аккумуляторного источника питания, оснащенных возобновляемыми источниками энергии, при которых в режиме работы электропривода опорной тележки крайней секции ПВ = 100 % для полного заряда аккумуляторов потребуется 5–7 дней (что по длительности совпадает с технологическими простоями между поливами кормовых культур), а при ПВ = 10 % – 1 день;

- снижение энергопотребления на 1,2–3,9 % за счет применения разработанных технических средств: устройства динамической компенсации реактивной мощности, схем управления движением секций ДМ, а также устройства определения угла поворота секции.

5. Исследованием физической и полученной на основе теории планирования эксперимента математической модели аккумуляторного источника питания электропривода опорной тележки подтверждена зависимость продолжительности движения дождевальная машины с погрешностью менее 8 % и влиянием наиболее значимых факторов: номинальной емкости, ЭДС аккумуляторов и числа пусков электропривода.

На основе физической и математической моделей устройства динамической компенсации реактивной мощности электродвигателей переменного тока для дождевальных машин, работающих в условиях эксплуатации, оптимальных для систем энергоснабжения с источниками переменного тока (переносной генератор, кабельная линия), установлено, что наибольшее снижение энергопотребления (на 0,32–2,53 %) достигается при емкости конденсаторной батареи  $C_{УК-опт} > 50$  мкФ и продолжительности включения в пусковом режиме устройства  $t_{п-опт} = 2,0 \dots 2,5$  с.

6. В ходе полевых и производственных испытаний установлено: снижение энергопотребления при эксплуатации ДМ с оптимальными системами энергоснабжения на 10,24–20,87 % и отклонением теоретического расчета и экспериментальных данных критерия эффективности на 0,5–3,2 %; отклонение теоретических и экспериментальных данных продолжительности работы дождевальная машины на аккумуляторном источнике питания, оснащенный солнечными панелями, менее 8 %; отклонение теоретических и экспериментальных данных изменения нагрузки на электропривод при изменении конструктивных параметров дождевальная машины не более 11 %.

Использование оптимального энергоснабжения для единицы дождевальная машины кругового действия окупается от 1,75 до 9,24 года в зависимости от продолжительности использования машины за сезон и цен на энергетические ресурсы. Для Саратовской области переход на оптимальную систему энергоснабжения 10–30 % дождевальных машин позволит экономить в год 10,54–28,92 млн руб., а применение аккумуляторного источника питания по сравнению с переносным дизельным генератором экономически целесообразно при максимальном использовании дождевальная машины за сезон ( $t_{сез} > 1250$  ч),

срок окупаемости дополнительных капиталовложений в которые составляет в среднем 4,0 года с годовым экономическим эффектом для Саратовской области 0,54–2,92 млн руб.

### РЕКОМЕНДАЦИИ ПРОИЗВОДСТВУ

Рассмотренные в диссертации способы и средства снижения энергопотребления дождевальных машин требуют творческого учета для всех условий эксплуатации и выполнения комплекса проектных и опытно-конструкторских работ. Представленные теоретические и экспериментальные исследования дают основу для создания нормативно-технической документации энергоснабжения дождевальных машин кругового действия, а также производства сопутствующего оборудования, например, электродвигателей постоянного тока со шкалой номинальных мощностей от 280 до 750 Вт, аккумуляторных батарей со шкалой номинальных напряжений от 60 до 150 В и т. п.

### ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ

В настоящем диссертационном исследовании приведены и частично раскрыты зависимости параметров процесса полива и системы энергоснабжения от продолжительности выполнения полива как основного параметра энергопотребления. Дальнейшие исследования должны будут ориентированы на оптимальное соотношение мощности и продолжительности выполнения процесса полива, а также продолжение совершенствования результатов исследований. Интересным научным направлением являются цифровизация и анализ потребления энергии на каждом этапе выполнения действий системой энергоснабжения дождевальной машины.

