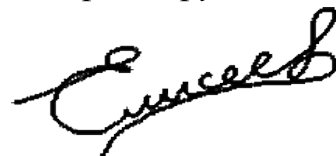


Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский государственный аграрный университет имени Н. И. Вавилова»

*На правах рукописи*

**ЕЛИСЕЕВ Сергей Сергеевич**



**РАЗРАБОТКА АВТОНОМНОЙ СИСТЕМЫ  
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ДОЖДЕВАЛЬНОЙ  
МАШИНЫ КРУГОВОГО ДЕЙСТВИЯ  
С СОЛНЕЧНЫМИ И АККУМУЛЯТОРНЫМИ  
БАТАРЕЯМИ**

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

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель –  
доктор технических наук,  
доцент Бакиров С. М.

Саратов 2022

## ОГЛАВЛЕНИЕ

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ .....	4
ВВЕДЕНИЕ .....	5
1. АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ПРИМЕНЕНИЯ АВТОНОМНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С СОЛНЕЧНЫМИ И АККУМУЛЯТОРНЫМИ БАТАРЕЯМИ ДЛЯ ДОЖДЕВАЛЬНОЙ МАШИНЫ КРУГОВОГО ДЕЙСТВИЯ .....	10
1.1 Особенности эксплуатации электрифицированных дождевальных машин кругового действия .....	10
1.2 Анализ условий применения солнечных батарей в Саратовской области .....	23
1.3 Особенности эксплуатации вентильно-индукторного электропривода .....	39
1.4 Режимы орошения электрифицированными дождевальными машинами кругового действия .....	44
1.5 Постановка цели и задач исследования .....	48
2. ОБОСНОВАНИЕ АВТОНОМНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ СЕКЦИИ ДОЖДЕВАЛЬНОЙ МАШИНЫ КРУГОВОГО ДЕЙСТВИЯ С СОЛНЕЧНЫМИ И АККУМУЛЯТОРНЫМИ БАТАРЕЯМИ .....	51
2.1 Обоснование структуры автономной системы электроснабжения дождевальной машины .....	51
2.2 Оценка энергетической эффективности применения солнечных батарей с аккумуляторными батареями .....	60
2.3 Обоснование математической модели зависимости параметров автономного источника электроснабжения от продолжительности работы электропривода секции дождевальной машины .....	67
2.4 Варианты коммутации элементов системы электроснабжения от солнечных и аккумуляторных батарей с нагрузкой .....	76
2.5 Разработка алгоритма контроллера источника с солнечными и аккумуляторными батареями .....	82

2.6 Обоснование условий обслуживания солнечных батарей для секции дождевальнoй машины круговoгo действия .....	88
2.7 Вывoды по главе .....	93
<b>3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АВТОНОМНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА СЕКЦИИ ДОЖДЕВАЛЬНОЙ МАШИНЫ КРУГОВОГО ДЕЙСТВИЯ С СОЛНЕЧНЫМИ И АККУМУЛЯТОРНЫМИ БАТАРЕЯМИ .....</b>	<b>94</b>
3.1. Методика экспериментального исследования .....	94
3.2. Разработка лабораторного стенда секции дождевальнoй машины круговoгo действия с солнечными и аккумуляторными батареями .....	95
3.3. Проверка параметров автономной системы электроснабжения секции дождевальнoй машины круговoгo действия в полевых условиях .....	99
3.4 Обработка результатов эксперимента и сравнение теоретических и экспериментальных данных .....	103
3.5. Вывoды по главе .....	109
<b>4. ОБОСНОВАНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЕДЛОЖЕННЫХ РЕШЕНИЙ .....</b>	<b>110</b>
4.1. Методика расчета технико-экономической эффективности предложенных решений .....	110
4.2. Расчет капиталовложений в автономную систему электроснабжения с солнечными и аккумуляторными батареями .....	112
4.3 Расчет показателей экономической эффективности применения автономной системы электроснабжения с солнечными и аккумуляторными батареями .....	116
4.4 Вывoды по главе .....	122
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>124</b>
<b>РЕКОМЕНДАЦИИ ПРОИЗВОДСТВУ .....</b>	<b>125</b>
<b>ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ .....</b>	<b>126</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>127</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЯ .....</b>	<b>141</b>

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ДМ – дождевальная машина

МДЭК – машина дождевальная электрифицированная круговая

СЭС – солнечная электростанция

СБ – солнечная батарея

АБ – аккумуляторная батарея

ТО – техническое обслуживание

КПД – коэффициент полезного действия

ВАХ – вольт-амперная характеристика

АД – асинхронный двигатель

САБ – солнечные и аккумуляторные батареи

ЭДМКД – электрифицированная дождевальная машина кругового действия

ВИД – вентильно-индукторный двигатель

ЭДС – электродвижущая сила

ШИМ – широтно-импульсный модуль

ЭД – электродвигатель

ПСЛ – прибор синхронизации в линию

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** Полив дождеванием гарантирует получение урожая независимо от фактора засухи. Выполнение задач государственных программ способствует активному проектированию систем искусственного орошения, проведению закупок, монтажа и эксплуатации дождевальных машин (ДМ).

Электроснабжение электрифицированных ДМ кругового действия осуществляется от централизованной сети или от автономных источников электроэнергии. Особенностью эксплуатации ДМ является удаленность до 40 км от централизованных энергосистем, поэтому применяют автономные системы электроснабжения в виде генераторов или аккумуляторных батарей (АБ). Цена электроэнергии, произведенной дизельными генераторами, достигает 13,8–15,5 руб. за 1 кВт·ч.

Для электроснабжения аккумуляторных батарей используют различные источники, в том числе солнечные батареи (СБ). Однако применение солнечных электростанций проблематично для электроснабжения дождевальной машины по ряду причин: дождевальная машина при поливе перемещается, меняя свое положение относительно солнца; площадь размещения СБ на конструкции ДМ ограничена размерами водопроводящего трубопровода; сложность использования устройств ориентации солнечных батарей по градиенту излучения. Также использование электродвигательной нагрузки в системах электроснабжения на постоянном токе ограничено из-за отсутствия обоснованных параметров мощности. Эти особенности требуют проведения исследований, нацеленных на развитие автономной системы электроснабжения дождевальной машины кругового действия путем использования солнечных и аккумуляторных батарей (САБ), и являются важной научной задачей.

Основанием проведения работы являются: государственная программа эффективного вовлечения в оборот земель сельскохозяйственного назначения и развития мелиоративного комплекса РФ (№ 731 от 14.05.2021 г.); государственная программа развития мелиорации земель сельскохозяйственного назначения России на

2014–2020 гг. (№ 922 от 12 октября 2013 г); приоритетное научное направление «Ресурсосберегающее экологически безопасное земледелие» ФГБОУ ВО «Саратовский ГАУ» (рег. № 01201151791).

**Степень разработанности темы исследования.** Проблемам применения дождевальных машин посвящены работы Ю. Ф. Снопича, В. И. Ольгаренко, Б. П. Фокина, А. К. Носова. Совершенствованием конструкции дождевальных машин кругового действия занимались такие ученые, как Д. А. Соловьев, Ф. К. Абдразаков, Л. А. Журавлёва, Н. Ф. Рыжко, А. И. Рязанцев. Вопросам эксплуатации автономных источников электроснабжения посвящены труды Г. П. Ерошенко, С. В. Оськина, С. К. Шерязова, Р. А. Амерханова, А. В. Бастрона, Б. В. Лукутина, С. М. Бакирова. Однако вопрос применения САБ для автономного электроснабжения электропривода передвижной электрифицированной техники (а именно – дождевальной машины кругового действия) требует дальнейшего изучения.

**Цель работы** – повышение эффективности электроснабжения дождевальной машины кругового действия за счет обеспечения рабочего цикла электропривода секции применением источника с солнечными и аккумуляторными батареями.

**Задачи исследования:**

1. Провести анализ существующих способов электроснабжения электрифицированных дождевальных машин кругового действия и условий применения автономной системы электроснабжения с САБ и вентильным электроприводом секции ДМ кругового действия.

2. Разработать математическую модель обоснования параметров автономного источника электроснабжения и выявить условия обслуживания солнечных батарей для секции дождевальной машины кругового действия.

3. Выполнить экспериментальную проверку автономной системы электроснабжения в лабораторных и полевых условиях на секции дождевальной машины кругового действия.

4. Определить экономическую эффективность внедрения автономной системы электроснабжения электропривода дождевальной машины кругового действия с солнечными и аккумуляторными батареями.

**Объект исследования** – автономная система электроснабжения электропривода секции дождевальной машины кругового действия.

**Предмет исследования** – выявление закономерностей влияния совокупности параметров источника с солнечными и аккумуляторными батареями на характеристики рабочего цикла электропривода дождевальной машины кругового действия.

**Научную новизну работы представляют:**

- математическая модель изменения параметров источника с солнечными и аккумуляторными батареями в функции продолжительности работы электропривода опорной тележки секции дождевальной машины кругового действия;

- зависимость резерва мощности солнечной батареи автономной системы электроснабжения от удаленности секции дождевальной машины от пункта ремонта в течение рабочего цикла.

**Теоретическая и практическая значимость работы состоит:**

- в разработке математической модели изменения параметров источника с солнечными и аккумуляторными батареями в функции продолжительности работы электропривода опорной тележки секции дождевальной машины кругового действия;

- в развитии автономных систем электроснабжения с солнечными и аккумуляторными батареями для передвижной сельскохозяйственной техники (а именно – дождевальной машины кругового действия), которое заключается в обосновании влияния совокупности параметров источника с солнечными и аккумуляторными батареями на характеристики рабочего цикла электропривода опорной тележки секции дождевальной машины кругового действия;

- в обосновании способа технической эксплуатации дождевальной машины кругового действия с автономной системой электроснабжения;

- в практическом применении научных разработок и результатов исследования в производстве на предприятиях АПК Саратовской, Волгоградской областей и Чеченской Республики, а также в учебном процессе образовательных заведений всех форм собственности при чтении лекций, проведении лабораторно-практических занятий по вопросам электроснабжения дождевальных машин.

**Методология и методы исследований.** Теоретические исследования проведены на основе законов электротехники, эксплуатации электрооборудования с применением основных методов научного познания: анализ, системный подход, наблюдение, сравнение, измерение и обобщение.

Проведена экспериментальная проверка продолжительности работы электропривода опорной тележки секции дождевальной машины с источником с солнечными и аккумуляторными батареями в лабораторных и полевых условиях с применением современных и аттестованных измерительных устройств, а результаты обработаны методами математической статистики.

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

1. Математическая модель зависимости параметров солнечной батареи и электропривода секции дождевальной машины, учитывающая вектор Пойнтинга и продолжительность дневного промежутка времени.

2. Варианты коммутации солнечных и аккумуляторных батарей, обеспечивающие рабочий цикл электропривода в соответствии с графиком полива (дневной, ночной поливы) и загруженностью насосной станции, питающей ДМ.

**Степень достоверности и апробация результатов.**

Достоверность результатов исследований подтверждена в ходе экспериментальной проверки работоспособности электропривода секции дождевальной машины кругового действия с солнечными и аккумуляторными батареями автономной системы электроснабжения и сходимостью теоретических и экспериментальных данных.

Основные положения работы обсуждены на национальных научно-практических конференциях с международным участием «Актуальные проблемы энергетики» (г. Саратов, 2017–2021 гг.); конференциях ППС кафедры «Инженерная



физика, электрооборудование и электротехнологии» ФГБОУ ВО «Саратовский ГАУ» (г. Саратов, 2019–2021 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 Всероссийском конкурсе научно-инновационных работ среди студентов, аспирантов и молодых ученых, направление «Технические науки» (г. Саратов, г. Уфа, г. Рязань, 2019 г.).

Основные положения диссертации отражены в 9 работах, в том числе в 4 статьях в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК, 1 статье в издании, включенном в базу Scopus, 1 патенте на изобретение и 1 патенте на полезную модель. Общий объем публикаций составляет 2,94 печ. л., из которых 1,31 печ. л. принадлежит лично соискателю.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 134 наименований, 37 из которых на иностранном языке. Материал работы изложен на 155 страницах машинописного текста, включает в себя 62 рисунка, 36 таблиц и 2 приложения.

# 1. АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ПРИМЕНЕНИЯ АВТОНОМНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С СОЛНЕЧНЫМИ И АККУМУЛЯТОРНЫМИ БАТАРЕЯМИ ДЛЯ ДОЖДЕВАЛЬНОЙ МАШИНЫ КРУГОВОГО ДЕЙСТВИЯ

## 1.1 Особенности эксплуатации электрифицированных дождевальных машин кругового действия

Электрифицированные дождевальные машины условно можно представить тремя поколениями, поскольку они имеют ярко выраженные характеристики.

К первому поколению электрифицированных дождевальных машин относятся многоопорные широкозахватные ДМ, такие, как «Волжанка», «Фрегат», «Днепр» [1, 25, 32, 131].

ДМ «Волжанка» является машиной с фронтальным способом перемещения. Она состоит из двух крыльев, являющихся трубопроводом. Передвижение каждого крыла осуществляется за счет приводной тележки, на которой расположена рама с бензиновым двигателем. Энергоприемники дождевальной машины «Волжанка» потребляют энергию для перемещения массы крыльев по полю. Ширина крыла в зависимости от модификации может достигать 400 м. Масса дождевальной машины 5420 кг. Мощность, необходимая для ее движения, составляет 30 кВт.

ДМ «Фрегат» представляет собой трубопровод с дождевальными аппаратами, расположенный на опорах-тележках. Для передвижения служит гидравлический привод. Длина машины достигает 1000 м. Подача воды к дождевальной машине «Фрегат» осуществляется индивидуальной насосной станцией [98, 99].

Мощность и масса дождевальных машин первого поколения приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Мощность и масса дождевальных машин первого поколения с одинаковой поливной площадью (одинаковыми габаритными размерами)

Показатель	ДК-64 «Волжанка»	ДФ-120 «Днепр»	ДМ-454-100 «Фрегат»
Мощность, кВт	30	56,2	45
Масса (сухая), кг	10840	машины – 13347 трактора – 3404 станции – 700	15101 31300**

\*\*ДМУ-Б572-90

Как видно из таблицы 1.1, электрифицированные дождевальные машины первого поколения были энергоемкими. При этом энергопотребление ДФ-120 «Днепр» в 1,87 раза больше по сравнению с ДК-64 «Волжанка».

Второе поколение электрифицированных дождевальных машин представлено семейством «Кубань», установками импульсного и мелкодисперсного дождевания.

Электроснабжение автоматизированной электрической дождевальной машины ЭДМФ «Кубань» осуществляется генератором ЕСС 5-82-4У2 с приводным двигателем К 272М в составе дизель-насосного агрегата. На опорных тележках установлены электродвигатели типа МАП 121-4 [26].

Одним из важных составных элементов является система управления и защиты, являющаяся потребителем электроэнергии. Система управления больше всего подвержена внешним воздействиям при эксплуатации ДМ. Однако она имеет низкое энергопотребление – на 3,1–8,7 % меньше по сравнению с основным потребителем электроэнергии – электродвигателем.

Мощность дождевальной машины ЭДМФ «Кубань» – 30 кВт, а ее сухая масса – 35 000 кг.

Электрифицированные дождевальные машины третьего поколения широко эксплуатируют в настоящее время. Распространены следующие модификации: МДЭК («КАСКАД»), ДМФ-К-Б17 «Фрегат», Lindsay Zimmatic 9500 P/MP, Valley 8120, Bauer, RKD.

МДЭК («КАСКАД») состоит из неподвижной опоры, фермы и консоли трубопровода, расположенном на опорных тележках. Электроснабжение дождевальной машины осуществляется источником от дизельного генератора [49]. Электроприемником является электропривод подвижных опор. Внешний вид этой машины представлен на рисунке 1.1.

Электрифицированные дождевальные машины ДМФ-К-Б17 «Фрегат», Lindsay марки Zimmatic 9500 P/MP и марки Valley 8210 Valmont Irrigation являются ДМ третьего поколения. Они схожи по конструкции, техническому оснащению и потреблению энергии [74, 76, 127].



Рисунок 1.1 – Дождевальная электрифицированная машина кругового действия «КАСКАД»

Мощность и масса некоторых отечественных и зарубежных дождевальных машин третьего поколения приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – **Мощность и масса отечественных и зарубежных электрифицированных дождевальных машин третьего поколения с равным количеством секций**

Показатель	МДЭК («КАСКАД»)	ДМФ-К-Б17 «Фрегат»	Lindsay Zimmatic 9500 P/MP	Valley 8120
Мощность, кВт	6	6	6	7,4
Масса (сухая), кг	15000	17500	17500	15500

Для сравнения сведем в таблицу 1.3 показатели мощности дождевальных машин всех поколений.

Таблица 1.3 – **Мощность дождевальных машин всех поколений**

Марка машины	Поколение	Мощность, кВт
ДК-64 «Волжанка»	1-е	<b>30,0</b>
ДФ-120 «Днепр»	1-е	<b>56,2</b>
ДМ-454-100 «Фрегат»	1-е	<b>45,0</b>
ЭМДФ «Кубань»	2-е	<b>30,0</b>
МДЭК («КАСКАД»)	3-е	<b>6,0</b>
ДМФ-К-Б17 «Фрегат»	3-е	<b>6,0</b>
Lindsay Zimmatic 9500 P/MP	3-е	<b>6,0</b>
Valley 8120	3-е	<b>7,4</b>

Суммарное количество дождевальных машин, эксплуатируемых в Российской Федерации, приведено в таблице 1.4.

Таблица 1.4 – Количество дождевальных машин в Российской Федерации

Отечественного производства		Зарубежного производства	
наименование	количество, ед.	наименование	количество, ед.
ДМ «Фрегат»	2966	ШЭДМ	952
ЭДМФ «Кубань»	47	Кругового типа	839
ДДА-100М	513	Фронтального типа	113
ДКШ-64 «Волжанка»	575	Шланго-барабанного типа	951
ДД-30	609		
Прочие	1734		
Всего	6393	Всего	2414

Согласно [33, 46, 53], в исправном состоянии находятся около 50 % дождевальных машин отечественного производства, около 25 % имеют истекший срок годности – в основном это машины 2-го и 1-го поколений. Доля импортных ДМ составляет 25 %. Исходя из этого, становятся актуальными обновление рынка дождевальных машин и внедрение современных технологий.

Судя по показателям установленной мощности ДМ разных поколений, а также примерной одинаковой продолжительности работы машин за один круг (оборот) и за сезон, энергопотребление машин пропорционально зависит от их потребляемой мощности на перемещение. Поэтому энергоэффективность современных электрифицированных дождевальных машин выше по сравнению с машинами 1-го поколения в 6,6 раза, а с машинами 2-го поколения – в 5 раз. В первую очередь это связано с уровнем развития техники и технологий в области орошения (применение облегченных конструкций, что снижает материалоемкость; рациональное использование энергии; эффективное автоматическое управление и т. д.). Все способы повышения эффективности работы ДМ и снижения энергопотребления развиваются параллельно.

Классификация способов повышения эффективности дождевальных машин представлена на рисунке 1.2 [37, 126].



Рисунок 1.2 – Классификация способов повышения эффективности ДМ

Одним из перспективных направлений развития источников электроснабжения ДМ является использование возобновляемой энергии [35]. Такими источниками служат солнечные батареи или ветряные установки, а ресурсом для преобразования в электрическую энергию – солнечная энергия или ветер. Преимущество использования солнечных батарей по сравнению с ветряными установками состоит в том, что ветер имеет подъемную силу, которая может перевернуть или сдвинуть водопроводящий трубопровод.

В целом применение возобновляемой энергии обеспечивает сокращение затрат на ресурс. При этом также наблюдается ряд интегральных эффектов: сокращение потерь на передачу электрической энергии, поскольку солнечные батареи можно устанавливать рядом с электроприводом, развитие микроэлектронной системы управления ДМ.

Применение СБ в конструкции дождевальных машин зависит от ориентации перемещения солнца. К тому же ДМ могут быть кругового и фронтального действия, что будет влиять на размещение солнечных батарей.

Машины кругового и фронтального действия имеют различные принципы эксплуатации.

Для эксплуатации дождевальных машин с фронтальным способом перемещения необходимо дополнительно выводить гидранты или оснащать инфраструктуру подключения к водному ресурсу. Для некоторых модификаций нужно строить дорожное полотно для передвижения водозаборной подвижной опоры, что уменьшает площадь выращивания культуры, или необходимо устанавливать гидранты через каждые 50–150 м для переключения питающих шлангов, которое выполняют вручную, что усложняет эксплуатацию. Дождевальные машины фронтального способа перемещения эксплуатируют на полях прямоугольной формы протяженностью до 3 км, с уклоном не более 5 % [86]. С учетом этих факторов стоимость электрифицированных дождевальных машин с фронтальным способом перемещения превышает стоимость электрифицированных дождевальных машин с круговым способом перемещения в 1,3–1,4 раза. При этом эксплуатационные затраты выше в 1,2–1,5 раза.

Преимуществами дождевальных машин кругового действия является простота эксплуатации за счет того, что место присоединения к водоисточнику находится в одном месте, а система автоматического управления параметрами движения ДМ устроена так, что она может работать без участия человека.