### Основные содержание диссертации опубликовано в следующих работах

*В рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ*

1. *Ерошенко, Г. П.* Периодичность ТО и ТР электрооборудования сельскохозяйственных производственных участков / Г. П. Ерошенко, **С. М. Бакиров**, С. В. Шлюпиков // Научное обозрение. – 2012. – № 4. – С. 51–53.

2. *Ерошенко, Г. П.* Состояние эксплуатации электрооборудования / Г. П. Ерошенко, **С. М. Бакиров** // Научное обозрение. – 2014. – № 4. – С. 22–23.

3. *Ерошенко, Г. П.* Особенности работы электроприводов при случайном характере внешних воздействий / Г. П. Ерошенко, **С. М. Бакиров** // Аграрный научный журнал. – 2015. – № 8. – С. 72–75.

4. *Ерошенко, Г. П.* Распределение ресурсов при риск-ориентированном обслуживании электрооборудования / Г. П. Ерошенко, В. А. Трушкин, **С. М. Бакиров**, А. С. Гузачев // Научное обозрение. – 2017. – № 21. – С. 122–125.

5. *Ерошенко, Г. П.* Оценка применения солнечных батарей в качестве источника питания мобильных сельскохозяйственных электрифицированных машин / Г. П. Ерошенко, **С. М. Бакиров**, С. С. Елисеев // Вестник Курганской ГСХА. – 2019. – № 1 (29). – С. 70–74.

6. *Ерошенко, Г. П.* Снижение мощности электропривода секции дождевальной машины за счет изменения диаметра водораспределительного трубо-

провода / Г. П. Ерошенко, Д. А. Соловьев, **С. М. Бакиров** // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2019. – № 2 (55). – С. 178–184.

7. *Ерошенко, Г. П.* Снижение мощности электропривода секции дождевальной машины за счет изменения параметров колес опорной тележки / Г. П. Ерошенко, Д. А. Соловьев, **С. М. Бакиров** // Научный журнал АПК России. – 2019. – Т. 26. – № 3. – С. 398–402.

8. **Бакиров, С. М.** Обоснование внепланового технического обслуживания солнечных батарей, используемых в качестве источника питания дождевальных машин / С. М. Бакиров, С. С. Елисеев // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. – 2020. – № 1. – С. 16–21.

9. **Бакиров, С. М.** Разработка устройства определения угла поворота секции дождевальной машины / С. М. Бакиров // Агроинженерия. – 2020. – № 4. – С. 39–43.

10. **Бакиров, С. М.** Обоснование параметров способа питания дождевальной машины от аккумуляторных батарей с зарядом от возобновляемых источников энергии / **С. М. Бакиров**, С. В. Шлюпиков // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2020. – № 7. – С. 128–137.

11. **Бакиров, С. М.** Обоснование границ применения систем энергоснабжения дождевальных машин / **С. М. Бакиров** // Агроинженерия. – 2020. – № 5. – С. 49–56.

12. *Соловьев, Д. А.* Разработка электрической схемы логического управления движением секций ДМ, исключающей одновременный запуск электродвигателей / Д. А. Соловьев, **С. М. Бакиров**, Г. Н. Камышова // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. – 2020. – № 3 (55). – С. 119–123.

13. **Бакиров, С. М.** Разработка устройства динамической компенсации реактивной мощности электродвигателей, используемых в составе электроприводов секций дождевальной машины / **С. М. Бакиров** // Вестник аграрной науки Дона. – 2020. – № 3. – С. 77–85.

14. **Бакиров, С. М.** Разработка системы автоматического регулирования мгновенной мощности электропривода опорных тележек дождевальной машины кругового действия / **С. М. Бакиров** // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2021. – № 1 (87). – С. 167–171.

15. *Соловьев, Д. А.* Обоснование показателя эффективности энергоснабжения дождевальной машины кругового действия / Д. А. Соловьев, **С. М. Бакиров**, Г. Н. Камышова, С. С. Елисеев // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2021. – № 1 (87). – С. 158–163.