Дождевальные машины кругового действия имеют возможность эксплуатации на полях с уклоном до 15 % (благодаря конструкции шарнирно закрепленных секций [93]), а также на полях различной формы благодаря дальнеструйному водомёту, который расположен на консольном трубопроводе.

Одним из недостатков эксплуатации дождевальных машин с круговым способом перемещения является наличие неохваченных участков поля (рисунок 1.3).

Часть участков, не охваченных дождем, удается полить дальнеструйным гидрантом (водометом) на консольном трубопроводе (рисунок 1.4), но все равно возрастают убытки из-за неохваченных участков, которые, однако, в несколько раз ниже затрат на эксплуатацию фронтальных машин за сезон. Эти затраты складываются из того, что требуется минимум два оператора на управление фронтальной машиной. Кроме того, при закрытой оросительной сети необходимо тщательно контролировать подачу воды по гибкому трубопроводу, который может перегнуться, прорваться и т. д.

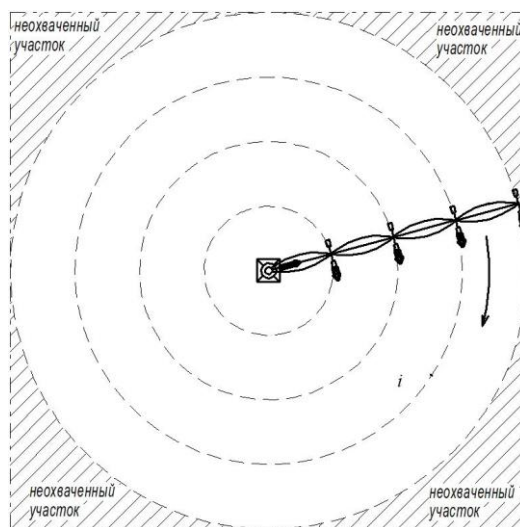


Рисунок 1.3 – Неохваченные участки при эксплуатации дождевальных машин кругового действия

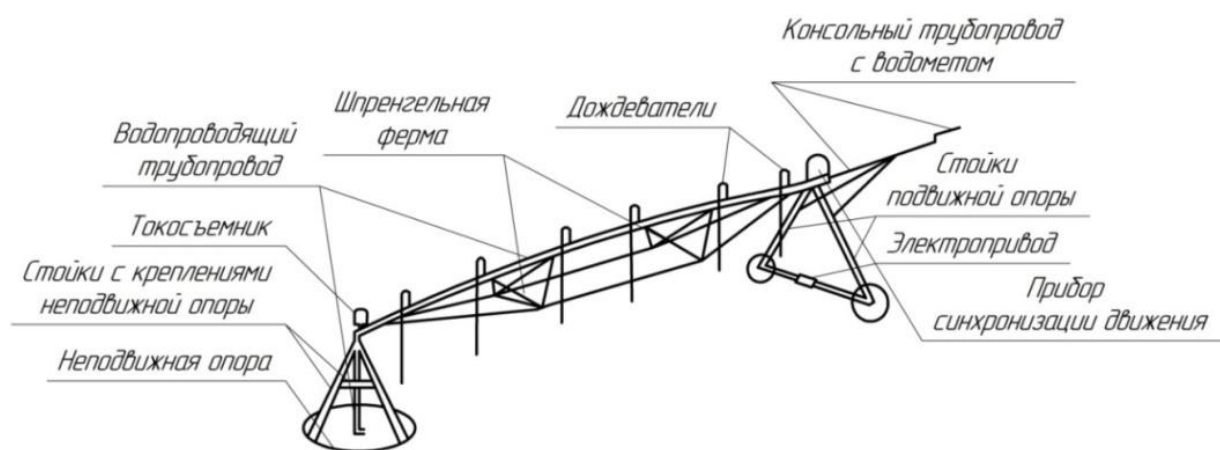


Рисунок 1.4 – Конструкция неподвижной опоры и секции дождевальной машины кругового действия

В Саратовской обл. больше всего дождевальной техники используют в Марксовском районе – около 650 ед. Крупнейшие сельскохозяйственные предприятия эксплуатируют современные дождевальные машины кругового действия. Например, АО «ПЗ «Мелиоратор»» имеет парк дождевальной техники, состоящий из 61 машины, из которых 29 – модернизированные машины третьего поколения марки Zimmatic. Общая поливная площадь этого предприятия составляет 4376 га [73]. На рисунке 1.5 представлен вид со спутника поливных площадей Марксовского р-на Саратовской обл.



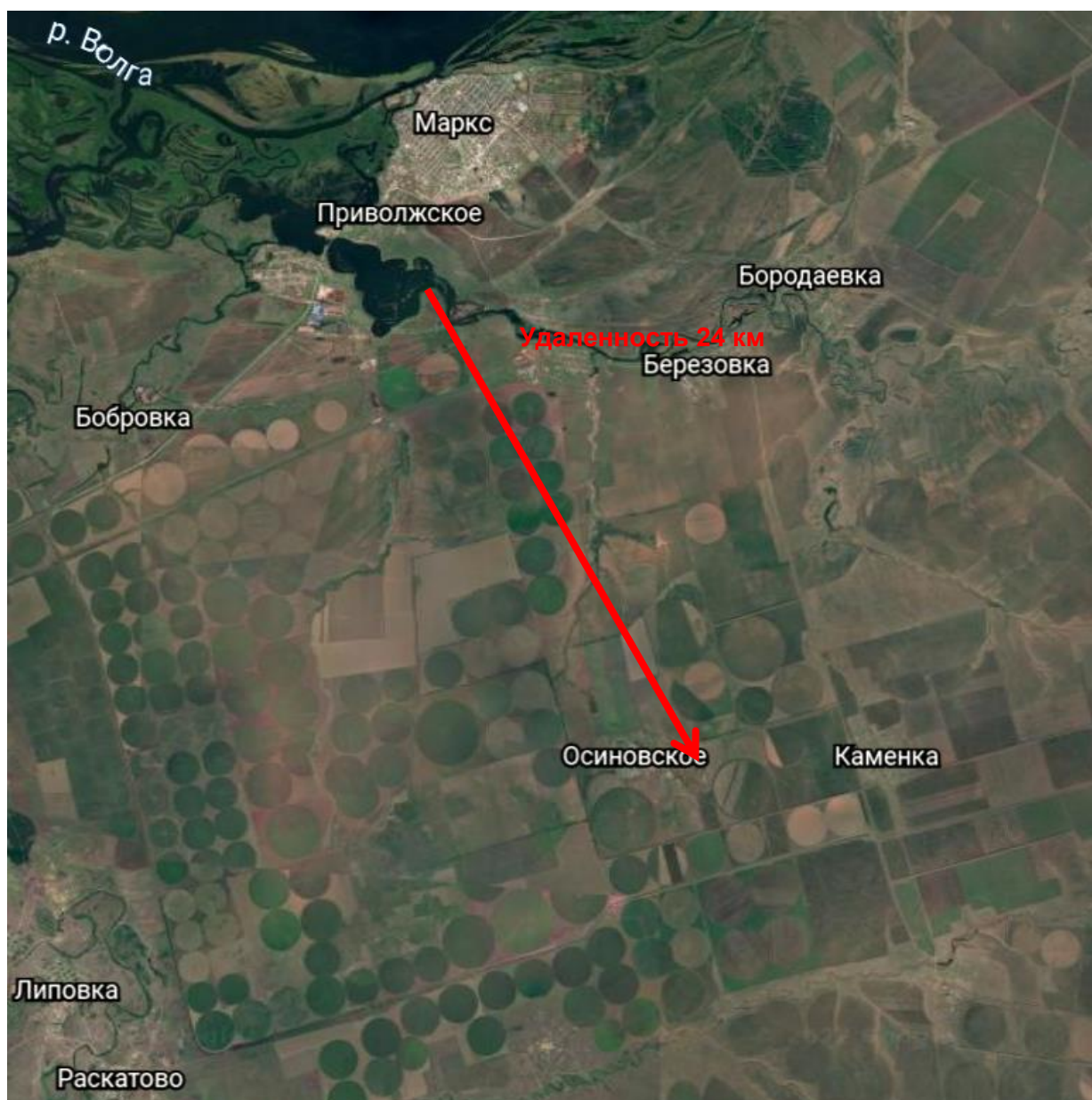


Рисунок 1.5 – Орошаемые площади Марковского р-на Саратовской обл.

Дождевальные машины удалены от централизованных источников электропитания на расстояние 20–30 км. Поэтому источниками электроснабжения дождевальных машин кругового действия служат дизельные или бензиновые электростанции, так как использование кабельного электроснабжения с установкой трансформаторной подстанции становится экономически нецелесообразным.

Современные дождевальные машины отечественного производства применяются также в других районах Саратовской обл.

В период хранения дизельная электростанция находится в складском помещении, поэтому перед ее вводом в эксплуатацию необходимо проверить состоя-

ние изоляции на отсутствие повреждений, которые возможны из-за проникновения грызунов под корпус [59]. На основе практических данных можно выделить следующие виды работ по обслуживанию дизельной электростанции (таблица 1.5).

Таблица 1.5 – Обслуживание дизельной электростанции

Вид работ	Состав работ	Периодичность
Регулировка и настройка оборудования	Проверка правильности электрических соединений, уровня топлива, заряда аккумулятора, пуск на холостом ходу	Ввод в эксплуатацию перед началом сезона орошения
Подготовка к эксплуатации	Погрузка, доставка до места эксплуатации, монтаж на месте эксплуатации, проверка пуска	
Запуск	Осмотр всех частей, проверка уровня масла и топлива, электрической части, надёжности изоляции	Ежедневно после ввода в эксплуатацию
Техническое обслуживание	В соответствии с инструкцией эксплуатации	В соответствии с инструкцией эксплуатации (после наработки 50–100 ч)
Текущий ремонт	В соответствии с видами работ, выполняемых ремонтным персоналом	При выходе из строя элементов
Замена основных частей	Замена аккумулятора и других основных частей	По истечении срока службы

Анализ работ по обслуживанию дизельной электростанции показывает, что основными их видами являются техническое обслуживание и ремонт. ТО осуществляют после некоторой наработки дизельной электростанции.

Основные эксплуатационные затраты ДМ формируются из затрат на топливо за сезон. Данные по расходу дизельного топлива могут быть различными в зависимости от его стоимости и времени работы машины. В Саратовской обл. стоимость дизельного топлива на автозаправочных станциях варьируется от 46,25 до 51,5 руб./л [52].

Некоторые эксплуатационные характеристики дизельной электростанции для дождевальной машины МДЭК «КАСКАД» приведены в таблице 1.6.

Эксплуатация дождевальных машин осуществляется в жестких условиях, под воздействием прямых солнечных лучей, ветра, атмосферных осадков, запыления и т. д. [36, 84]. Это приводит к снижению срока службы элементов электрической и механической систем, а также гидравлических узлов. Например, под действием солнечных лучей скоротечному износу подвержена изоляция соедине-

тельных проводов и кабелей, поскольку действие ультрафиолетовых лучей на первый слой изоляции вызывает ее затвердевание. В дальнейшем при механическом воздействии этот слой крошится, что приводит к нарушению целостности кабельной линии и короткому замыканию в месте истирания.

Таблица 1.6 – Эксплуатационные характеристики дизельной электростанции марки ТСС12М МДЭК «КАСКАД»

Показатель	Значение
Средняя отпускаемая активная мощность, кВт	7,4
Расход топлива при загрузке 60 %, л	
за 1ч	2,4
за сезон	3192
Продолжительность эксплуатации ДМ, ч	
за оборот	36
за сезон	324
Стоимость 1 кВт·ч электроэнергии, руб.	
при цене дизельного топлива 46,25 руб./л	15,0
при цене дизельного топлива 49,50 руб./л	16,05

Электрическая система содержит электропривод, электрическую станцию, щит управления дождевальнoй машиной, сигнальную лампу, токосъемники, соединительные кабели. Механическая система включает в себя металлоконструкцию неподвижной опоры, водопроводящий трубопровод, опорные тележки и крепления к ним. Все элементы этих систем находятся под воздействием различных погодных факторов.

Разрушительное действие солнечных лучей совместно с повышенной температурой ослабляет прочность и повышает хрупкость пластиковых и резиновых материалов, из которых изготовлены отдельные элементы электрической системы. Срок службы материала, из которого изготовлена крышка токосъемника, составляет 7–10 лет. Воздействие атмосферных осадков вызывает коррозию крепежных элементов. Антикоррозийные покрытия позволяют повысить срок эксплуатации изделий.

На кабельные соединения и всю электрическую систему негативное влияние могут оказать удары молний. При разряде молнии возникают перенапряжение и повышенные токи в кабелях, что приводит к плавлению жил, разрушению изо-

ляции. В качестве защитных мероприятий используют заземление. На изоляцию кабеля, проложенного на водопроводящем трубопроводе, оказывает влияние механическое трение о трубопровод при движении по всей длине трубопровода. Как показывает практика, в первый год обслуживания разрушительное влияние условий эксплуатации сокращает срок службы изоляции кабеля в 1,25–1,59 раза, а на второй – в 1,71–2,01 раза [9, 34].

Опасное влияние на работу машины оказывает ветер (рисунок 1.6). Он сдвигает секции целиком, нарушая синхронизацию в линию всех секций машины. В дальнейшем ДМ выходит в аварийный режим и не может быть запущена до тех пор, пока вручную не отрегулировать расположение секций в линию.

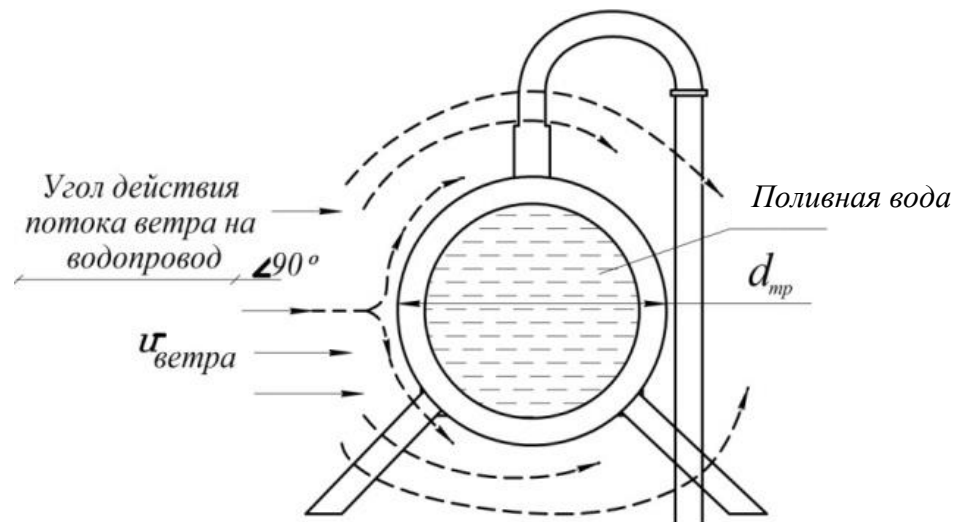


Рисунок 1.6 – Воздействие ветра бокового направления на трубопровод ДМ:  
 $u_{\text{ветра}}$  – скорость ветра, м/с;  $d_{\text{тр}}$  – наружный диаметр трубопровода

Средняя скорость потока ветра в Саратовской обл. составляет 2,1–4,7 м/с. Это не наносит ущерба конструкции дождевальной машины. Максимальная скорость ветра – 20–27 м/с. По шкале Бофорта данные значения оцениваются 10 баллами, что соответствует сильному шторму (24,5–28,4 м/с) [16].

На полях со сложным рельефом поток ветра может опрокидывать дождевальную машину (рисунок 1.7), тем самым нарушая целостность металлических конструкций.



Рисунок 1.7 – Последствия действия сильного ветра при эксплуатации ДМ на поле с уклоном

Разрушительному воздействию ветра наиболее подвержены механические элементы: карданный шарнир секции дождевальной машины (рисунок 1.8), крепление водопроводящего трубопровода к подвижной опоре.



Рисунок 1.8 – Карданный шарнир, соединяющий секции между собой, подвержен изломам и изгибам при действии сильного ветра

Диаметр трубопровода дождевальных машин может быть различным в зависимости от характеристик ДМ. Для «Кубань ЛК1М» («КАСКАД») он составляет

159 мм, для МДЭК «КАСКАД» – 133 мм, 159, 168, 203 и 219 мм [72]. Чем больше диаметр, тем больше масса конструкции и ниже вероятность опрокидывания.

Факторы окружающей среды, влияющие на элементы ДМ, представлены в таблице 1.7.

Таблица 1.7 – Воздействие окружающей среды на основные элементы систем дождевальных машин

Наименование элемента	Воздействие окружающей среды			
	солнечные лучи	атмосферные осадки	поток ветра	запыление
Неподвижная опора	–	появление коррозии	вибрация конструкции, износ крепёжных элементов	–
Дизельная электростанция	разрушение изоляции, повышение рабочей температуры	появление коррозии	вибрация конструкции, износ крепёжных элементов	короткое замыкание электрических элементов
Щит управления	разрушение изоляции, повышение рабочей температуры	аварийные режимы из-за увлажнения, появление коррозии	вибрация конструкции, износ крепёжных элементов	короткое замыкание электрических элементов
Токосъёмник	разрушение изоляции, повышение рабочей температуры	аварийные режимы из-за увлажнения, появление коррозии	вибрация конструкции, износ крепёжных элементов	короткое замыкание электрических элементов
Водопроводящий трубопровод	–	появление коррозии	вибрация конструкции, износ крепёжных элементов	–
Прибор синхронизации движения в линию	разрушение изоляции, повышение рабочей температуры	аварийные режимы из-за увлажнения, появление коррозии	вибрация конструкции, износ крепёжных элементов	короткое замыкание электрических элементов, отсутствие контактов
Электродвигатель	разрушение изоляции, повышение рабочей температуры	аварийные режимы из-за увлажнения, появление коррозии	вибрация конструкции, износ крепёжных элементов	короткое замыкание электрических элементов, отсутствие контактов
Кабельные соединения	разрушение изоляции, повышение рабочей температуры	аварийные режимы из-за увлажнения, появление коррозии	вибрация конструкции, износ крепёжных элементов	короткое замыкание электрических элементов, отсутствие контактов

Анализ эксплуатации электрифицированных дождевальных машин показывает, что непрерывно идет развитие систем энергоснабжения. Так, ДМ первого поколения в 6,6 раза, а второго поколения в 5 раз больше потребляли электроэнергии на водораспределение, чем ДМ третьего поколения. Из возможных вариантов повышения энергетической эффективности дождевальных машин перспективным направлением является использование возобновляемых источников энергии.

Практическими наблюдениями установлено, что наиболее перспективными ДМ являются машины кругового действия, так как их эксплуатационные затраты в 1,2–1,5 раза ниже по сравнению с машинами фронтального действия. Они менее подвержены воздействию различных факторов окружающей среды. Влияние ветра на конструкцию водопроводящего трубопровода исключает установку ветрогенератора, так как возрастает вероятность излома, а действие солнечных лучей можно использовать в фотоэлектрических преобразователях для выработки энергии на перемещение машины.

Применение солнечных батарей для выработки электрической энергии является одним из перспективных направлений повышения энергетической эффективности машин кругового действия, так как в поливной сезон ДМ находятся под действием прямых солнечных лучей. Это требует проведения наблюдений и общих дополнительных исследований для определения количества получаемой электрической энергии в фотоэлектрических преобразователях на территории Саратовской обл., где эксплуатируют значительное количество дождевальной техники.

## **1.2 Анализ условий применения солнечных батарей в Саратовской области**

Уровень энергетической облученности (экспозиции) для регионов Российской Федерации различен. Максимальная энергетическая облученность на внешней поверхности земной атмосферы теоретически составляет 1,36 кВт/м<sup>2</sup> [48]. На поверхности земли она наблюдается на широтах, близких к экватору, и составляет около 1,0 кВт/м<sup>2</sup>. Факторы, влияющие на количество энергетической облученности, представлены в таблица 1.8.

Таблица 1.8 – **Факторы, влияющие на количество энергетической экспозиции при экваториальном расположении местности**

<b>Фактор</b>	<b>Наибольшее количество энергетической экспозиции</b>
Время года	лето
Климат	тропический, экваториальный
Широта местности	близость к экватору
Время суток	полдень (солнце в зените)
Расположение местности	максимальный уровень высоты над уровнем моря
Погода	ясная
Плотность воздуха	низкая
Степень загрязнения воздуха	низкая
Влажность	низкая

Продолжительность потока излучения в Саратовской обл. на 15 % меньше по сравнению с экватором [5, 8].

Продолжительность потока излучения зависит от широты местности, продолжительности светового дня и облачности. В летний период она выше, чем в другие времена года.

Энергетическая экспозиция на территории Российской Федерации увеличивается с севера на юг. В Нижнем Поволжье продолжительность потока излучения – 2000–3000 часов в год, в Саратовской обл. этот показатель составляет в среднем 1700–2000 часов в год.

В летнее время года расстояние, преодолеваемое солнечными лучами до поверхности земли, меньше. Это позволяет большему количеству потока излучения достигать поверхности земли. В полдень солнце находится в зените, вектор Пойнтинга [38, 128, 134] достигает максимального значения. При увеличении или уменьшении вектора Пойнтинга длина пути потока излучения увеличивается, распределение излучения происходит на большую территорию [20, 100, 110, 111].