*В рецензируемых научных изданиях иностранных баз  
данных Scopus и Web of Science*

16. *Eroshenko, G. P.* Modes and Parameters of Circular Action Sprinkler Electric Drives / G. P. Eroshenko, D. A. Soloviev, V. A. Glukharev, **S. M. Bakirov**, S. V. Starcev // Jour. of Adv Research in Dynamical & Control Systems. – Vol. 10, 10–Special Issue, 2018. – P. 2123–2128.

17. *Eroshenko, G. P.* Optimal Power Supply Synthesis for Circular Action Sprinkler / G. P. Eroshenko, A. I. Esin, D. A. Soloviev, F. V. Serebrennikov, **S. M. Bakirov** // Jour. of Adv Research in Dynamical & Control Systems. – Vol. 10, 10–Special Issue, 2018. – P. 2129–2134.

18. *Eroshenko, G. P.* The Rationale for the Method of Powering Rail Electrified Machines / G. P. Eroshenko, I. Y. Loshkarev, **S. M. Bakirov**, S. V. Shlypikov, A. P. Ischenko // IOP : Earth and Environmental Science. – 2019. – P. 459–465.

19. **Bakirov, S. M.** Justification of Parameters of Automatic Control System of Robot Feed Distribution in Cattle Barn / S. M. Bakirov, O. V. Logacheva, S. V. Schlypikov // IOP Conference Series : Earth and Environmental Science. – 2020. – 422(1), 012057

20. *Soloviev, D. A.* Robotic Irrigative Complex with Intellectual Control System "CASCADE" / D. A. Soloviev, L. A. Juravleva, **S. M. Bakirov** // Proceedings of XVIII International Scientific and Practical Conference "Modern Trends in Agricultural Production in the World Economy". – 2020. – P. 145–156.

21. **Bakirov, S. M.** Justification of Dependence of the Sprinkler Machine Power Supply System Efficiency on the Irrigation Progress Parameters / S. M. Bakirov, O. V. Logacheva, S. V. Schlypikov // IOP Conference Series : Earth and Environmental Science. Russian Conference on Technological Solutions and Instrumentation for Agribusiness, TSIA. – 2019. – 2020. – P. 012005.

22. **Bakirov, S. M.** Justification of the Duration of Operation of a Sprinkler Machine Electric Drive on a Accumulator Power Supply with a Charging from Solar Battery / S. M. Bakirov, J. V. Ivankina, S. Z. Ziniev, S. S. Eliseev // IOP Conference Series : Earth and Environmental Science. – 2020. – Vol. 579. – Art. 012106.

#### *В патентах РФ*

23. Пат. № 158228 Российская Федерация, МПК Н 02 J 3/18. Устройство целевой компенсации реактивной мощности / Г. П. Ерошенко, **С. М. Бакиров**, С. В. Шлюпиков, Ш. З. Зиниев ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Саратовский ГАУ имени Н. И. Вавилова». – № 2015109546/07 ; заявл. 18.03.2015 ; опубл. 27.12.2015, Бюл. № 36. – 2 с. : ил.

24. Пат. № 189495 Российская Федерация, МПК А 01 G 25/09, СПК А 01 G 25/09, Y 02 P 60/122. Автономная электрифицированная секция дождеваль- ной машины кругового действия / **С. М. Бакиров**, Г. П. Ерошенко, В. А. Трушкин, Д. А. Соловьев, С. С. Елисеев ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Саратовский ГАУ имени Н. И. Вавилова». – № 2019103591 ; за- явл. 08.02.2019 ; опубл. 24.05.2019, Бюл. № 15. – 6 с. : ил.

25. Пат. № 2707919 Российская Федерация, МПК А 01 В 61/00, А 01 G 25/09, СПК А 01 В 61/00, А 01 G 25/09, А 01 В 69/002. Устройство определения угла поворота секции дождевальной машины кругового действия / **С. М. Баки- ров**, Г. П. Ерошенко, В. А. Трушкин, Д. А. Соловьев, С. С. Елисеев ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Саратовский ГАУ имени Н. И. Вавилова». – № 2019103602 ; заявл. 08.02.2019 ; опубл. 02.12.2019, Бюл. № 34. – 4 с. : ил.