Коэффициент потерь  $k_y$  от вектора Пойнтинга зависит от угла наклона потока излучения к поверхности земли (рисунок 1.9).

При отклонении угла потока на  $40^\circ$ :

$$k_{y,1} = \frac{S_1}{S_2} = \frac{1}{1,3} = 0,76, \quad (1.1)$$



где  $S_1$  – площадь облучаемой поверхности при абсолютном значении вектора Пойнтинга (угле наклона  $90^\circ$ ),  $\text{м}^2$ ;  $S_2$  – площадь излучаемой поверхности при угле наклона  $50^\circ$ ,  $\text{м}^2$ .

При отклонении угла потока на  $70^\circ$ :

$$k_{y-2} = \frac{S_1}{S_3} = \frac{1}{2,9} = 0,34, \quad (1.2)$$

где  $S_3$  – площадь облучаемой поверхности при угле наклона  $20^\circ$ ,  $\text{м}^2$ .

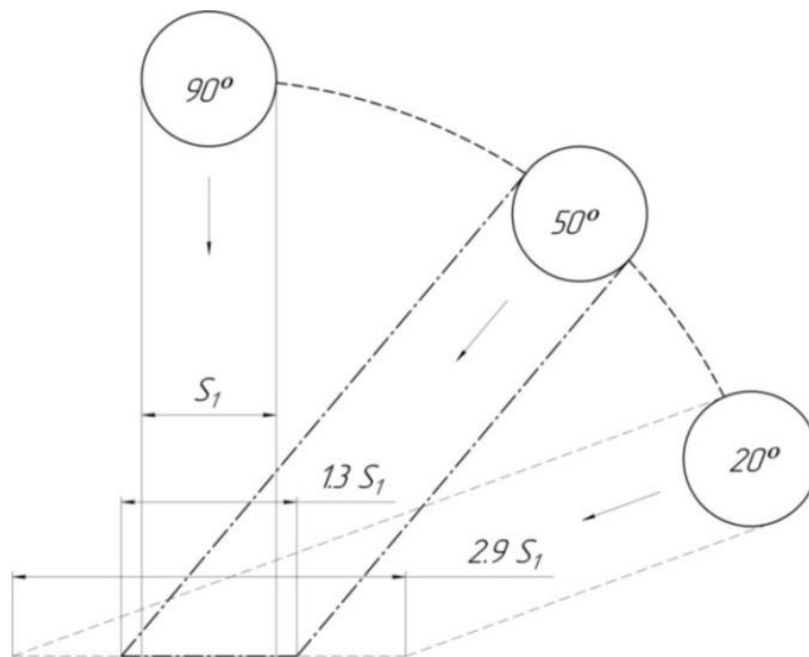


Рисунок 1.9 – Изменение площади облучаемой поверхности в зависимости от угла наклона потока излучения к поверхности

В городских условиях степень загрязнения воздуха выше, чем в сельской местности. Это объясняется наличием выхлопных газов, вредных выбросов в атмосферу от промышленных предприятий и другими причинами. Газы, кислоты, органические продукты сгорания, вещества биологической природы, находясь в атмосфере, рассеивают и поглощают поток излучения в больших количествах на территориях рядом с промышленными предприятиями, чем в удалённых от них местностях [19, 103]. Поэтому энергетическая экспозиция в городских условиях отличается в меньшую сторону от значения этого показателя в зоне эксплуатации дождевальных машин.

На длину пути, который преодолевает поток излучения, достигая поверхности земли, также влияет расположение местности (рисунок 1.10). В горных районах путь потока излучения меньше. В высокогорье воздух разреженный, влажность низкая, и это увеличивает энергетическую экспозицию.

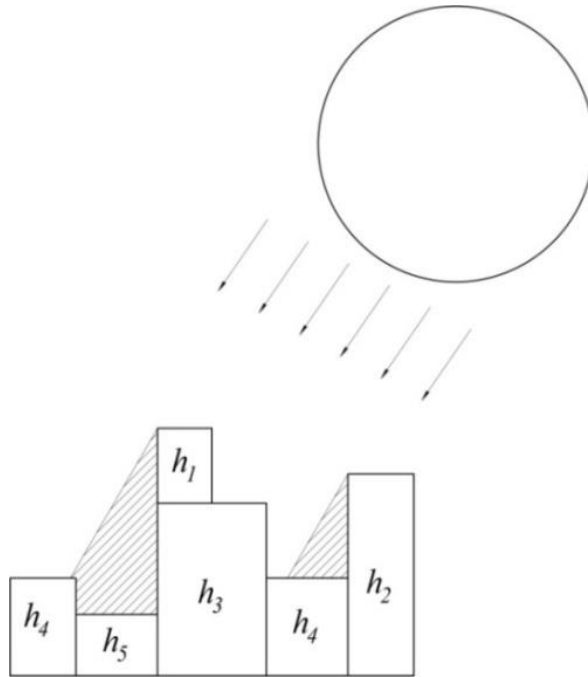


Рисунок 1.10 – Изменение длины пути потока излучения в зависимости от высоты поверхности над уровнем моря

В Поволжье на один год приходится до  $1870 \text{ кВт/м}^2$  энергетической экспозиции [31]. В среднем в течение летнего дня (в июне) на территории Саратовской обл. теоретическое значение энергетической экспозиции – около  $215 \text{ Вт/м}^2$ , а от Волгоградской до Астраханской области этот показатель составляет  $240 \text{ Вт/м}^2$  [42].

Альтернативная энергетика развивается быстрыми темпами. Страны Европы, Азии и США делают выбор в пользу возобновляемых источников энергии. Обусловлено это тем, что системы, работающие на возобновляемых источниках энергии, не загрязняют окружающую среду, просты в установке и обладают существенно меньшими эксплуатационными и энергетическими затратами [44, 113].

В Российской Федерации альтернативная энергетика также развивается. Разрабатывают солнечные коллекторы, генераторы ветряных электростанций,

светильники с электроснабжением от солнечных батарей, станции нагрева воды и обогрева воздуха от солнечных батарей для различных предприятий [29, 107, 118]. Солнечные и ветряные электростанции строят не только в южных районах, но и, например, в Поволжском федеральном округе (таблица 1.9) [17].

Таблица 1.9 – Установленная мощность солнечных электростанций в некоторых областях Поволжья

Регион	Установленная мощность, МВт
Ульяновская область	55
Саратовская область	110
Самарская область	75
Волгоградская область	120
Астраханская область	285

Для Саратовской обл. объёма электроэнергии, вырабатываемой солнечными электростанциями, достаточно для электроснабжения 15 тыс. домохозяйств в течение года. Это позволяет избежать 16 тыс. т выбросов углекислого газа в атмосферу.

Для распространения солнечных электростанций необходимо повысить эффективность их использования, а для этого следует увеличить коэффициент полезного действия солнечных батарей. Он зависит от технических возможностей процесса фотоэлектрического преобразования. На вырабатываемую мощность, помимо технических особенностей, влияют внешние факторы, как контролируемые, так и неконтролируемые. К контролируемым факторам относят качество электрических соединений, запыленность поверхности модуля и т. д., а к неконтролируемым – погодные условия (облачность, индекс ультрафиолетового излучения и др.). Согласно [24, 102, 106], факторы, влияющие на вырабатываемую мощность СБ, учитывают с помощью коэффициентов (таблица 1.10).

Потери энергии от угла наклона солнечной батареи к потоку излучения можно свести к минимуму, применив устройство слежения, направляющее солнечную батарею на угол  $90^\circ$  к солнечным лучам.

Коэффициент полезного действия различных видов солнечных батарей с развитием технологий увеличивается, а также снижаются потери при преобразовании энергии внутри солнечной батареи. Основные виды солнечных батарей представлены в таблице 1.11.

Таблица 1.10 – Коэффициенты, учитывающие влияние факторов на вырабатываемую мощность солнечных батарей

Наименование	Обозначение	Примечание
Коэффициент потерь преобразования энергии внутри солнечной батареи; зависит от развития разработанных материалов – солнечных элементов, для монокристаллических $k_{ПМ} = 0,25$	$k_{ПМ}$	таблица 1.11
Коэффициент, учитывающий потери энергии в установке и схемах соединения солнечной батареи, $k_{ПС} = 0,9$	$k_{ПС}$	система включает в себя солнечную батарею, контроллер, аккумуляторы, инвертор
Коэффициент, учитывающий потери энергии от угла наклона солнечной батареи к солнечным лучам; при $90^\circ$ $k_{У} = 1,0$ ; при $50^\circ$ $k_{У} = 0,76$	$k_{У}$	максимальный эффект преобразования энергии достигается под углом наклона СБ к солнцу в $90^\circ$
Коэффициент, учитывающий загрязнённость поверхности солнечной батареи	$k_{З}$	пыль, накапливаемая на солнечной батарее, снижает её КПД на 30–40 %

Таблица 1.11 – Виды солнечных батарей и их характеристики

Наименование	КПД, %	Класс эксплуатации*	Количество элементов на 1 м <sup>2</sup>	Удельная выработка мощности, Вт/м <sup>2</sup>
Монокристаллические	20	А, В, С	39	143
Поликристаллические	17	А, В, С	41	152
Аморфные (Пленочные)	10	А, В, С	64	178

\*А – снижение мощности элементов не более 5 % за 10 лет эксплуатации; В – не более 30 %, С – от 30 % и выше

С развитием солнечной энергетики в эксплуатацию внедряют солнечные батареи нового поколения с использованием современных технологий [27, 69, 120, 121, 130, 132, 133].

С учетом особенностей солнечных батарей и энергетической экспозиции в Поволжье, а также научных достижений в области солнечной энергетики необходимо определить количество электрической энергии, вырабатываемой солнечной батареей, в диапазоне широт от  $49^\circ 52'$  до  $52^\circ 42'$  с.ш. в период с марта по сентябрь.

Применение солнечных батарей в качестве источника электроснабжения аккумуляторных батарей и электропривода секции дождевальнoй машины возможно лишь на территориях с высокой энергетической экспозицией. Средние значения удельной энергетической экспозиции представлены на рисунке 1.11.

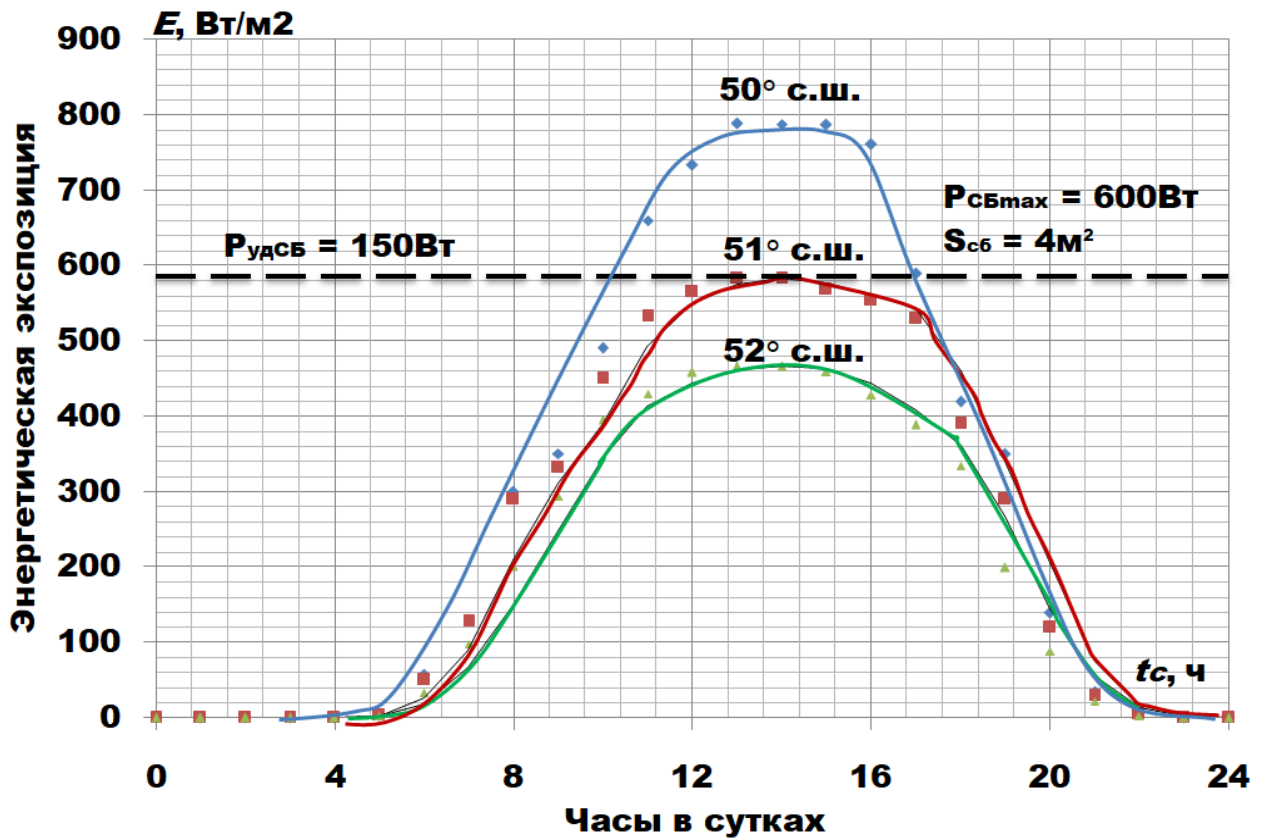


Рисунок 1.11– Средние значения энергетической экспозиции в период март – сентябрь

Согласно рисунку 1.11, на 51° с.ш. (г. Саратов, г. Воронеж, г. Курск) энергетическая экспозиция достигает 582 Вт/м<sup>2</sup>. При таком значении энергетической экспозиции солнечная батарея площадью 1 м<sup>2</sup> и КПД 20 % имеет пиковую мощность 150 Вт. Получая 150 Вт электрической мощности с 1 м<sup>2</sup>, использование СБ площадью 4 м<sup>2</sup> с максимальной мощностью 600 Вт приемлемо для обеспечения рабочего цикла электропривода секции ДМ с вентиляционно-индукторным двигателем.

Установлено [4, 7], что максимальное значение энергетической экспозиции в ясную погоду достигается в промежутке времени от 10 до 17 часов. В среднем за этот промежуток энергетическая экспозиция составляет около 792 Вт/м<sup>2</sup>, а за сутки – 203 Вт/м<sup>2</sup> (рисунок 1.12).

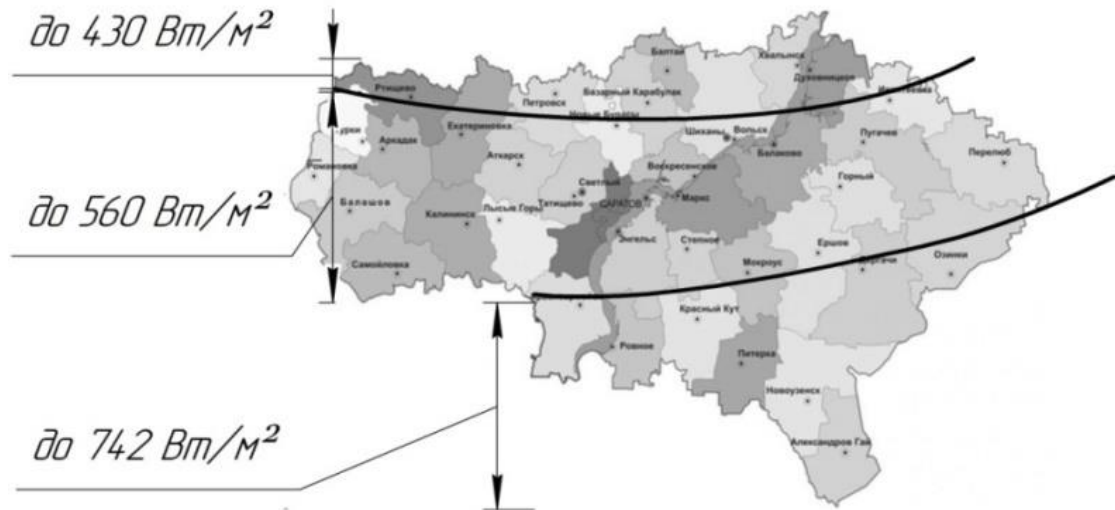


Рисунок 1.12 – Энергетическая экспозиция на территории Саратовской области

Анализ энергетической экспозиции на территории Саратовской обл. показывает, что наиболее благоприятными районами для использования энергии солнца являются южные районы (Александровогайский, Новоузенский, Питерский, Краснокутский и Ровенский). Для центральных районов области (г. Саратов, Энгельсский, Марковский, Татищевский, Балаковский р-ны) характерно умеренное значение энергетической экспозиции –  $560 \text{ Вт/м}^2$ . Наименьшие значения энергетической экспозиции приходится на северные районы (Хвалынский, Балтайский, Базарно-Карабулакский, Ртищевский, Ивантеевский). Здесь значения этого показателя не превышают  $430 \text{ Вт/м}^2$ .

При максимальной облачности (10 баллов) энергетическая экспозиция может снижаться до 10 раз. С учетом облачности значение энергетической экспозиции в южных районах составляет  $74,2 \text{ Вт/м}^2$ , в северных –  $43 \text{ Вт/м}^2$ , а в центральных – до  $56 \text{ Вт/м}^2$ .

На основе проведенного анализа можно сделать вывод о том, что в Саратовской обл. с  $1 \text{ м}^2$  солнечной батареи можно получить  $150 \text{ Вт} \cdot \text{ч}$  электроэнергии для заряда аккумуляторной батареи дождевальная машины.

Мощность солнечных батарей является непостоянной величиной. Например, при облачности она может снижаться в 10 раз. На преобразование солнечного потока излучения в электрическую энергию влияют также характеристики солнечных батарей (таблица 1.12).

Таблица 1.12 – Характеристики монокристаллических и поликристаллических солнечных батарей

Параметр	Обозначение	Значение
Класс качества	А, В, С	
Пиковая мощность, Вт	$P_{\max}$	0,5...400
Номинальное напряжение, В	$U_{\text{ном}}$	0,3...48
Напряжение в точке максимальной мощности, В	$U_{\text{мп}}$	0,3...45
Ток в точке максимальной мощности, А	$I_{\text{мп}}$	0,15...8,76
Напряжение холостого хода, В	$U_{\text{оc}}$	0,3...54
Ток короткого замыкания, А	$I_{\text{sc}}$	0,15...9,21
Диапазон рабочих температур, °С	$t_p$	-40 ... +85
Толеранс, %	Tol	0 / +5

А – снижение мощности элементов не более 5 % за 10 лет эксплуатации; В – не более 30 %, С – от 30 % и выше

При выборе СБ необходимо ориентироваться на ее основные характеристики (см. таблицу 1.12). Согласно наработкам [14, 104, 105, 108], предпочтительной является СБ с монокристаллическими солнечными элементами. Их пиковая мощность при одинаковых параметрах выше, чем у поликристаллических (рисунок 1.13).

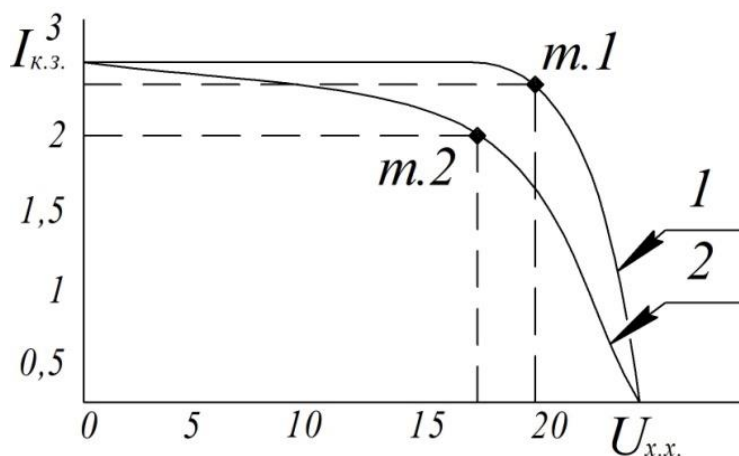


Рисунок 1.13 – Вольт-амперная характеристика солнечного элемента:  
 $I_{\text{к.з.}}$  – ток короткого замыкания, А;  $U_{\text{х.х.}}$  – напряжение холостого хода, В;  
 т. 1 – точка максимальной мощности монокристаллической солнечной батареи;  
 т. 2 – точка максимальной мощности поликристаллической солнечной батареи;  
 1 – ВАХ монокристаллической солнечной батареи;  
 2 – ВАХ поликристаллической солнечной батареи

Необходимо ориентироваться также на параметр пиковой мощности СБ и его составляющие, а именно напряжение и ток в точке максимальной мощности (рисунок 1.14).

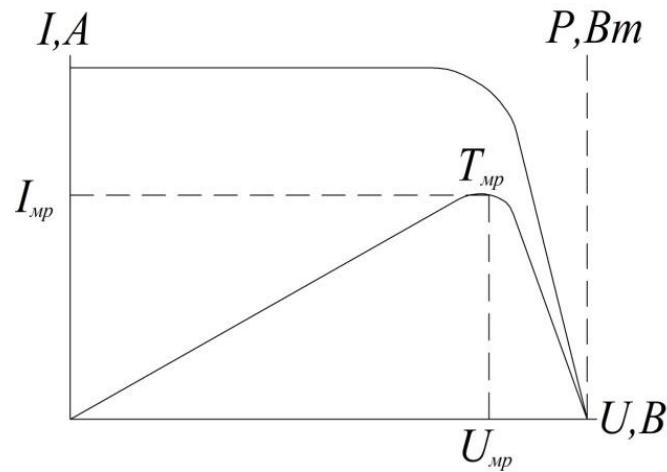


Рисунок 1.14 – Точка максимальной мощности СБ ( $T_{mp}$ ):  
 $I_{mp}$  – ток в  $T_{mp}$ , А;  $U_{mp}$  – напряжение в  $T_{mp}$ , В

Пиковая мощность солнечной батареи является основной характеристикой, учитываемой при подключении к ней нагрузки. Максимальная мощность  $P_{max}$ , вырабатываемая 1 м<sup>2</sup> площади солнечного элемента:

$$P_{max} = U_{mp} I_{mp}, \quad (1.3)$$

где  $U_{mp}$  – напряжение в точке максимальной мощности, В;  $I_{mp}$  – ток в точке максимальной мощности, А.

Солнечные батареи в процессе эксплуатации подвергаются влиянию различных факторов, снижающих выходную мощность (запыление, загрязнение, влияние температуры) [109]. Предварительная проверка снижения мощности СБ от запыления и загрязнения в лабораторных условиях показала незначительное отклонение значений.

В качестве испытательной принята монокристаллическая солнечная батарея фирмы SilaSolar с заявленными параметрами  $P_{max} = 150$  Вт;  $U_{тр} = 18,2$  В;  $I_{тр} = 8,25$  А. Задействован был также измерительный прибор Multimeter GDM 354A с заявленной относительной погрешностью измеряемого предела  $\beta = 2,5$  %. Измеряли ток короткого замыкания чистой (рисунок 1.15, а) и загрязненной (рисунок 1.15, б) СБ и напряжения холостого хода чистой (рисунок 1.16, а) и загрязненной (рисунок 1.16, б) СБ.



*a**б*

Рисунок 1.15 – Измерение тока короткого замыкания чистой (*a*) и загрязненной (*б*) СБ в лабораторных условиях

*a**б*

Рисунок 1.16 – Измерение напряжения холостого хода чистой (*a*) и загрязненной (*б*) СБ в лабораторных условиях

Данные, полученные в ходе лабораторных испытаний, представлены в таблице 1.13.

Таблица 1.13 – Параметры чистой и загрязненной СБ

№ опыта	Чистая СБ			Загрязненная СБ		
	ток короткого замыкания $I_{кз-ч}$ , А	напряжение холостого хода $U_{хх-ч}$ , В	мощность $P_ч$ , Вт	ток короткого замыкания, $I_{кз-г}$ , А	напряжение холостого хода $U_{хх-г}$ , В	мощность $P_г$ , Вт
1	3,7	21,1	80,18	2,8	20,6	57,68
2	3,7	21,1	78,07	2,6	20,5	53,3
3	3,6	21,0	75,6	2,5	20,3	50,75
4	3,8	22,0	83,6	2,8	20,9	58,52
5	3,9	22,8	88,92	2,9	20,9	60,61

Примечание: измерения проводили в пасмурную погоду при температуре наружного воздуха 11°C; угол наклона изменяли с шагом 2°...4° в сторону солнца.

Из таблицы 1.13 видно, что из-за загрязнения СБ потери мощности составили около 27 %. Исходя из этого, можно сделать заключение о возможности выбора солнечной батареи с запасом по мощности.

Из-за нестабильности значения вырабатываемой мощности солнечных батарей их используют совместно с дополнительным источником питания [87, 88]. Таким источником могут быть аккумуляторные батареи, энергия которых будет компенсировать снижение энергии от СБ вследствие воздействия неблагоприятных факторов. Параметры аккумуляторных батарей представлены в таблице 1.14.

Исходя таблицы 1.14, можно сделать вывод о том, что литий-железо-фосфатные аккумуляторы предпочтительнее по многим параметрам. Однако их стоимостные показатели выше по сравнению с аккумуляторами серии GEL. К тому же при их использовании в системе дождевальных машин необходимо дополнительно устанавливать систему балансировки. Все это усложняет применение аккумуляторов данного типа.

Двигатели дождевальной машины эксплуатируют в старт-стоповом режиме, и для их энергоснабжения подходят стартерные аккумуляторные батареи. Существуют также вентильно-индукторные двигатели с встроенным контроллером, использование которых подразумевает плавный пуск с меньшими пусковыми токами, чем у АД. При применении ВИД возможно использование аккумуляторов тягового типа.

Таблица 1.14 – Характеристики аккумуляторных батарей

Характеристика	Тип						
	свинцово-кислотные	AGM/GEL	свинцовые OPzS	свинцовые OPzV	литий-ионные Li-ion	литий-титанатные LTO	литий-железо-фосфатные LiFePO4
<b>Достоинства</b>	Низкие первоначальные вложения	Герметизированные. Не выделяют газы	Возможность обслуживания	Герметизированные. Не выделяют газы	Самая высокая плотность энергии. Малые масса и объем. Большой срок службы	Самый большой срок службы. Возможность заряжать и разряжать огромными токами	Высокая плотность энергии. Большой срок службы. Большие зарядные и разрядные токи
<b>Недостатки</b>	Малый срок службы. Выделяют газы. Медленный заряд. Не способны долговременно выдавать большие токи. Нелинейные разрядные характеристики	Малый срок службы при постоянном циклировании. Медленный заряд. Не способны выдавать большие токи. Маленькая снимаемая емкость при разряде большими токами	Высокая стоимость. Медленный заряд. Не способны выдавать долговременно большие токи. Маленькая снимаемая емкость при разряде большими токами	Высокая стоимость. Медленный заряд. Не способны выдавать долговременно большие токи. Маленькая снимаемая емкость при разряде большими токами	При повреждении или работе в нештатном режиме опасны, обильно выделяют газы и пожароопасны. Нельзя использовать без системы балансировки и защиты	Самые большие первоначальные вложения. Нельзя использовать без системы балансировки	Высокие первоначальные вложения. Нельзя использовать без системы балансировки
<b>Номинальное напряжение 1 ед., В</b>	12	12	2	2	3,7	2,3	3,2
<b>Количество для получения 12 В, ед.</b>	1	1	6	6	4	6	4

Характеристика	Тип						
	свинцово-кислотные	AGM/ GEL	свинцовые OPzS	свинцовые OPzV	литий-ионные Li-ion	литий-титанатные LTO	литий-железо-фосфатные LiFePO4
Удельный вес, Вт·ч/кг	45	40	33	33	205	73	95
Цена за 1000 Вт·ч, руб. (на 2019 г.)	7000	14000	16000	20000	14000	33000	16000
Количество циклов							
при разряде 30 %	750	1400	3000	5000	9000	25000	10000
при разряде 70 %	200	500	1700	1800	5000	20000	5000
при разряде 80 %	150	350	1300	1500	2000	16000	3000

Совместное использование в схемах СБ и АБ возможно при соблюдении разрядно-зарядных режимов накопителя энергии. Если разряд АБ происходит при различных параметрах нагрузки, то режим заряда требует строгого сочетания параметров зарядных тока и напряжения.

Параметры процесса заряда АБ марки DeltaGel 12-55 представлены на рисунке 1.17 [60, 83, 96].

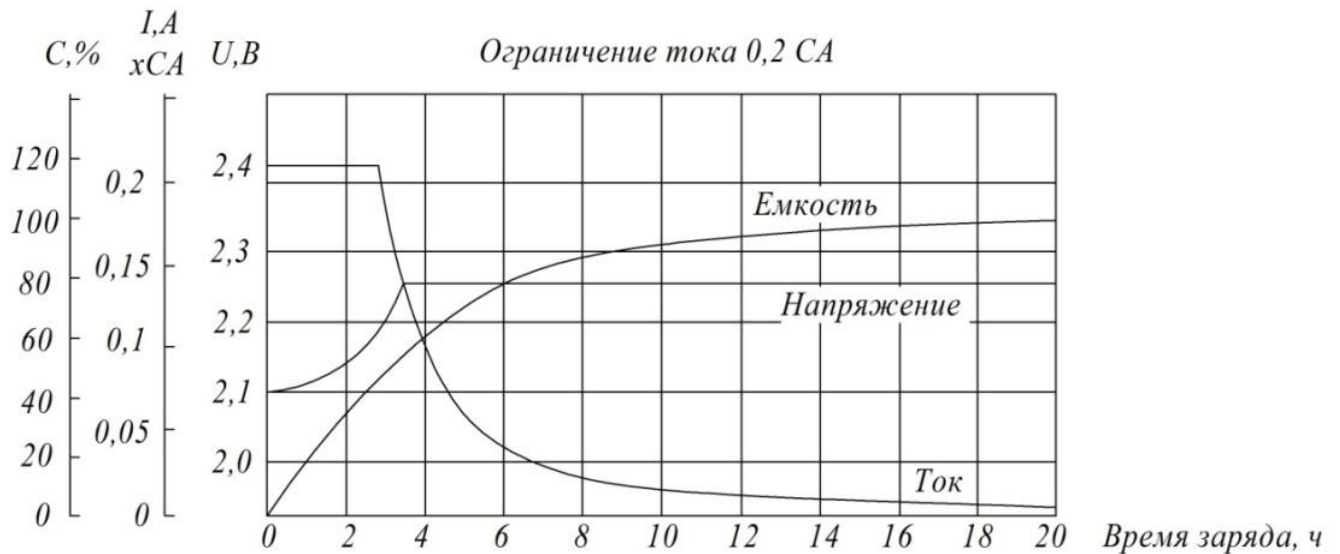


Рисунок – 1.17 – Характеристики заряда АБ:  $C$  – номинальная емкость АБ, А·ч;  $I$  – ток заряда, А;  $U$  – напряжение заряда, В

Для контроля параметров заряда, защиты от глубокого разряда или перезаряда АБ в системе электроснабжения с СБ используют контроллеры заряда. Их принципы работы подробно описаны в [77]. В целом рабочий процесс контроллеров заряда можно разделить на три стадии:

1. Заряд максимальным током (начальная стадия). На этой стадии АБ получает весь ток, поступающий от СБ.

2. ШИМ-заряд. Когда напряжение на АБ достигает определенного уровня, контроллер начинает поддерживать постоянное напряжение за счет ШИМ-тока заряда. Это предотвращает перегрев АБ. Ток постепенно уменьшается по мере заряда АБ.

3. Поддержание зарядной емкости. Когда АБ полностью заряжена, зарядное напряжение уменьшается во избежание дальнейшего нагрева.

Существуют контроллеры Maximum Power Point Tracker (MPPT) со слежением за точкой максимальной мощности (ТММ) солнечной батареи. Использование данного контроллера позволяет увеличить выработку энергии СБ без установки добавочной мощности СБ. MPPT-контроллер отслеживает значения тока и напряжения СБ и определяет пару «ток – напряжение», при которых мощность СБ будет максимальной. Встроенный процессор следит, на какой стадии заряда находится АБ (заряд максимальным током, ШИМ-заряд или поддержание зарядной емкости), и определяет значение тока, который подается на заряд АБ.

Исследования в области совместного применения солнечных и аккумуляторных батарей представлены в [30, 96, 122, 123, 124] и направлены на обеспечение электрической энергией потребителей с типовым характером нагрузки. При использовании источника с САБ для электропривода мобильной техники (автомобиль или дождевальная машина) нельзя точно определить количество запасаемой энергии, поскольку тяговая нагрузка может существенно изменяться в зависимости от условий перемещения.

Применение автономного источника питания в виде солнечных и аккумуляторных батарей для дождевальных машин требует проведения исследований по разным причинам. В первую очередь, необходимо определить род тока источника (постоянный или переменный) и его параметры, так как машины комплектуются электродвигателями специального назначения с высокой степенью защиты и с встроенным редуктором, работающими на переменном токе. Автономная система САБ вырабатывает постоянный ток, поэтому ее применение для специальных электродвигателей требует встраивания инвертора в схему соединений. Это будет сопровождаться дополнительными потерями электроэнергии источника, и так ограниченного в выработке энергии. В этом случае целесообразно использовать вентильно-индукторный двигатель.

Для перемещения одной секции дождевальной машины кругового действия необходима механическая мощность около 250–300 Вт [11]. С учетом этого, оснастив данную секцию солнечной батареей площадью 2,5–3,0 м<sup>2</sup> и эксплуатируя ее в южных районах Саратовской обл., с вероятностью, равной вероятности солнеч-

ных дней, можно гарантировать нормальную работу электропривода. Однако для проверки этой гипотезы требуется проведение научных исследований.

Таким образом, на основе проведенного анализа солнечной энергетической экспозиции на территории Саратовской обл. можно сделать вывод о том, что в ее центральных районах, получая до  $560 \text{ Вт/м}^2$  энергетической экспозиции с КПД СБ 20 %, можно получить до 112 Вт электрической мощности с  $1 \text{ м}^2$ . Тогда, обеспечив требуемой механической мощностью 250–300 Вт каждую секцию дождеваль-ной машины кругового действия путем комплектования солнечными и аккумуля-торными батареями площадью СБ 2,5–3,0  $\text{м}^2$ , можно гарантировать нормальную работу электропривода. При этом рекомендуется использовать вентильно-индукторный электродвигатель, так как КПД автономной системы энергоснабже-ния с САБ в 1,2–1,5 раза выше, чем электродвигателя переменного тока. На осно-ве полученных данных необходимо рассмотреть технические параметры ВИД для его применения в дождевальных машинах кругового действия.

### **1.3 Особенности эксплуатации вентильно-индукторного электропривода**

В сельскохозяйственном производстве активно используют асинхронные электродвигатели для получения механической энергии вращательного действия. Они характеризуются относительно низкой стоимостью, высоким (до 0,94) КПД, широкой номенклатурой и типоразмерным рядом [13].

В настоящее время в современных электрифицированных дождевальных ма-шинах применяют только один вид АД американского производства UMC PowerSaver 3.5. Он имеет высокую степень надежности и защиты IP65 и поставляется в совме-щенной конструкции с редуктором с передаточными числами  $i = 40$ ,  $i = 45$ ,  $i = 50$ . Ре-дуктор позволяет обеспечивать достаточно устойчивый и стабильный пуск.

Электродвигатель UMC PowerSaver 3.5 имеет номинальное напряжение 380 В, номинальный ток 1,5 А, частоту вращения  $175 \text{ мин}^{-1}$ . Его используют на таких ЭДМКД, как Bauer (Австрия), ДМЭ «Фрегат» (Украина), «КАСКАД» (Россия), Zimmatic (США), RKD (Испания), Osmis (Италия).

Однако в последнее время современные электромеханические системы комплектуют вентильно-индукторными электродвигателями, принцип действия которых основан на квазидвижущемся электромагнитном поле [22]. Коэффициент полезного действия таких двигателей на 1,5–2,5 % выше, чем АД. ВИД может быть использован в системах с источником постоянного тока, т. е. совместно с солнечными и аккумуляторными батареями.

Сравнительные механические характеристики ВИД и АД представлены на рисунке 1.18, где видны существенные различия их нагрузочных способностей.

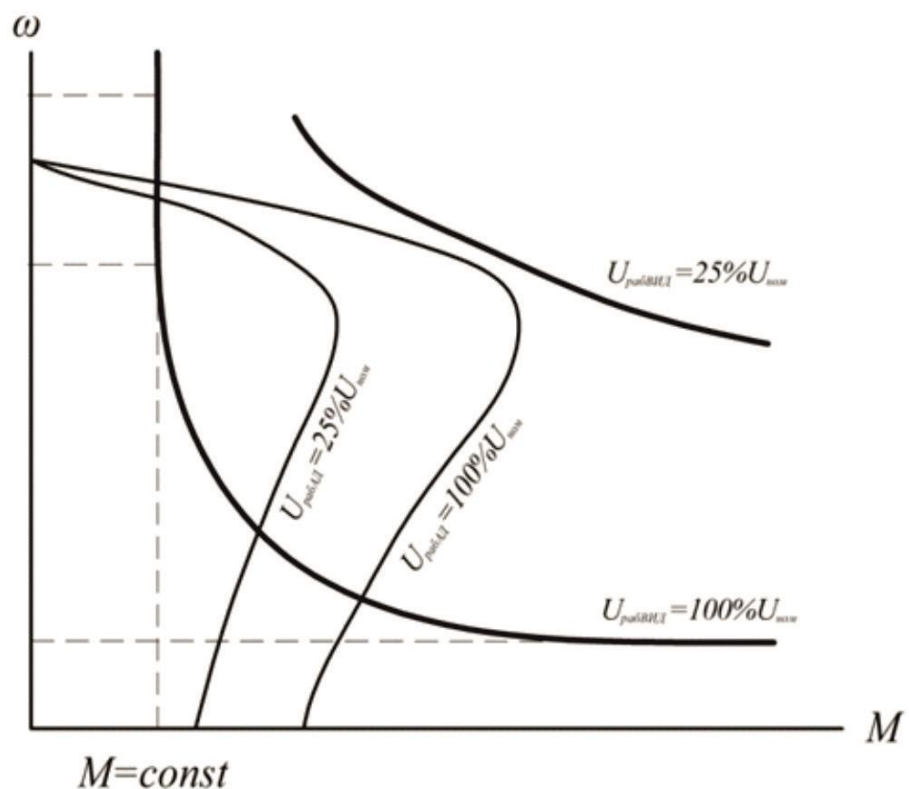


Рисунок 1.18 – Сравнительные механические характеристики ВИД и АД ( $\omega$  – частота вращения,  $\text{мин}^{-1}$ ;  $M$  – момент на валу,  $\text{Н}\cdot\text{м}$ )

Так, при малой частоте вращения вентильно-индукторный электродвигатель обладает большим моментом на валу, чем асинхронный двигатель. При этом напряжение на зажимах ВИД не ограничивает создаваемый механический момент на валу. В этом случае недостатком является создание более высокой (в 2,5–3,5 раза) частоты вращения ротора, чем при номинальном напряжении.

Судя по механической характеристике дождевальная машины [56], которая относится к первому типу нагрузок электропривода из-за колесного и мотор-



ного редуктора, а также по причине медленного перемещения ДМ, ВИД является более приемлемым электродвигателем, чем АД. Во-первых, при напряжении на зажимах ниже номинального он обеспечивает требуемый момент на валу. Во-вторых, в тяжелых условиях эксплуатации с моментом на валу, в 1,5–2,0 раза превышающим расчетный момент, ВИД не требуется подбирать с запасом по мощности, как это предусмотрено в случае с асинхронными электродвигателями [23].

При применении автономного источника питания на САБ движение секции ДМ обеспечит ВИД, напрямую подключенный к солнечным батареям.

Характеристики ВИД и АД одинаковой мощности приведены в таблице 1.15.

Таблица 1.15 – Характеристики ВИД марки ВМ1418ZXF и АД марки АИР71А4 одинаковой мощности

Параметр	Двигатель		Преимущества в пользу ВИД
	ВМ1418ZXF	АИР71А4	
КПД, %	96	94	+2 %
Возможность регулирования частоты вращения при постоянном моменте	+	при наличии дополнительного оборудования	+
Возможность плавного пуска	+	при наличии дополнительного оборудования	+
Максимальный пусковой крутящий момент, Н·м	18,3	8,8	+9,5
Диапазон частоты вращения, мин <sup>-1</sup>	1...2000	100...1360	+
Щеточный узел	–	+	+
Температура нагрева обмоток статора в номинальном режиме использования, °С	45	65	+20
Возможность электроснабжения от альтернативных источников	+	при использовании преобразователя	+

Как видно из таблицы 1.15, основными преимуществами ВИД являются: высокий КПД двигателя – на 2 % выше, чем АД; высокая чувствительность регулирования момента на валу за счет использования контроллера в схеме подключения; возможность регулирования частоты вращения в широком диапазоне;

обеспечение плавного пуска [21]. Однако, несмотря на множество преимуществ, ВИД имеет недостаток, который выражается в низкой надежности контроллера управления. Контроллер, создавая программу квазивращающегося магнитного поля, подвержен скоротечному износу элементов силовой электроники. Причинами частого выхода из строя могут быть низкое качество электронных компонентов, монтажа схемы, неправильная эксплуатация. Упрощенная структурная схема электропривода на базе ВИД представлена на рисунке 1.19.