26. Пат. № 2716987 С1 Российская Федерация, МПК А 01 В 61/00, А 01 G 25/09. Шпренгель фермы дождевальной машины / Д. А. Соловьев, Р. Е. Кузнецов, **С. М. Бакиров**, Г. Н. Камышова, С. А. Макаров, Д. Г. Горюнов, Д. А. Колганов ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Саратовский ГАУ имени Н. И. Вавилова». – № 2019103402 ; заявл. 07.02.2019 ; опубл. 17.03.2020, Бюл. № 36 – 4 с. : ил.

*В сборниках научных трудов, материалах конференций и семинаров*

27. *Ерошенко, Г. П.* Значение диагностики в процессе эксплуатации электрооборудования в сельском хозяйстве / Г. П. Ерошенко, **С. М. Бакиров**, И. Ю. Лошкарев // Актуальные проблемы энергетики АПК : матер. Междунар. науч.-практ. конф. – Саратов : КУБик, 2012. – С. 83–88.

28. **Бакиров, С. М.** Особенности диагностирования электрооборудования сельскохозяйственных производственных участков / С. М. Бакиров, С. В. Шлюпиков // Актуальные проблемы энергетики АПК : матер. Междунар. науч.-практ. конф. – Саратов : КУБик, 2012. – С. 18–20.

29. *Ерошенко, Г. П.* Обоснование корректирования периодичности технического обслуживания электрооборудования в сельском хозяйстве / Г. П. Ерошенко, **С. М. Бакиров** // Актуальные проблемы энергетики АПК : матер. Междунар. науч.-практ. конф. – Саратов : КУБик, 2013. – С. 35–38.

30. *Ерошенко, Г. П.* Экспериментальная проверка компенсации реактивной мощности полярными электролитическими конденсаторами / Г. П. Ерошенко, **С. М. Бакиров**, Ш. З. Зиниев // Актуальные проблемы энергетики АПК : матер. Междунар. науч.-практ. конф. – Саратов : КУБик, 2015. – С. 32–35.

31. **Бакиров, С. М.** Анализ использования самоходной электрифицированной рельсовой тележки / С. М. Бакиров, А. П. Ищенко // Актуальные проблемы энергетики АПК : матер. Междунар. науч.-практ. конф. – Саратов : ЦеСАин, 2016. – С. 14–16.

32. **Бакиров, С. М.** Значение разработки подъемно-транспортного электрифицированного агрегата для теплиц закрытого грунта / С. М. Бакиров, С. С. Елисеев // Актуальные проблемы энергетики АПК : матер. Междунар. науч.-практ. конф. – Саратов : ЦеСАин, 2016. – С. 12–14.

33. **Бакиров, С. М.** Рельсовая электрифицированная тележка / С. М. Бакиров, А. П. Ищенко // Актуальные проблемы энергетики АПК : матер. Междунар. науч.-практ. конф. – Саратов : ЦеСАин, 2017. – С. 11–15.

34. **Бакиров, С. М.** Подъемно-транспортный радиоуправляемый электрифицированный агрегат для теплиц / С. М. Бакиров, С. С. Елисеев // Фундаментальные и прикладные исследования : проблемы и результаты : сб. матер. XXXIV Междунар. науч.-практ. конференции. – Новосибирск : ЦРНС, 2017 – С. 321–323.

35. **Бакиров, С. М.** Особенности электроснабжения дождевальных машин кругового действия / С. М. Бакиров, Г. С. Котюшко, А. В. Чернов // Актуальные проблемы энергетики АПК : матер. Междунар. науч.-практ. конф. / ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ. – Саратов : ЦеСАин, 2017. – С. 17–20.