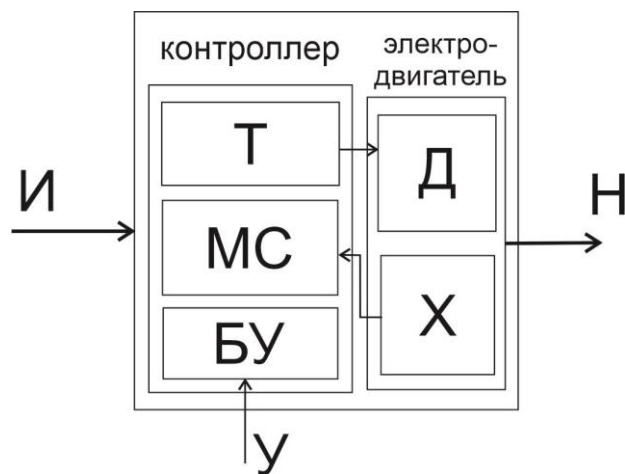


Рисунок 1.19 – Структурная схема электропривода на базе ВИД:  
 И – источник питания; У – входной сигнал управления; БУ – блок управления,  
 МС – микропроцессор; Т – силовые транзисторы; Д – электродвигатель;  
 Х – датчик Холла; Н – нагрузка (момент на валу)

В структурную схему ВИД входит контроллер управления, который включает в себя три основных элемента. Микропроцессор моделирует работу силовых транзисторов, оценивая параметры источника. В этом случае источник с САБ обеспечивает работу ВИД за счет программируемого процессора. В данной структурной схеме самым ненадежным звеном является каскад транзисторов, которые в процессе работы нагреваются до температуры 80 °С и в любой момент могут выйти из строя, хотя в контроллерах предусмотрена защита в виде плавких предохранителей и термореле [58].

Управление частотой вращения ВИД можно осуществлять либо программой в автоматическом режиме, либо в ручном режиме с помощью регулировочного резистора. Эта характерная особенность вентильного электродвигателя способ-

ствуется плавному регулированию скорости, обеспечивает плавный пуск и открывает возможность точного регулирования перемещения дождевальной машины.

Согласно исследованиям [71], в настоящее время управление скоростью перемещения опорными тележками дождевальной машины осуществляют в соответствии с требуемой поливной нормой за счет включения/выключения работы электропривода, который имеет одну частоту вращения для всех опорных тележек, т. е. управление АД осуществляется в повторно-кратковременном (старт-стоповом) режиме [10]. Такой режим работы приводит к частым и тяжелым пускам АД, которые негативно влияют на источник энергии. Например, одновременное включение сразу всех АД электроприводов 10 секций ДМ вызывает кратковременную перегрузку (до 180–200 %) переносного дизельного генератора, что может вывести его в аварийный режим и привести к неисправности. Пусковые процессы в электрических цепях с АД можно регулировать с помощью устройств компенсации реактивной составляющей тока или частотного преобразователя. Однако эти устройства приводят к удорожанию системы электроснабжения дождевальной машины, которая находится в эксплуатации от 2 до 3 мес. в году. Альтернативным вариантом двигателя опорных тележек ДМ является вентильно-индукторный электродвигатель, который в своей структурной схеме использует контроллер управления и может легко работать в паре с нестабильным источником постоянного тока, таким, как САБ.

Для обоснования использования автономной системы электроснабжения ДМ типа «ВИД + САБ» необходимо провести ряд теоретических и практических исследований. Однако если теоретическое обоснование может быть подтверждено в лабораторных условиях, то на практике могут возникать другие условия эксплуатации, обусловленные технологическими особенностями полива (ночные поливы, вечерние поливы, зависимость от занятости насосной станции и т. д.). Поэтому важным аспектом в поиске решений применения САБ с ВИД для дождевальных машин является анализ существующих режимов полива на практике.

#### **1.4 Режимы орошения электрифицированными дождевальными машинами кругового действия**

Электрифицированные дождевальные машины кругового действия эксплуатируют строго по графику. Период полива устанавливают в соответствии с разработанным режимом, который контролирует главный мелиоратор.

Управление поливом осуществляют разными способами. В первую очередь это зависит от того, кому принадлежит водоисточник, затем – в каком состоянии и у кого на балансе находится оросительная сеть. В зависимости от этого орошаемые участки условно можно разделить на участки простого и сложного управления. Простые орошаемые участки имеют дождевальные машины, снабжаемые поливной водой одним насосом. Забор воды происходит из водоёма, расположенного относительно близко к орошаемому участку. К сложно управляемым относятся удаленные участки, для которых забор воды для орошения происходит в несколько этапов: от главной насосной станции, расположенной у водоема, вода перекачивается в оросительный канал или искусственный водоем, где находится еще одна насосная станция, которая подает воду на орошаемые участки.

Участки, расположенные рядом с водоемом и не зависящие от дебета воды, можно поливать в разных режимах. В этих случаях полив обычно назначают тогда, когда снижается влажность почвы до предельно допустимых значений в зависимости от выращиваемой культуры.

В сложных системах управления полив орошаемых участков назначают с учетом нескольких показателей. При необходимости полива следует определить, есть ли вода в искусственном водоеме или канале, а также тариф на воду именно в тот момент, когда нужно поливать, поскольку тариф может меняться в течение суток (рисунок 1.20).

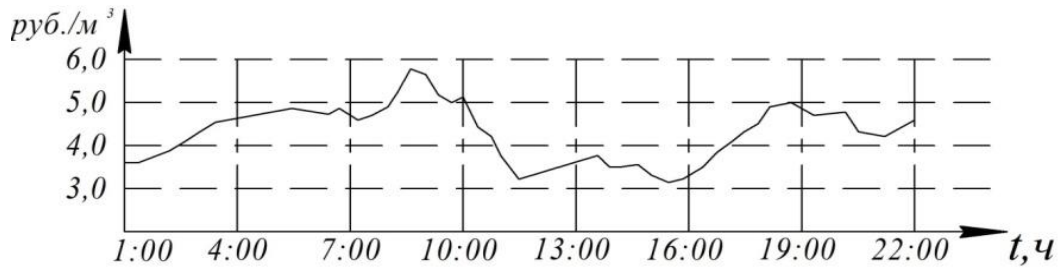


Рисунок 1.20 – Изменение тарифа на воду в течение суток

Тариф на воду меняется в зависимости от тарифа на электрическую энергию. Поскольку в мелиорации достаточно большое сезонное потребление электроэнергии (до 100 тыс. кВт·ч в день), покупку электроэнергии осуществляют на открытом рынке (фондовом или срочном) в режиме реального времени (рисунок 1.21).

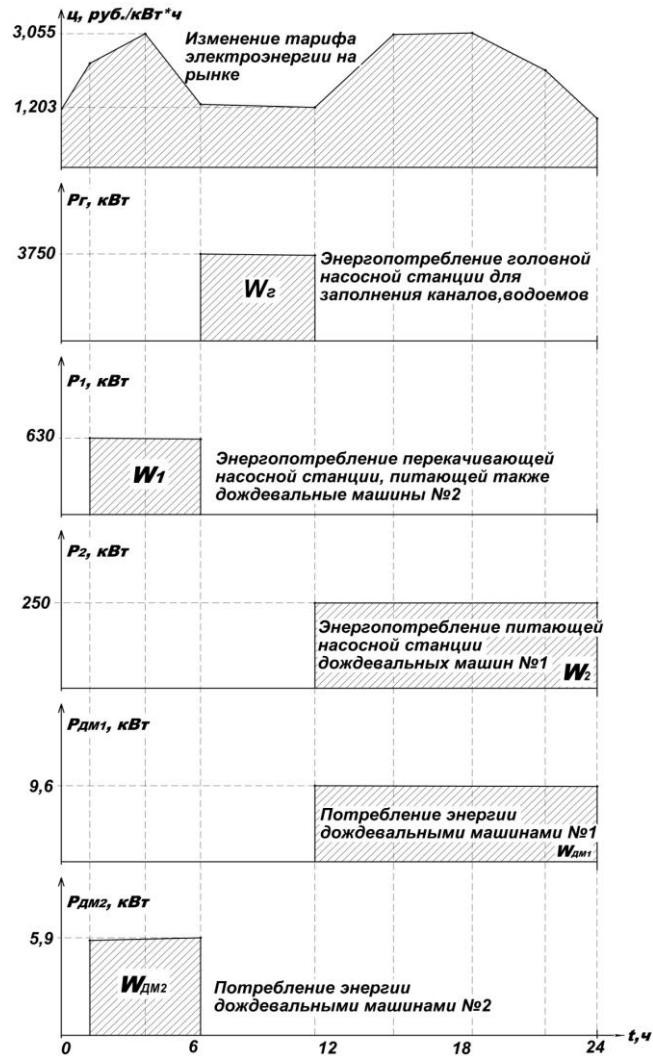


Рисунок 1.21 – Пример диаграммы энергопотребления насосных станций и дождевальных машин

График поливов культур в УНПО «Поволжье» представлен на рисунке 1.22.

Культура	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
	Май			Июнь			Июль			Август			Сентябрь			
Соя			1		2	3		4	5	6	7					
Кукуруза			1		2		3	4	5	6						

Рисунок 1.22 – Неукомплектованный график поливов культур в УНПО «Поволжье» (2021 г.): 1, 2, 3 – декады месяца

На рисунке 1.22 видно, что между поливами имеются перерывы. В это время дождевальная машина простаивает, как и в периоды, когда влажность почвы является минимально допустимой (например, при дождливой погоде). Промежутки времени между поливами достаточны для заряда аккумуляторных батарей.

В момент низкой стоимости электроэнергии осуществляют ее закупку и включают мощные насосные агрегаты для заполнения каналов и водоемов. В другое время включают менее мощные насосные агрегаты, когда лимитированное количество электроэнергии по низкой цене израсходовано. Промежуток между поливами (см. рисунок 1.22) может составлять не только сутки, но и неделю или месяц.

В промежуток времени работы головной насосной станции дождевальные машины использовать экономически нецелесообразно, так как тариф на воду для данного периода очень завышен. Фермеры вынуждены подстраиваться под такой режим работы насосных станций независимо от технологического процесса возделывания культур. Вместе с этим один насосный агрегат может питать дождевальные машины разных фермеров или разных культур, что делает невозможным составление жесткого плана полива.

Возможны несколько режимов полива: дневной, ночной, круглосуточный и период, который охватывает часть дневного и ночного времени. Полив в ночное время суток предпочтительнее для орошаемых культур вследствие отсутствия испарения, которое отрицательно влияет на растения. Однако полив в ночное время сопровождается ночными сменами обслуживающего персонала. В этом случае при аварии приходится останавливать полив до утра, что приводит к нарушению всего технологического процесса. Поэтому некоторые фермеры, не имеющие оперативного обслуживающего персонала, вынуждены поливать в дневное время.

Известны случаи поочередного использования насосной станции на малых сельскохозяйственных предприятиях для обеспечения необходимого напора на входе в водопроводящий трубопровод дождевальная машины (рисунок 1.23).

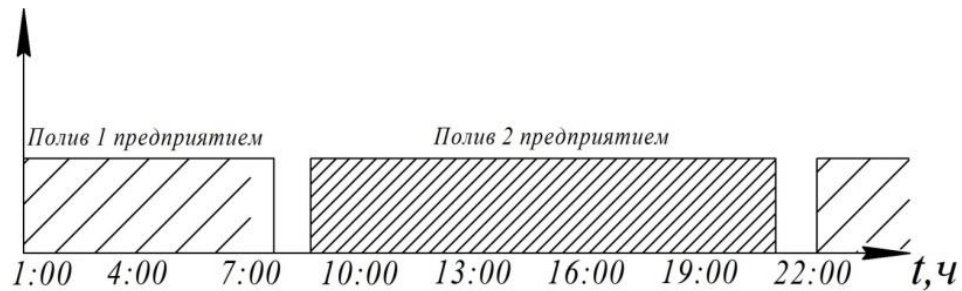


Рисунок 1.23 – Пример поочередного использования насосной станции

В таблице 1.16 приведен пример режима орошения кукурузы в УНПО «Поволжье» ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ в 2019 г.

Таблица 1.16 – График полива кукурузы в УНПО «Поволжье» (2019 г.)

Дата полива	Время начала полива, ч	Время окончания полива, ч	Продолжительность полива, ч
<b>Первый полив</b>			
2.06	11:00	20:00	9:0
3.06	7:30	17:00	9:30
4.06	11:00	18:50	7:50
<b>Второй полив</b>			
12.06	8:30	19:00	11:30
13.06	7:00	11:45	4:45
<b>Третий полив</b>			
21.06	7:40	11:00	3:20 (не было света)
22.06	7:20	19:00	11:40
23.06	7:30	11:40	4:10
<b>Четвертый полив</b>			
26.06	7:40	19:00	11:20
27.06	7:30	17:30	10:0
<b>Пятый полив</b>			
3.07	12:50	19:00	6:10
4.07	7:20	16:35	9:15
5.07	8:20	13:00	4:40 (не закончен)
6.07	8:20	15:20	7:0
<b>Шестой полив</b>			
12.07	8:30	19:30	11:0
13.07	7:05	17:55	10:50
<b>Седьмой полив</b>			
6.08	7:30	19:00	11:30
7.08	7:30	18:00	10:30
<b>Восьмой полив</b>			
13.08	8:00	15:35	7:35
15.08	7:40	19:00	11:20
16.08	12:35	13:20	00:45

Согласно данным таблицы 1.16, полив проводили в дневное время. Запуск ДМ осуществляли в основном в утренние часы. В это время суток летом наблюдается максимальная активность солнечного излучения, поэтому данный режим полива подходит для автономного источника питания с солнечными и аккумуляторными батареями.

При использовании автономной системы электроснабжения с САБ необходимо обеспечить заданную продолжительность движения дождевальной машины во всех режимах работы. Для данной системы предпочтительнее режим полива в дневное время суток, когда возможна эксплуатация дождевальной машины исключительно от солнечных батарей без использования энергии аккумуляторных батарей. В случаях, когда энергетическая экспозиция максимальна, энергия солнечных батарей направлена на электроснабжение вентиляно-индукторного электродвигателя и аккумуляторных батарей.

Для полива в ночное время необходимо рассчитывать длительность потребления энергии от аккумуляторной батареи так, чтобы обеспечить запас емкости АБ и не допустить разряда до минимально допустимой разрядной емкости.

При круглосуточном поливе возможны варианты работы дождевальной машины в дневное время исключительно от солнечных батарей, а также от солнечных батарей с электроснабжением электродвигателя и аккумуляторных батарей, а в ночное время – только от аккумуляторных батарей. К тому же необходимо подобрать такую мощность СБ, при которой АБ были бы полностью заряжены после ночного полива.

### **1.5 Постановка цели и задач исследования**

Конструкции дождевальных машин непрерывно совершенствуются. За последние годы энергопотребление ДМ резко сократилось по сравнению с машинами первого поколения. Однако эксплуатация дождевальной техники на отдаленных от централизованных энергосистем сопровождается существенными потерями



ми энергии. Поэтому сельхозтоваропроизводители отдают предпочтение автономным источникам питания.

Для отдаленных поливных участков целесообразно оснащать электрифицированные дождевальные машины кругового действия автономными системами электропитания, источником которых могут быть переносные генераторы и аккумуляторные батареи (АБ). Применение переносных генераторов широко распространено из-за комплектования машин электродвигателями переменного тока, но цена произведенной электроэнергии таких генераторов достигает 15,5 руб./кВт·ч.

Возобновляемые источники питания (а именно, солнечные батареи) подходят для использования в дождевальных машинах, которые работают на открытых местностях под действием прямых солнечных лучей. Установлено, что в Саратовской обл. с 1 м<sup>2</sup> СБ можно получать 150 Вт·ч электроэнергии летом в дневное время. Однако в течение дня стабильно получать энергию от солнца не представляется возможным, так как энергетическая экспозиция зависит от погодных условий. Для нестабильного возобновляемого источника с аккумуляторными батареями целесообразно применять вентильно-индукторный электропривод, который имеет лучшую механическую характеристику по сравнению с асинхронным электроприводом.

Применению солнечных и аккумуляторных батарей для электроснабжения вентильного электропривода дождевальных машин кругового действия препятствует множество факторов, одним из которых является отсутствие конкретного режима орошения (не известно, в какое время суток поливать – днем, вечером или ночью). На практике режимы полива (использования ДМ) зависят от влажности почвы, стоимости электроэнергии и воды, а также от загруженности питающей насосной станции.

Несомненно, автономная система электроснабжения в виде солнечных и аккумуляторных батарей позволит снизить потери электроэнергии на водораспределение дождевальными машинами кругового действия за счет локального преобразования, накопления и использования энергии для электропривода опорных тележек. Однако применению данного источника препятствует отсутствие научно

обоснованных параметров автономной системы электроснабжения на солнечных и аккумуляторных батареях при эксплуатации ЭДМКД.

Существенное противоречие заключается в том, что площадь размещения известных систем электроснабжения с альтернативными источниками не ограничена, а площадь расположения САБ на конструкции ДМ ограничена конструкцией водопроводящего трубопровода. К тому же дождевальная машина при поливе перемещается, а это усложняет использование устройств ориентации солнечных батарей по градиенту излучения. Применение электродвигательной нагрузки в системах электроснабжения на постоянном токе ограничено из-за отсутствия обоснованных параметров мощности. Эти особенности требуют проведения исследований. Преодоление сформулированного противоречия является важной научной задачей, требующей решения.

**Цель работы** – повышение эффективности электроснабжения дождевальной машины кругового действия за счет обеспечения рабочего цикла электропривода секции применением источника с солнечными и аккумуляторными батареями.

**Задачи исследования:**

1. Провести анализ существующих способов электроснабжения электрифицированных дождевальных машин кругового действия и условий применения автономной системы электроснабжения с САБ и вентильным электроприводом секции ДМ кругового действия.

2. Разработать математическую модель обоснования параметров автономного источника электроснабжения и выявить условия обслуживания солнечных батарей для секции дождевальной машины кругового действия.

3. Выполнить экспериментальную проверку автономной системы электроснабжения в лабораторных и полевых условиях на секции дождевальной машины кругового действия.

4. Определить экономическую эффективность внедрения автономной системы электроснабжения электропривода дождевальной машины кругового действия с солнечными и аккумуляторными батареями.

## **2. ОБОСНОВАНИЕ АВТОНОМНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ СЕКЦИИ ДОЖДЕВАЛЬНОЙ МАШИНЫ КРУГОВОГО ДЕЙСТВИЯ С СОЛНЕЧНЫМИ И АККУМУЛЯТОРНЫМИ БАТАРЕЯМИ**

### **2.1 Обоснование структуры автономной системы электроснабжения дождевальнoй машины**

Применение альтернативных источников энергии является современным способом повышения эффективности электроснабжения ДМ. Они позволяют снизить эксплуатационные затраты [2, 94, 119].

На основе анализа развития солнечной энергетики и энергетического потенциала солнечного излучения в Саратовской обл. рассмотрена возможность использования солнечных батарей в качестве источника электроснабжения ДМ.

Цель теоретического исследования – разработать математическую модель обоснования параметров автономного источника электроснабжения и выявить условия обслуживания солнечных батарей для секции дождевальнoй машины кругового действия. Был выделен объект исследования для того, чтобы обозначить границы исследуемой системы. Также для достижения цели были определены входные параметры, внешние воздействия и их влияние на выходные параметры объекта исследования, оценена энергетическая эффективность применения солнечных и аккумуляторных батарей в качестве источника электроснабжения ДМ.

Известны несколько типов солнечных батарей в зависимости от структуры солнечного элемента [78]. У монокристаллических солнечных элементов больший коэффициент полезного действия по сравнению у поликристаллическими [47]. У монокристаллических элементов с гетероструктурным переходом КПД на 3 % выше, чем без данного перехода.

Для точного описания параметров и их взаимодействия обозначены факторы, влияющие на объект исследования. На работу системы СБ оказывают влияние запыление, нагрев солнечной батареи, потоки ветра [45]. Выделены основные факторы, которые непосредственно изменяют значения входных и выходных параметров системы электроснабжения от САБ.

Разработана математическая модель электроснабжения от САБ; определены основные варианты коммутации источника с САБ с нагрузкой секции ДМ [51]. На основании полученных данных разработана схема управления вариантами коммутации источника с САБ с нагрузкой секции ДМ и обоснованы условия обслуживания солнечных батарей для секции дождевальная машины кругового действия.

Возможность применения САБ в качестве источника электроснабжения ДМ зависит от многих факторов, которые характеризуют потребление электроэнергии дождевальная машиной. Для того, чтобы выделить данные факторы, рассмотрим электроснабжение ЭДМКД (рисунок 2.1). Электрическая схема дождевальная машины кругового действия включает в себя источник энергии *ИЭ*, которым является комплектная трансформаторная подстанция *КТП* или дизельная электростанция *ДЭ*.

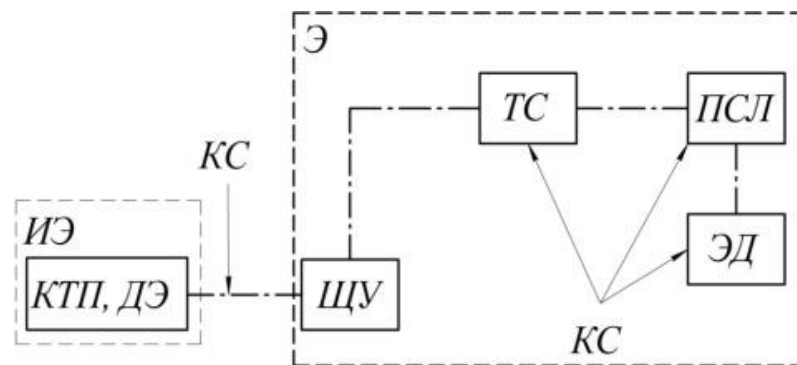


Рисунок 2.1 – Структурная схема электроснабжения ЭДМКД:  
*ИЭ* – источник энергии ДМ; *КТП* – комплектная трансформаторная подстанция;  
*ДЭ* – дизельная электростанция; *КС* – кабельное соединение;  
*Э* – энергопотребление ДМ; *ЩУ* – щит управления; *ТС* – токосъемник;  
*ПСЛ* – прибор синхронизации движения в линию; *ЭД* – электродвигатель

Источник энергии *ИЭ* осуществляет электроснабжение электродвигателя *ЭД*, аппаратуры управления и защиты щита *ЩУ*, приборов синхронизации движения в линию *ПСЛ*. Передача электроэнергии к каждой стадии процесса происходит при помощи кабельных соединений *КС*.

Управление дождевальная машиной осуществляется от щита управления и защиты *ЩУ* [80].

Передача энергии от щита управления и защиты *ЩУ* до электродвигателей происходит через токосъемник *ТС*. Приемниками, отвечающими за автоматиза-

цию процесса управления дождевальной машиной, являются приборы синхронизации движения в линию *ПСЛ*.

Движение дождевальной машины осуществляется за счёт электропривода подвижных секций. Данный процесс является самым энергоёмким в работе ДМ [79]. У электропривода крайней от гидранта подвижной опоры процесс движения самый продолжительный по сравнению с электроприводами остальных подвижных опор. Во время пуска электродвигателя потребляется самое большое количество энергии, пусковой ток электродвигателя превышает номинальный в 5–10 раз.

Исходя из проведенного анализа потребления электроэнергии дождевальной машиной, необходимая мощность ДМ  $P_{\Pi}$ :

$$P_{\Pi} = P_{\text{упр}} + P_{\text{авт}} + P_{\text{дв}}, \quad (2.1)$$

где  $P_{\text{упр}}$  – мощность, потребляемая системой управления дождевальной машиной, состоящей из аппаратов управления и защиты *ЩУ*, Вт;  $P_{\text{авт}}$  – мощность, потребляемая системой автоматизации, состоящей из приборов синхронизации движения в линию *ПСЛ*, Вт;  $P_{\text{дв}}$  – мощность, используемая электродвигателями подвижных опорных тележек, Вт.

Необходимо учитывать, что на всей протяжённости дождевальной машины в электроприемниках и кабельных линиях возникают потери электроэнергии [43]. Исходя из этого, полная мощность  $P_{\text{ПДМ}}$ , потребляемая дождевальной машиной:

$$P_{\text{ПДМ}} = P_{\Pi} + \Delta P, \quad (2.2)$$

где  $\Delta P$  – потери мощности в электроприемниках и кабельных линиях, Вт.

При использовании САБ необходимо учитывать их параметры для обеспечения дождевальной машины энергией в процессе нормальной эксплуатации. Для этого выделим факторы, влияющие на электроснабжение дождевальной машины от солнечных и аккумуляторных батарей [41].

Представим процесс электроснабжения дождевальной машины от САБ в виде совокупности процессов и выделим основные параметры, влияющие на каждый из процессов (рисунки 2.2 и 2.3).

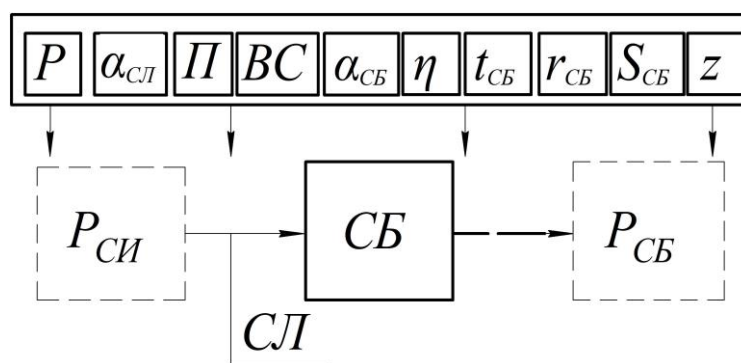


Рисунок 2.2 – Структурная схема факторов, влияющих на процесс преобразования энергии в солнечной батарее: *СБ* – солнечная батарея; *СЛ* – солнечные лучи;  $P_{СИ}$  – мощность потока излучения;  $P_{СБ}$  – мощность на выводах *СБ*;  $P$  – облачность;  $\Pi$  – поглощение *СЛ*;  $\alpha_{СЛ}$  – направление распространения энергии излучения к поверхности *СБ*;  $\alpha_{СБ}$  – угол наклона *СБ* к направлению *СЛ*;  $BC$  – время суток;  $t_{СБ}$  – температура *СБ*;  $S_{СБ}$  – площадь солнечной батареи;  $\eta$  – КПД *СБ*;  $z$  – загрязнение *СБ*;  $r_{СБ}$  – внутреннее сопротивление элементов *СБ*

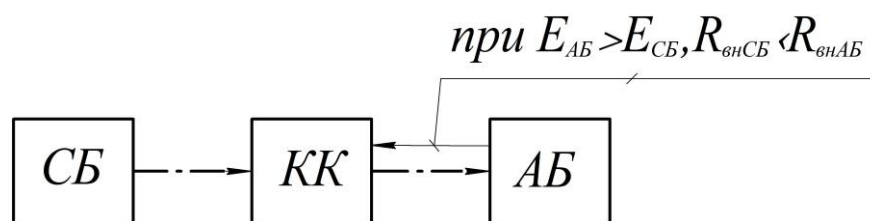


Рисунок 2.3 – Структурная схема соединения *СБ* и *АБ*: *АБ* – аккумуляторная батарея; *КК* – контроллер заряда *АБ*;  $E_{АБ}$  – ЭДС аккумуляторной батареи;  $E_{СБ}$  – ЭДС солнечной батареи

Солнечная батарея *СБ* преобразует поток солнечного излучения в электрическую энергию, которая протекает по кабельным соединениям *КС* к элементам системы.

Входными параметрами для солнечной батареи *СБ* являются поток излучения  $P_{СИ}$  и площадь солнечной батареи  $S_{СБ}$ , а выходным – электрическая мощность на выводах солнечной батареи  $P_{СБ}$  (см. рисунок 2.2).

Поток излучения  $P_{СИ}$  в течение суток изменяется, что влияет на выработку электроэнергии солнечной батареей *СБ*. Поэтому электрическая мощность  $P_{СБ}$  на выводах солнечной батареи является переменной величиной. Также на изменение электрической мощности на выводах солнечной батареи  $P_{СБ}$  влияют такие факторы, как  $P$  – облачность,  $\alpha_{СЛ}$  – направление распространения энергии излучения к поверхности *СБ*,  $\alpha_{СБ}$  – угол наклона поверхности *СБ* к направлению распространения энергии излучения,  $z$  – загрязнение поверхности *СБ*,  $t_{СБ}$  – температура *СБ*,  $r_{СБ}$  – внутреннее сопротивление элементов *СБ*,  $S_{СБ}$  – площадь солнечной батареи [54].

Процесс распределения энергии проходит посредством контроллера заряда, который выполняет функции формирования вариантов и параметров заряда, а также недопущения разряда аккумуляторной батареи  $AB$  на солнечную батарею  $CB$ , и кабельных соединений [82].

$CB$  соединена кабелем  $КС$  с аккумуляторной батареей  $AB$  через контроллер заряда аккумуляторной батареи  $КК$  (см. рисунок 2.3).

Процесс преобразования энергии внутри  $AB$  протекает посредством аккумуляторов, которые соединены последовательно, параллельно или смешанно. Функция  $AB$  состоит в накоплении электрической энергии от  $CB$  и питания электродвигателя  $ЭД$ .

Входным параметром, характеризующим процесс преобразования энергии внутри  $AB$ , является электрическая мощность  $P_{CB}$ , поступающая на аккумуляторы от солнечной батареи, а выходным параметром – электрическая мощность  $P_{AB}$ , передаваемая  $ЭД$  (рисунок 2.4).

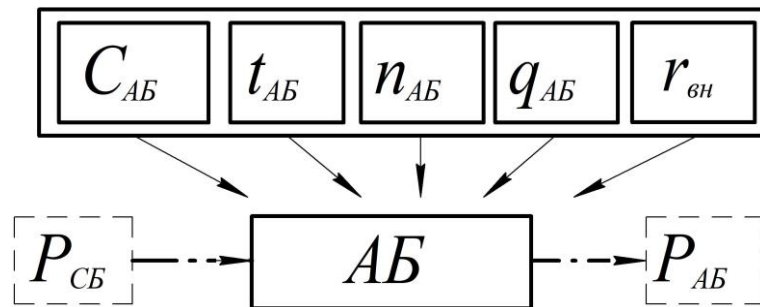


Рисунок 2.4 – Структурная схема основных входных и выходных параметров процесса преобразования энергии внутри  $AB$ :  $P_{CB}$  – мощность на выводах  $CB$ ;  $P_{AB}$  – мощность на выводах  $AB$ ;  $C_{AB}$  – емкость  $AB$ ;  $t_{AB}$  – температура  $AB$ ;  $n_{AB}$  – количество последовательно соединенных  $AB$ ;  $q_{AB}$  – количество параллельно соединенных  $AB$ ;  $r_{внAB}$  – внутреннее сопротивление элементов  $AB$

Процесс преобразования энергии внутри  $ЭД$  проходит посредством электропривода, основными элементами которого являются электродвигатель и аппаратура управления и защиты. Продолжительность работы электродвигателя зависит от положения прибора синхронизации движения в линию  $ПСЛ$ .

Основные параметры процесса преобразования энергии внутри  $ЭД$  – электрическая мощность  $P_{AB}$ , поступающая на электродвигатель (входной параметр), и механическая мощность  $P_M$  на валу электродвигателя (выходной параметр) (рисунок 2.5).

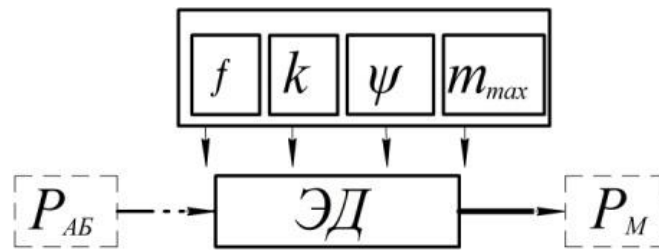


Рисунок 2.5 – Структурная схема основных входных и выходных параметров процесса преобразования энергии внутри ЭД:  $P_{AB}$  – мощность от АБ;  $P_M$  – механическая мощность на валу;  $m_{max}$  – максимальная масса секции ДМ, кг;  $\psi$  – коэффициент сцепления колеса с поверхностью;  $k$  – коэффициент трения скольжения, зависящий от особенностей подшипников;  $f$  – коэффициент сопротивления качению, зависящий от давления воздуха в шинах и скорости движения

Рассмотрев процесс электроснабжения дождевальнoй машины от САБ и выделив основные входные и выходные параметры, составим блок-схему автономного электроснабжения для одной секции (рисунок 2.6).

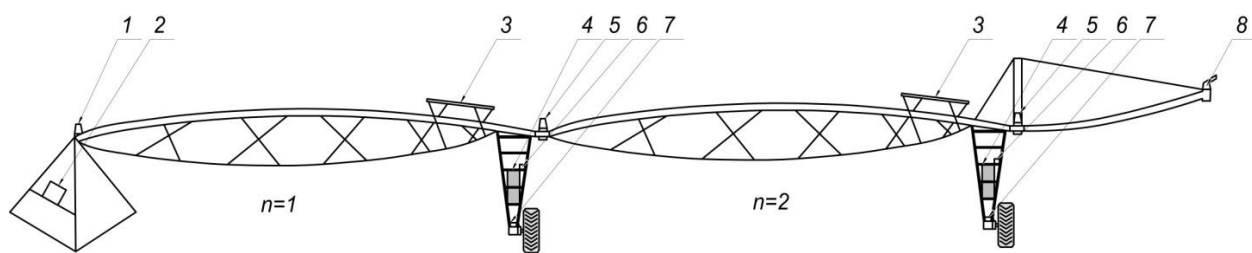
Солнечная батарея снабжает электроэнергией как аккумуляторную батарею, так и электропривод через контроллер КК.

Выходной параметр процесса электроснабжения ДМ от САБ – преобразованная электрическая мощность, передаваемая электродвигателю.

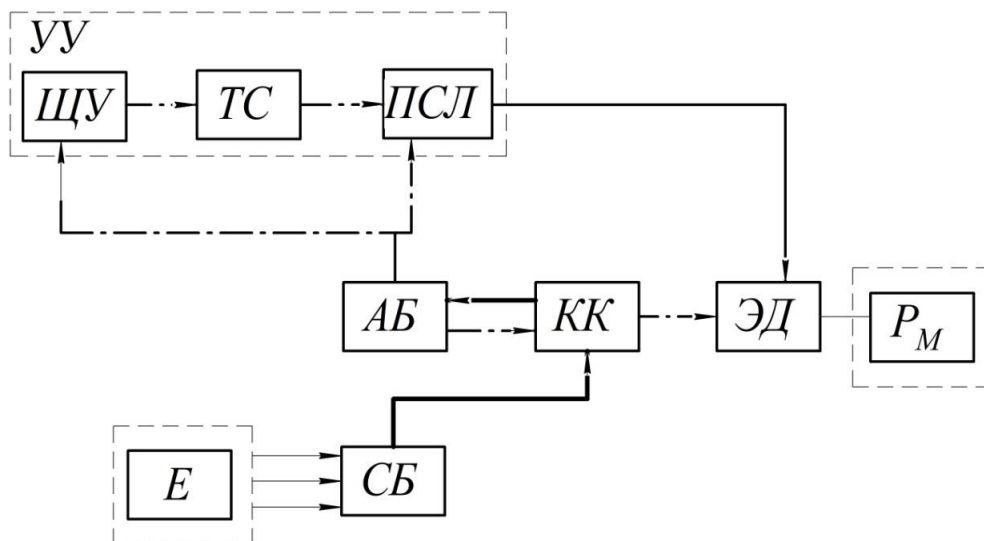
Объектом исследования определена автономная система электроснабжения электропривода секции дождевальнoй машины кругового действия, состоящая из устройств управления УУ, устройств автоматизации, солнечных батарей СБ, аккумуляторных батарей АБ, кабельных соединений КС и электродвигателя ЭД. При исследовании данного объекта необходимо учитывать диапазон влияния факторов и величину их действия во времени.

Эффективность электроснабжения дождевальнoй машины с применением САБ зависит от условий эксплуатации и технических характеристик электрооборудования.





а



б

Рисунок 2.6 – Схема дождевальной машины с САБ (патент № 189495 – [61]) (а) и блок-схема ее электроснабжения (б):  $n$  – количество секций,  $n = 2 \dots 10$ ; 1 – неподвижная опора; 2 – щит управления; 3 – СБ; 4 – АБ; 5 – ПСЛ; 6 – контроллер; 7 – электродвигатель; 8 – дальнеструйный водомет; УУ – устройство управления

Отличительной особенностью использования СБ на движущейся мобильной установке является положение солнечной батареи и ДМ относительно солнца в каждый момент времени движения ДМ (рисунок 2.7) [62, 90, 91].

Исходя из рисунка 2.7, факторами, влияющими на входной параметр СБ, являются поток излучения в сутки, запыление, направление распространения энергии излучения по отношению к СБ во время эксплуатации ДМ и т. д.

В течение суток изменяются значение потока излучения  $P_{СИ}$  и положение ДМ относительно солнца, от чего зависит направление распространения энергии излучения  $\alpha_{СИ}$  на поверхность СБ. Максимальная выработка электрической мощности СБ достигается при максимальном значении направленного распространения потока излучения [67].

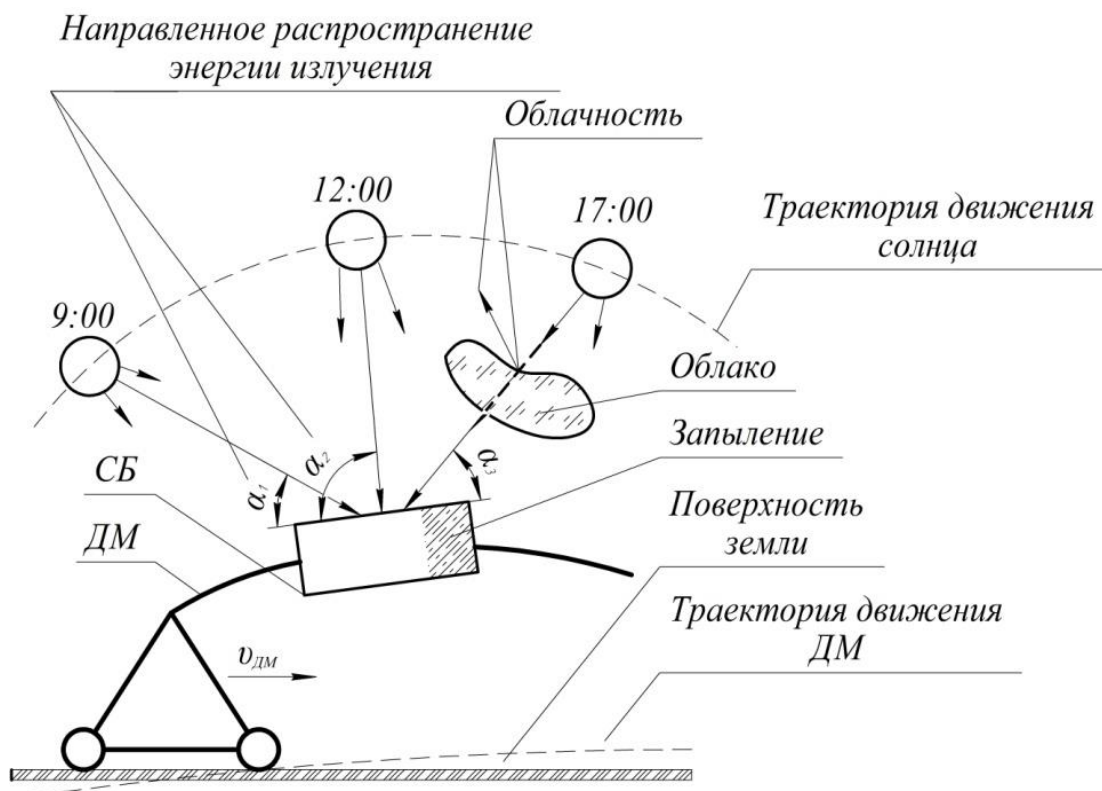


Рисунок 2.7 – Факторы, влияющие на входной параметр СБ

В ясный день при нулевой облачности прохождение потока излучения до поверхности СБ происходит беспрепятственно [68, 75, 116]. Однако при повышенной облачности поток излучения, доходящий до поверхности СБ, сокращается, соответственно уменьшается энергетическая экспозиция.

На преобразованную электрическую мощность СБ влияют значение потока излучения  $P_{СИ}$ , которое является случайной величиной, а также технические параметры СБ [70]. Помимо этого запыление СБ  $z$  снижает количество преобразованной электрической мощности [66, 115].

Электрическая мощность, получаемая с  $1 \text{ м}^2$  СБ зависит также от коэффициента полезного действия СБ  $\eta$ , который, в свою очередь, зависит от структуры кристаллических элементов СБ. Например, монокристаллические солнечные элементы вырабатывают мощности больше на 8–10 %, чем поликристаллические [112, 114]. Таким образом, монокристаллические элементы предпочтительнее для использования в качестве источника электроснабжения ДМ.

АБ эксплуатируются в циклическом режиме «заряд – разряд». Предпочтительными для тяговой нагрузки и данных условий эксплуатации являются геле-

вые АБ. Они обладают увеличенным циклом «заряд – разряд» по сравнению с другими видами АБ.

Кроме типа АБ на продолжительность работы влияют такие технические характеристики, как зарядная и разрядная ёмкости, фактический ток разряда, длина проводников, внутреннее сопротивление элементов, а также температура окружающей среды.

По внешней характеристике АБ, номинальному напряжению и номинальной емкости можно определить ориентировочную продолжительность работы электропривода под нагрузкой. Однако в период эксплуатации нагрузка имеет случайный характер, поэтому важно учесть факторы, влияющие на систему «источник – электроприемник» ДМ.

Основные показатели, влияющие на параметры работы дождевальной машины с САБ, указаны в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Основные показатели, влияющие на параметры электрической системы

Показатель	Обозначение	Единица измерения
<i>Солнечная батарея</i>		
Время суток	$t_c$	ч
Направление распространения энергии излучения	$\alpha$	град.
Запыление, загрязнение	$z$	%
КПД солнечной батареи	$\eta$	%
Температура солнечной батареи	$t_{СБ}$	°С
Количество параллельно соединенных солнечных элементов	$j$	шт.
Количество последовательно соединенных солнечных элементов	$x$	шт.
<i>Аккумуляторная батарея</i>		
Емкость АБ	$C_{АБ}$	А·ч
Температура АБ	$t_{АБ}$	°С
Длина проводников	$l$	м
Внутреннее сопротивление элементов	$r_{вн}$	Ом
Количество последовательно соединенных АБ	$n_{АБ}$	шт.
Количество параллельно соединенных АБ	$q_{АБ}$	шт.

При установке СБ в конструкцию ДМ следует учитывать особенности эксплуатации составных частей машины и процесса дождевания. Необходимо установить СБ так, чтобы энергетическая облученность ее поверхности была макси-

мальной. Также важно обеспечить надёжное крепление СБ, отсутствие вибрации при действии потоков ветра и учесть возможность безопасного доступа для обслуживания СБ [3, 81, 117]. Установка на верхней части водопроводящего трубопровода ДМ обеспечивает прямое воздействие солнечного излучения по всей площади СБ. Приобретаемая парусность ДМ от установки СБ решается путем равномерного распределения батарей и уменьшения их ширины.