36. **Бакиров, С. М.** Разработка электроцикла для сельского хозяйства / С. М. Бакиров, А. Ю. Здобнов // Актуальные проблемы энергетики АПК : матер. X нац. науч.-практ. конф. с междунар. участием / ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ ; под общ. ред. В. А. Трушкина. – Саратов : ЦеСАин, 2019. – С. 15–18.

37. **Бакиров, С. М.** Анализ существующих систем слежения и управления автономными электрифицированными машинами / С. М. Бакиров, С. С. Елисеев // Актуальные проблемы энергетики АПК : матер. X нац. науч.-практ. конф. с междунар. участием / под общ. ред. В. А. Трушкина. – Саратов : ЦеСАин, 2019. – С. 18–22.

38. **Бакиров, С. М.** Влияние загрязнений на производительность солнечных модулей, используемых в полевых условиях / С. М. Бакиров, С. С. Елисеев // Актуальные проблемы энергетики АПК : матер. X нац. науч.-практ. конф. с междунар. участием / под общ. ред. В. А. Трушкина. – Саратов : ЦеСАин, 2019. – С. 22–25.

39. **Бакиров, С. М.** Проблема быстрого износа аккумуляторных батарей мобильных сельскохозяйственных машин / С. М. Бакиров, А. П. Ищенко // Актуальные проблемы энергетики АПК : матер. X нац. науч.-практ. конф. с междунар. участием / под общ. ред. В. А. Трушкина. – Саратов : ЦеСАин, 2019. – С. 25–28.

40. **Бакиров, С. М.** Актуальность разработки робота-исследователя параметров почвы / С. М. Бакиров, Д. В. Митрофанов // Актуальные проблемы энергетики АПК : матер. X нац. науч.-практ. конф. с междунар. участием / под общ. ред. В. А. Трушкина. – Саратов : ЦеСАин, 2019. – С. 28–31.

41. **Ерошенко, Г. П.** Значение динамической компенсации реактивной мощности электродвигателей сельскохозяйственных предприятий / Г. П. Ерошенко, **С. М. Бакиров**, Ш. З. Зиниев, А. С. Грачев // Актуальные проблемы энергетики АПК : матер. X нац. науч.-практ. конф. с междунар. участием / под общ. ред. В. А. Трушкина. – Саратов : ЦеСАин, 2019. – С. 89–94.

42. **Бакиров, С. М.** Оценка применения различных источников энергии дождевальной машины кругового действия / С. М. Бакиров, С. С. Елисеев // Проблемы экономичности и эксплуатации автотракторной техники : матер. 32-го Междунар. семинара им. В. В. Михайлова. – Саратов, 2019. – С. 160–166.

43. **Бакиров, С. М.** Разработка классификации учитываемых факторов при обосновании способа энергоснабжения мобильных электрифицированных машин / С. М. Бакиров, А. П. Ищенко // Проблемы экономичности и эксплуатации автотракторной техники : матер. 32-го Междунар. семинара им. В. В. Михайлова. – Саратов, 2019. – С. 167–172.

44. **Бакиров, С. М.** Анализ энергозатрат на дождевальную машину / С. М. Бакиров // Аграрный научный журнал. – 2019. – № 3. – С. 83–88.

45. **Бакиров, С. М.** Перспективы развития дождевальной техники / С. М. Бакиров // Аграрный научный журнал – 2019. – № 12. – С. 92–97.

46. **Соловьев, Д. А.** Моделирование нейроуправления скоростью дождевальных машин / Д. А. Соловьев, Г. Н. Камышова, Н. Н. Терехова, **С. М. Бакиров** // Аграрный научный журнал. – 2020. – № 7. – С. 81–84.

47. **Есин, А. И.** Обоснование применения бустерного насоса с электроприводом крайней секции дождевальной машины / А. И. Есин, Д. А. Соловьев, **С. М. Бакиров** // Аграрный научный журнал. – 2020. – № 4. – С. 83–87.