При установке АБ необходимо учесть особенности эксплуатации элементов ДМ и безопасность эксплуатации АБ. Местом установки аккумуляторной батареи может быть рама опорной тележки секции ДМ.

## **2.2 Оценка энергетической эффективности применения солнечных батарей с аккумуляторными батареями**

Электрифицированные дождевальные машины обеспечиваются энергией от централизованного источника или переносного дизельного генератора. Данные способы электроснабжения характеризуется потерями электроэнергии при передаче [65]. Использование переносных дизельных электростанций также сопровождается эксплуатационными расходами [92].

САБ для дождевальных машин используют в редких случаях, а на сельскохозяйственных полях Поволжья таких машин нет. Однако если принять тот факт, что САБ устанавливают рядом с электроприводом на опорной тележке, то практически исключаются потери электроэнергии при передаче и появляется возможность применения возобновляемых источников, стоимость ресурса при использовании которых близка к нулю [89, 64]. Учитывая вышесказанное, оценим эффективность использования САБ по сравнению с традиционными источниками электроснабжения ДМ.

Энергопотребление дождевальной машины, питаемой кабельной линией от централизованной энергосистемы, зависит от режима работы. Энергия, потребляемая при эксплуатации ДМ, складывается из энергии, потребляемой на перемещение, а также потерь энергии при передаче (рисунок 2.8) [57].

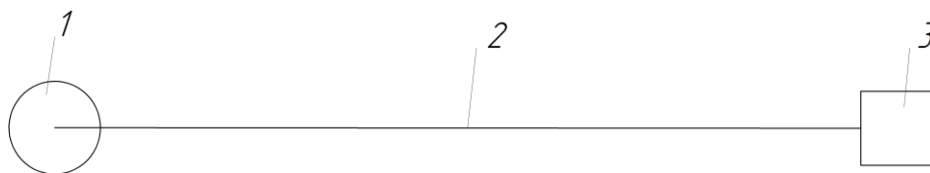


Рисунок 2.8 – Передача электроэнергии от трансформаторной подстанции до ДМ: 1 – дождевальная машина – преобразование энергии на перемещение; 2 – кабельная линия – потери на передачу; 3 – трансформаторная подстанция

Примем допущение, что временной интервал измеряется временем работы электропривода за сезон.

Энергия  $W_{\Pi}$ , потребляемая на перемещение дождевальной машины:

$$W_{\Pi} = P_n t_n + P_{n-1} t_{n-1} + \dots + P_1 t_1, \quad (2.3)$$

где  $P_n$  – мощность электропривода опорной тележки  $n$ -й секции, Вт;  $t_n$  – продолжительность эксплуатации электропривода опорной тележки  $n$ -й секции за сезон, ч;  $P_{n-1}$  – мощность электропривода предпоследней секции, Вт;  $t_{n-1}$  – продолжительность эксплуатации предпоследней секции, ч;  $P_1$  – мощность электропривода опорной тележки 1-й секции, Вт;  $t_1$  – продолжительность эксплуатации 1-й секции, ч.

Учитывая, что мощности электроприводов опорных тележек секции традиционных электрифицированных дождевальных машин равны:

$$P_n = P_{n-1} = P_{n-2} = \dots = P_1 = P_{\text{ДВ}}, \quad (2.4)$$

где  $P_{n-2}$  – мощность электропривода опорной тележки секции  $n-2$ , Вт;  $P_{\text{ДВ}}$  – мощность электропривода, Вт,

а путь, который проходят секции дождевальной машины, различен и пропорционально зависит от номера секции, то промежуток времени  $t_n$  работы  $n$ -го электропривода относительно электропривода первой опорной тележки дождевальной машины:

$$t_n = t_1 n, \quad (2.5)$$

где  $t_1$  – продолжительность работы электропривода опорной тележки первой секции, ч;  $n$  – порядковый номер секции.

Тогда энергия, потребляемая на перемещение дождевальной машины:

$$W_{\Pi} = P_{\text{ДВ}} t_1 (n + (n-1) + (n-2) + \dots + 1). \quad (2.6)$$

Энергия  $W_{\text{пер}}$ , теряемая при передаче от трансформаторной подстанции до дождевальная машины [95]:

$$W_{\text{пер}} = I_{\text{ср}}^2 R_{\kappa} t_{\text{э}} = I_{\text{ср}}^2 \frac{\rho L}{S} t_{\text{э}}, \quad (2.7)$$

где  $I_{\text{ср}}$  – среднее значение тока в кабельной линии, А;  $R_{\kappa}$  – сопротивление проводника жилы кабельной линии, Ом;  $t_{\text{э}}$  – средняя продолжительность потребления  $I_{\text{ср}}$ , ч;  $\rho$  – удельное сопротивление проводника, Ом·мм<sup>2</sup>/м;  $L$  – удаленность ДМ от трансформаторной подстанции (длина кабельной линии), м;  $S$  – площадь поперечного сечения проводника, мм<sup>2</sup>.

Потери энергии при передаче определяются фазным током, который рассчитывают через линейный ток  $I_{\text{л}}$ :

$$I_{\text{л}} = \frac{P_{\text{ДМ}}}{U_{\text{л}}}, \quad (2.8)$$

где  $P_{\text{ДМ}}$  – мощность, потребляемая дождевальная машиной, состоящей из  $n$  секций, Вт;  $U_{\text{л}}$  – линейное напряжение, В.

Фазный ток  $I_{\text{ф}}$ :

$$I_{\text{ф}} = \frac{I_{\text{л}}}{\sqrt{3}}. \quad (2.9)$$

Тогда энергопотребление дождевальная машины, питаемая кабельной линией:

$$W = W_{\text{пер}} + W_{\text{п}}, \quad (2.10)$$

где  $W_{\text{пер}}$  – энергия, теряемая при передаче от трансформаторной подстанции до дождевальная машины, Вт·ч;  $W_{\text{п}}$  – энергия, потребляемая на перемещение ДМ, Вт·ч.

При использовании в качестве источника электроснабжения солнечной и аккумуляторной батареей повышение эффективности системы электроснабжения дождевальная машины будет состоять в том, что потери при передаче электроэнергии сократятся, так как САБ расположены рядом с электродвигателем. При этом для САБ следует использовать двигатели постоянного тока или ВИД. Тогда при удален-

ности дождевальной машины от трансформаторной подстанции на  $L = 1$  км повышение энергетической эффективности  $\Delta W$  САБ (рисунок 2.9):

$$\Delta W = \frac{W_{\text{пер}}}{W}. \quad (2.11)$$

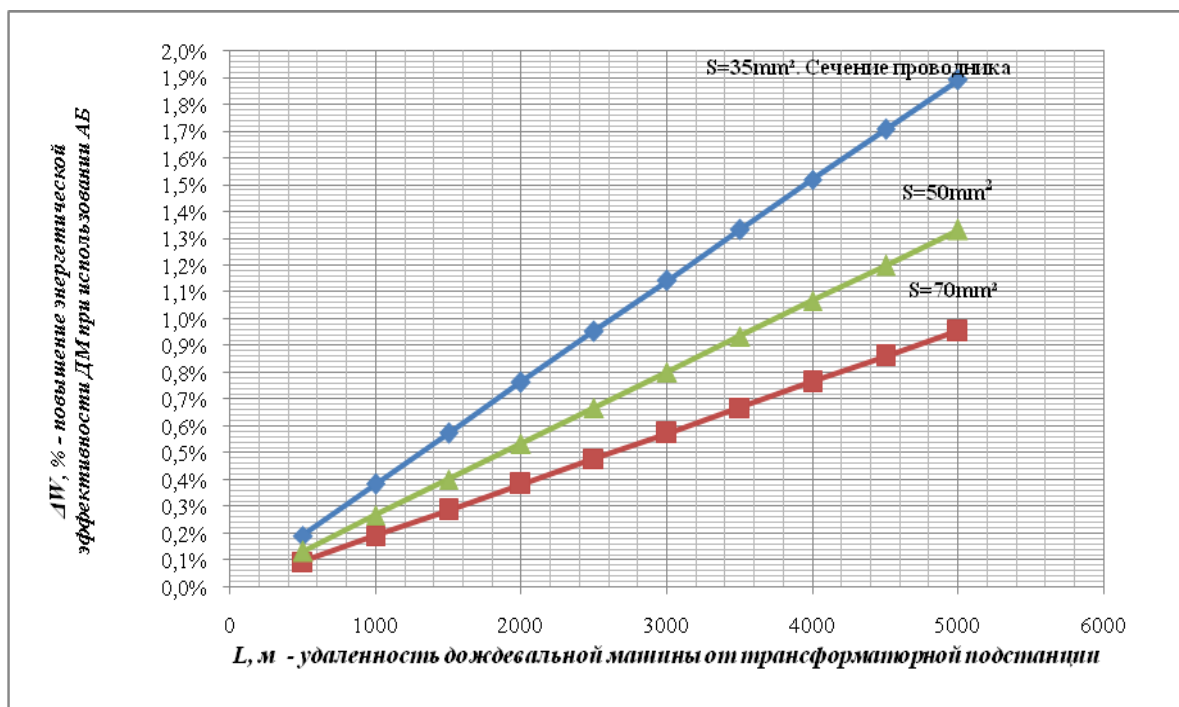


Рисунок 2.9 – Диаграмма изменения энергетической эффективности ДМ при замене трансформаторной подстанции с кабельной линией на АБ (для 10 секций ДМ)

Таким образом, повышение энергетической эффективности дождевальной машины с САБ по сравнению с кабельной линией состоит в экономии энергии за счет сокращения потерь. При удаленности трансформаторной подстанции от дождевальной машины на  $L = 1000$  м потери электроэнергии при сечении проводника  $S = 35 \text{ мм}^2$  составляют 0,39 %, при  $S = 50 \text{ мм}^2$  – 0,26 %, а при  $S = 70 \text{ мм}^2$  – 0,19 %. При удаленности дождевальной машины от трансформаторной подстанции на 5000 м и более потери электроэнергии на передачу составляют 1,9 % при сечении проводника  $S = 35 \text{ мм}^2$ , 1,33 % при  $S = 50 \text{ мм}^2$  и от 0,96 % при  $S = 70 \text{ мм}^2$ .

Вместе с этим следует учитывать потери на передачу энергии по всей длине конструкции дождевальной машины (рисунок 2.10).

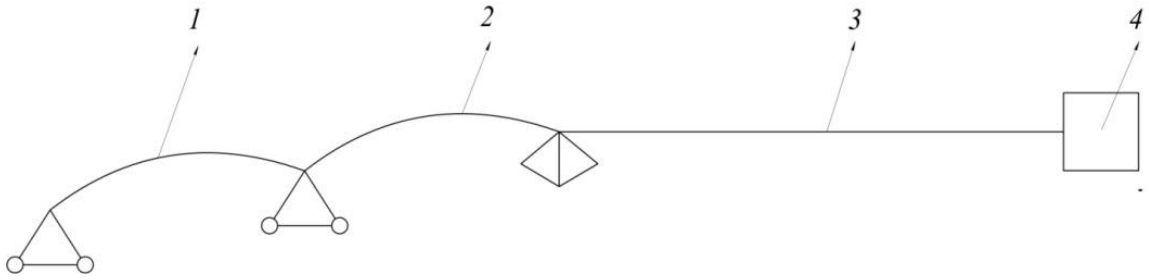


Рисунок 2.10 – Электроснабжение дождевальной машины кабельной линией:  
1 – 2-я секция ДМ, 2 – 1-я секция ДМ, 3 – кабельная линия, 4 – трансформаторная подстанция

Потери электроэнергии увеличиваются по мере отдаления от неподвижной опоры к крайней секции дождевальной машины (рисунок 2.11).

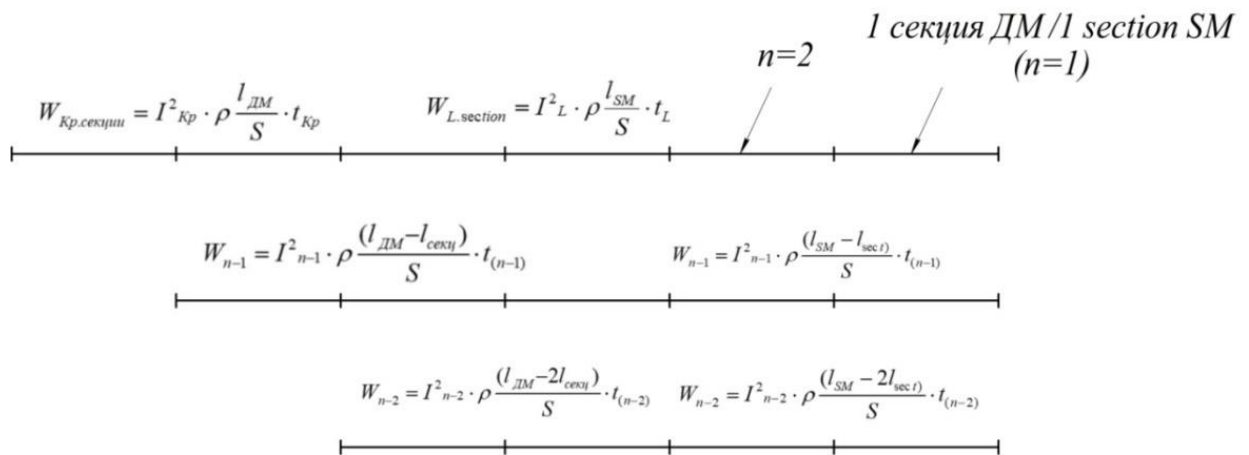


Рисунок 2.11 – Потери энергии по длине дождевальной машины, состоящей из  $n$  секций

При использовании солнечных и аккумуляторных батарей энергопотребление ДМ можно снизить на величину  $\Delta W_{\text{Общ}}$ :

$$\Delta W_{\text{Общ}} = \Delta W + \Delta W_{\text{ДМ}}, \quad (2.12)$$

где  $\Delta W$  – потери электроэнергии от трансформаторной подстанции до ДМ, %;  
 $\Delta W_{\text{ДМ}}$  – потери электроэнергии при передаче по всей длине ДМ, %.

Потери энергии  $\Delta W_{\text{ДМ}}$  по длине трубопровода определим как отношение энергии на передачу к энергии на перемещение:

$$\Delta W_{\text{ДМ}} = \frac{W_{\text{перДМ}}}{W_{\Pi}}, \quad (2.13)$$



где  $W_{\text{перДМ}}$  – потери на передачу энергии по длине дождевальной машины, Вт·ч;  
 $W_{\text{п}}$  – преобразование энергии на перемещение дождевальной машины, Вт·ч;

$$\begin{aligned} W_{\text{перДМ}} &= W_{\text{ПЕР}n} + W_{\text{ПЕР}n-1} + \dots + W_{\text{ПЕР}1} = \\ &= \frac{\rho_{\text{м}}}{S_{\text{м}}} \left[ I_n^2 l_{\text{ДМ}} t_n + I_{n-1}^2 (l_{\text{ДМ}} - l) t_{n-1} + \dots + I_1^2 l t_1 \right], \end{aligned} \quad (2.14)$$

где  $\rho_{\text{м}}$  – удельное сопротивление медного проводника, Ом·мм<sup>2</sup>/м;  $S_{\text{м}}$  – площадь поперечного сечения медного проводника, мм<sup>2</sup>;  $I_n$ ,  $I_{n-1}$  и  $I_1$  – потребляемый ток соответственно крайней, предпоследней и первой секции ДМ, А;  $t_n$ ,  $t_{n-1}$  и  $t_1$  – продолжительность работы электропривода соответственно крайней, предпоследней и первой секции ДМ, ч;  $l_{\text{ДМ}}$  – длина кабеля дождевальной машины, м;  $l$  – длина секции, м.

Так как по всей длине ДМ используют кабель одинакового сечения и исполнения, то удельное сопротивление проводника будет одинаковым. Учитывая, что потребляемая мощность электроприводов разных секций одинакова, то потребляемый ток каждой секции:

$$I_n = I_{n-1} = \dots = I_1 = I. \quad (2.15)$$

Секции ДМ имеют одинаковую длину:

$$l_n = l_{n-1} = \dots = l_1 = l. \quad (2.16)$$

Длина дождевальной машины:

$$l_{\text{ДМ}} = \sum_{i=1}^n l_i. \quad (2.17)$$

Продолжительность работы каждой секции ДМ, аналогично выражению (2.5):

$$t_n = n t_1; \quad (2.18)$$

$$t_{n-1} = (n-1) t_1, \quad (2.19)$$

где  $n$  – номер секции.

Тогда выражение (2.14) примет вид:

$$W_{\text{перДМ}} = \frac{I^2 l t_1 \rho_{\text{м}}}{S_{\text{м}}} \left[ n^2 + (n-1)^2 + \dots + 1 \right]. \quad (2.20)$$

Изменение  $\Delta W_{\text{ДМ}}$  зависит от количества секций и сечения кабеля (рисунок 2.12).

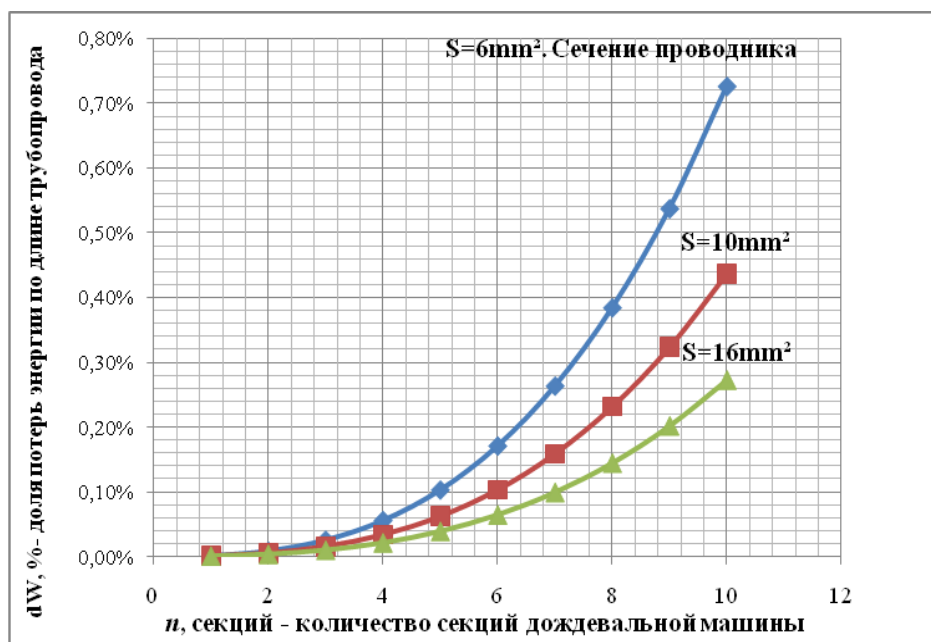


Рисунок 2.12 – Диаграмма изменения потерь электроэнергии по длине дождевальной машины в зависимости от количества секций

Из графика (см. рисунок 2.12) видно, что потери энергии при передаче по длине водораспределительного трубопровода зависят от количества секций (опорных тележек). Например, при мощности электродвигателя 550 Вт всех опорных тележек и времени работы ДМ за сезон 400 ч ( $t_n = 400$  ч) с длиной одинаковых секций  $l = 59$  м потери по длине 6 секций ДМ ( $n = 6$ ) составят 0,24 % для алюминиевого кабеля сечением  $6\text{мм}^2$  и 0,16 % для медного кабеля того же сечения. Если при тех же условиях кабель будет большего сечения (например,  $10\text{мм}^2$ ), то потери снизятся и для алюминиевого кабеля составят 0,15 %, а для медного – 0,11 %.

Таким образом, энергетическую эффективность ДМ можно повысить за счёт применения САБ, с помощью которых исключаются потери энергии при передаче, так как аккумуляторная батарея может быть установлена на опорной тележке рядом с электроприводом. Установлено, что потери энергии по длине ДМ зависят от количества секций. Применительно к условиям эксплуатации ДМ в совокупности можно снизить энергопотребление на водораспределение дождевальными машинами кругового действия от 0,20 до 2,01 %.

### **2.3 Обоснование математической модели зависимости параметров автономного источника электроснабжения от продолжительности работы электропривода секции дождевальной машины**

При использовании САБ необходимо обеспечить заданную продолжительность работы дождевальной машины. Во время эксплуатации секции ДМ солнечная батарея может служить в качестве основного источника энергии и для электроснабжения аккумуляторной батареи [12]. Однако, в отличие от аккумуляторов, солнечная батарея подвержена действию различных факторов, которые влияют на ее мощность. К таким факторам относят запыление, сопротивление элементов солнечной батареи, температуру окружающего воздуха, скорость ветра, влажность и т. д. [15].

Несмотря на глубину изучения способов применения солнечных батарей, существует проблема обоснования их параметров и параметров аккумуляторных батарей для обеспечения агротехнических требований выполнения полива и электроснабжения дождевальной машины.

Для определения зависимости факторов, влияющих на параметры электроснабжения секции ДМ при эксплуатации, проведем обоснование зависимости продолжительности работы электропривода секции дождевальной машины кругового действия от параметров источника на САБ. Для этого необходимо разработать электрическую схему электроснабжения на примере одной секции ДМ.

Рассмотрим схему, в которую входят солнечные элементы, аккумуляторная батарея и нагрузка в виде устройств управления секцией дождевальной машины и электродвигателя подвижной опоры секции ДМ (рисунок 2.13), а также изменения, происходящие в солнечной батарее и аккумуляторах при влиянии факторов окружающей среды.

Изобразим электрическую схему, в которой  $x$  последовательно и  $j$  параллельно соединенных солнечных элементов подключены к аккумуляторной батарее.

Для упрощения расчетов представим схему в следующем виде (рисунок 2.14).

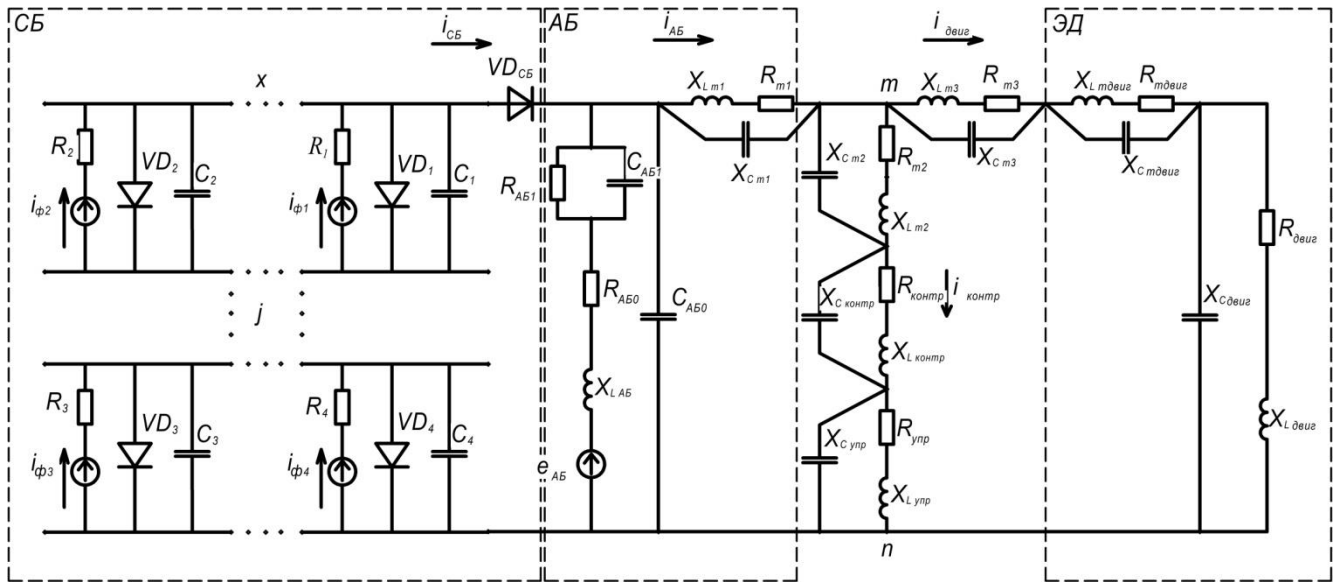


Рисунок 2.13 – Схема замещения системы электроснабжения секции ДМ с САБ:  
 $x, j$  – соответственно последовательно и параллельно соединенные солнечные элементы, шт.;  
 $i_{\phi 1-4}$  – фототок, протекающий по СБ, А;  $R_{1-4}$  – внутреннее сопротивление СБ, Ом;  
 $VD_{1-4}$  – диоды цепи СБ;  $C_{1-4}$  – емкость СБ, Ф;  $VD_{CB}$  – диод между цепями СБ и АБ;  
 $i_{CB}, i_{AB}, i_{двиг}, i_{контр}$  – суммарный ток от СБ, АБ, от цепи двигателя и от цепи контроллера  
 соответственно, А;  $R_{AB0-1}, R_{m1-3}, R_{контр}, R_{упр}, R_{мдвиг}$  – сопротивление АБ, проводников,  
 контроллера, устройства управления, проводников цепи двигателя соответственно, Ом;  
 $C_{AB0-1}$  – емкости АБ, А·ч;  $X_{L AB}, X_{L m1-3}, X_{L контр}, X_{L упр}, X_{L двиг}, X_{L тдвиг}$  – индуктивное  
 сопротивление АБ, проводников, контроллера, устройств управления, двигателя,  
 проводников цепи двигателя соответственно, Ом;  $e_{AB}$  – ЭДС АБ, В;  $X_{C m1-3}, X_{C контр}, X_{C упр},$   
 $X_{C двиг}, X_{C тдвиг}$  – емкостное сопротивление проводников, контроллера, устройств управления,  
 двигателя, проводников цепи двигателя соответственно, Ом;  $R_{двиг}$  – внутреннее  
 сопротивление электродвигателя ДМ, Ом

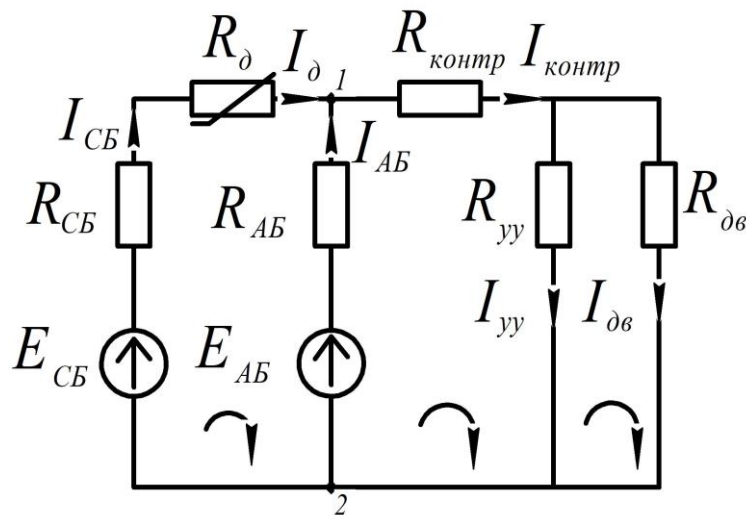


Рисунок 2.14 – Эквивалентная схема замещения электроснабжения  
 секции ДМ от САБ, подготовленная к расчету:  $E_{CB}$  – ЭДС солнечной батареи;  
 $R_{CB}$  – внутреннее сопротивление элементов солнечной батареи;  $I_{CB}$  – ток цепи  
 солнечной батареи;  $R_{д}$  – сопротивление диода;  $I_{д}$  – ток цепи диода;  $I_{уу}$  – ток цепи  
 устройства управления

Используя законы Кирхгофа [18], рассчитаем ток для узлов 1 и 2:

- для узла 1:

$$I_{CB} + I_{AB} = I_{\text{контр}}; \quad (2.21)$$

- для узла 2:

$$I_{\text{контр}} = I_{\text{дв}} - I_{\text{уу}}. \quad (2.22)$$

Примем сопротивления  $R_{\text{контр}}$ ,  $R_{\text{уу}}$ ,  $R_{\text{дв}}$  за эквивалентное сопротивление  $R_{\text{экв}}$  [50]:

$$R_{\text{экв}} = R_{\text{контр}} + \frac{R_{\text{дв}} R_{\text{уу}}}{R_{\text{дв}} + R_{\text{уу}}}. \quad (2.23)$$

С учетом (2.23) преобразуем эквивалентную схему цепи электроснабжения (см. рисунок 2.14) и рассчитаем полученную цепь, приняв направление токов и напряжения на зажимах 1 и 2.

Данную электрическую цепь рассмотрим с точки зрения действия двух ЭДС с учетом условий синхронизации в одной цепи, которые по принципу наложения наводят свои токи в каждой ветви.

Рассчитаем ток и необходимое значение напряжения на зажимах, к которым подключена нагрузка, по методу контурных токов [55].

Укажем направление напряжения на зажимах 1 и 2 (рисунок 2.15).

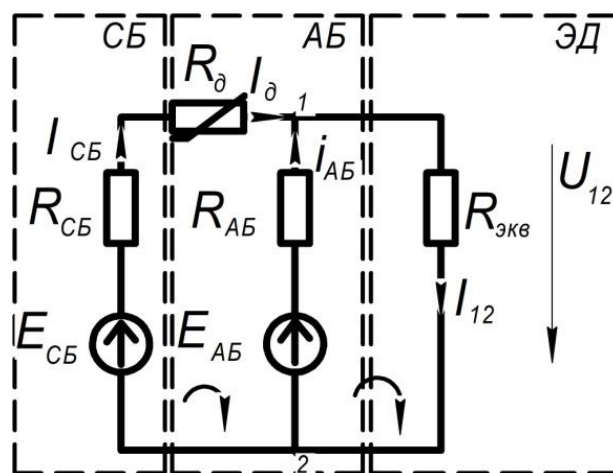


Рисунок 2.15 – Упрощённая схема замещения системы энергоснабжения секции ДМ с САБ:  $R_{CB}$  – внутреннее сопротивление СБ, Ом;  $R_{\text{экв}}$  – эквивалентное сопротивление устройств защиты и автоматики, Ом;  $I_{12}$  – ток нагрузки, А;  $E_{CB}$  – ЭДС СБ, В;  $R_d$  – сопротивление цепи диода, Ом;  $I_d$  – ток диода, А;  $U_{12}$  – напряжение на зажимах 1 и 2, В;  $I_{CB}$  – ток солнечной батареи, А

Используя теорию электрических цепей, напряжение на зажимах  $U_{12}$  можно описать следующим образом:

$$U_{12} = \frac{\frac{E_{CB}}{(R_{CB} + R_d)} + \frac{E_{AB}}{R_{AB}}}{\frac{1}{R_{CB} + R_d} + \frac{1}{R_{AB}} + \frac{1}{R_{\text{ЭКВ}}}}, \quad (2.24)$$

или

$$U_{12} = I_{12} R_{12}, \quad (2.25)$$

где  $I_{12}$  – ток на зажимах 1 и 2, А;  $R_{12}$  – сопротивление на зажимах 1 и 2, Ом.

Нагрузка на зажимах 1 и 2:

$$P_{12} = U_{12} I_{12}. \quad (2.26)$$

С учетом (2.26):

$$P_{12} = \left( \frac{\frac{E_{CB}}{(R_{CB} + R_d)} + \frac{E_{AB}}{R_{AB}}}{\frac{1}{R_{CB} + R_d} + \frac{1}{R_{AB}} + \frac{1}{R_{\text{ЭКВ}}}} \right) I_{\text{ЭКВ}}. \quad (2.27)$$

Продолжительность использования мощности во времени является энергией, поэтому умножим обе части выражения (2.27) на промежуток времени эксплуатации секции электрифицированной дождевальная машины:

$$P_{12} t = \left( \frac{\frac{E_{CB}}{(R_{CB} + R_d)} + \frac{E_{AB}}{R_{AB}}}{\frac{1}{R_{CB} + R_d} + \frac{1}{R_{AB}} + \frac{1}{R_{\text{ЭКВ}}}} \right) I_{12} t. \quad (2.28)$$

Выразим сопротивления  $R_{CB}$ ,  $R_{AB}$ ,  $R_d$ ,  $R_{\text{ЭКВ}}$  в формуле (2.28) как проводимости  $g_{CB}$ ,  $g_{AB}$ ,  $g_d$ ,  $g_{\text{ЭКВ}}$ :

$$P_{12} t = \left( \frac{E_{CB} (g_{CB} + g_d) + (E_{AB} g_{AB})}{g_{CB} + g_d + g_{AB} + g_{\text{ЭКВ}}} \right) I_{12} t. \quad (2.29)$$

Примем допущение, что проводимость в цепи СБ и диода равна проводимости в цепи АБ. Обозначим проводимость в цепях СБ и АБ как  $g$ :

$$g_{CB} + g_d = g_{AB} = g. \quad (2.30)$$

Тогда выражение (2.29) примет вид:

$$P_{12}t = \frac{g(E_{CB} + E_{AB})}{g\left(2 + \frac{g_{\text{экв}}}{g}\right)} I_{12}t. \quad (2.31)$$

Отношение эквивалентной проводимости  $g_{\text{экв}}$  к проводимости в цепях СБ и АБ обозначим как  $G$ :

$$\frac{g_{\text{экв}}}{g} = G. \quad (2.32)$$

Тогда после сокращений и преобразований выражение (2.31) примет вид:

$$P_{12}t = \frac{(E_{CB} + E_{AB})}{(2 + G)} I_{12}t. \quad (2.33)$$

Преобразуем выражение (2.33):

$$P_{12}t = \frac{(E_{CB}I_{12}t + E_{AB}I_{12}t)}{(2 + G)}, \quad (2.34)$$

где

$$E_{CB}I_{12}t = W_{CB}; \quad (2.35)$$

$W_{CB}$  – энергия СБ, кВт·ч;

$$E_{AB}I_{12}t = W_{AB}; \quad (2.36)$$

$W_{AB}$  – энергия АБ, кВт·ч.

С учетом (2.35) и (2.36) выражение (2.34) принимает вид:

$$P_{12}t = \frac{W_{CB} + W_{AB}}{2 + G}. \quad (2.37)$$

Энергию от СБ можно также представить следующим образом:

$$W_{CB} = \int_0^t e_{CB} I_{CB} \sin\left(\frac{2\pi}{T} dt + A\right) \left(1 - k_{\gamma} \sin\left(\frac{2\pi}{T_1} dt + A\right)\right) dt, \quad (2.38)$$

где  $e_{CB}$  – ЭДС СБ, соединенных последовательно и параллельно, В;  $I_{CB}$  – ток СБ в точке максимальной мощности, А;  $k_\gamma$  – коэффициент, учитывающий снижение мощности от рассеяния;  $T$  – продолжительность суток, ч,  $T = 24$  ч;  $T_1$  – продолжительность светового дня, ч;  $t$  – продолжительность цикла полива ДМ, ч;  $A$  – угол между вектором Пойнтинга и нормалью к СБ, рад.

Удельный ток солнечной батареи  $I_{УСБ}$ :

$$I_{УСБ} = I_\phi - I_{он} \left\{ \exp \left[ \frac{e(V + I_n R_n)}{AkT} \right] - 1 \right\} - \frac{V}{R_{ш}}, \quad (2.39)$$

где  $I_\phi$  – фототок, А;  $I_{он}$  – ток обратного насыщения, А;  $e$  – заряд электрона, Кл;  $V + I_n R_n$  – диодное напряжение, В;  $I_n$  – номинальный ток солнечного элемента, А;  $R_n$  – последовательное сопротивление солнечного элемента, Ом;  $k$  – постоянная Больцмана, Дж/К;  $T$  – абсолютная температура, °С;  $R_{ш}$  – шунтовое сопротивление солнечного элемента, Ом.

Энергия заряженной аккумуляторной батареи номинальной емкостью  $C_n$ , А·ч:

$$W_{АБ} = E_{АБ} C_n (1 - k_{АБ}), \quad (2.40)$$

где  $E_{АБ}$  – ЭДС на зажимах АБ, В;  $k_{АБ}$  – коэффициент, учитывающий неиспользованную емкость АБ, для тяговых АБ  $k_{АБ} = 0,1 \dots 0,3$ .

Электроснабжение нагрузки от СБ обеспечивается в дневное время суток, когда максимальная мощность СБ равна мощности нагрузки. В рассуждениях полагаем источник энергетического излучения – точечный; взаимное пространственное положение объектов «источник излучения – приемник»; их энергетическое взаимодействие на интервале облучения приемника определяем на основе вектора Пойнтинга. Электрический режим СБ определяем в окрестностях точки ВАХ, соответствующей максимальной мощности СБ. Изменение характеристик СБ, обусловленное их нагревом, не учитываем.

Преобразовав выражения (2.40), (2.38) и подставив их в (2.37), получим систему уравнений, описывающую параметры автономной системы электроснабжения электропривода для различных вариантов коммутации САБ с электроприводом секции ДМ:



- без аккумуляторных батарей (дневной полив):

$$\left. \begin{aligned} U_{12} &= E_{CB} = E_{AB}; \\ W_{AB} &= 0; \\ \frac{P_{CB \max}}{P_{12}} &> 1, 0; \\ \frac{P_{CB \max}}{P_{12}} &= \left( \frac{P_{YCB \max} S}{2P_{12}} \sin \left[ \frac{2\pi}{T} t + A \right] + \frac{P_{YCB \max}}{2P_{12}} \right) \left( 1 - \left[ \frac{k_\gamma}{2} \sin \left( \frac{2\pi}{T_1} t + A \right) + \frac{k_\gamma}{2} \right] \right) \end{aligned} \right\}; \quad (2.41)$$

- с аккумуляторными батареями (непрерывный полив день – ночь; ночной полив):

$$\left. \begin{aligned} U_{12} &= E_{CB} = E_{AB}; \\ W_{AB} &= \frac{P_{12} t (2 + G)(1 + k_w w)}{1 - k_{AB}}; \\ \frac{P_{CB \max}}{P_{12}} &> 1, 0; \\ \frac{P_{CB \max}}{P_{12}} &= \left( \frac{P_{YCB \max} S}{2P_{12}} \sin \left[ \frac{2\pi}{T} t + A \right] + \frac{P_{YCB \max}}{2P_{12}} \right) \left( 1 - \left[ \frac{k_\gamma}{2} \sin \left( \frac{2\pi}{T_1} t + A \right) + \frac{k_\gamma}{2} \right] \right) \end{aligned} \right\}, \quad (2.42)$$

где  $P_{CB \max}$  – максимальная мощность, вырабатываемая солнечной батареей горизонтально установленной на водопроводящем трубопроводе ДМ, Вт;  $P_{YCB \max}$  – удельная максимальная мощность, вырабатываемая 1 м<sup>2</sup> СБ, Вт;  $k_w$  – коэффициент, учитывающий продолжительность и мощность пуска,  $k_w = 0,001 \dots 0,10$ ;  $w$  – число пусков электропривода.

Используя числовое значение потерь энергии из-за угла наклона батареи  $k_\gamma = 0,2$  и соблюдая условия (2.41) и (2.42), получим графические решения параметров автономной системы электроснабжения (рисунки 2.16 и 2.17).

Если максимальная мощность, вырабатываемая солнечной батареей, составляет 600 Вт (синие линии 1 и 2 на рисунке 2.16) в дневное время с учетом стационарного горизонтального расположения солнечной батареи без устройств ориентации по перемещению солнца и соответствует мощности нагрузки  $P_{12} = 500$  Вт, то элек-

троснабжение электропривода этой секции обеспечивается в интервале времени от  $t_1$  до  $t_2$ . При солнечной батарее с большей максимальной мощностью ( $P_{CB} = 720$  Вт) продолжительность электроснабжения увеличивается на 2,4 ч, или в 1,4 раза, в интервале времени от  $t_3$  до  $t_4$ .

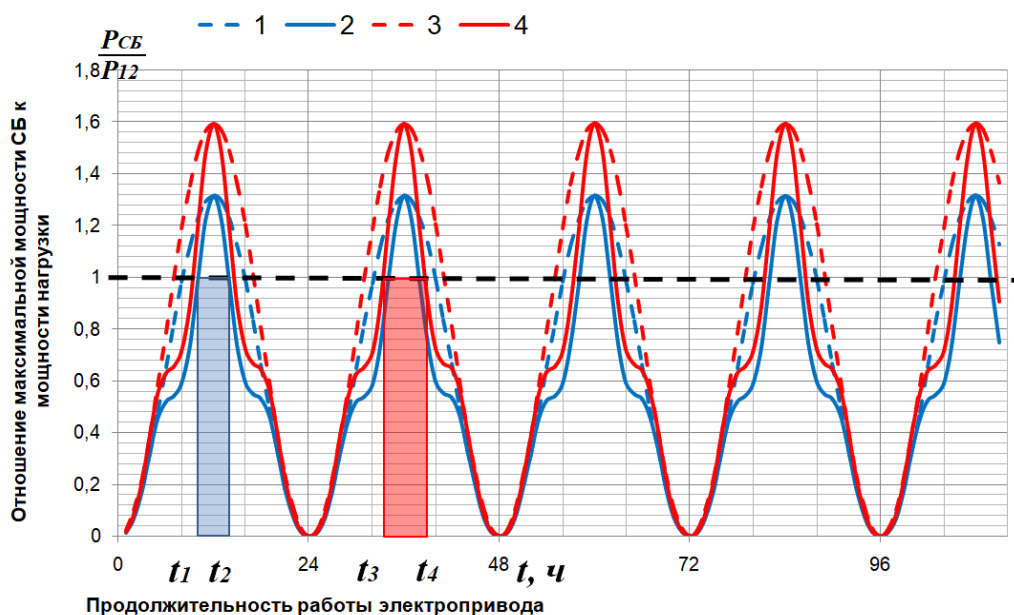


Рисунок 2.16 – Зависимость отношения максимальной мощности СБ к мощности нагрузки 500 Вт: 1, 3 – отношение мощностей с учетом устройств ориентации СБ при максимальной мощности 600 и 720 Вт соответственно; 2, 4 – отношение мощностей с учетом стационарно расположенной СБ при максимальной мощности 600 и 720 Вт соответственно

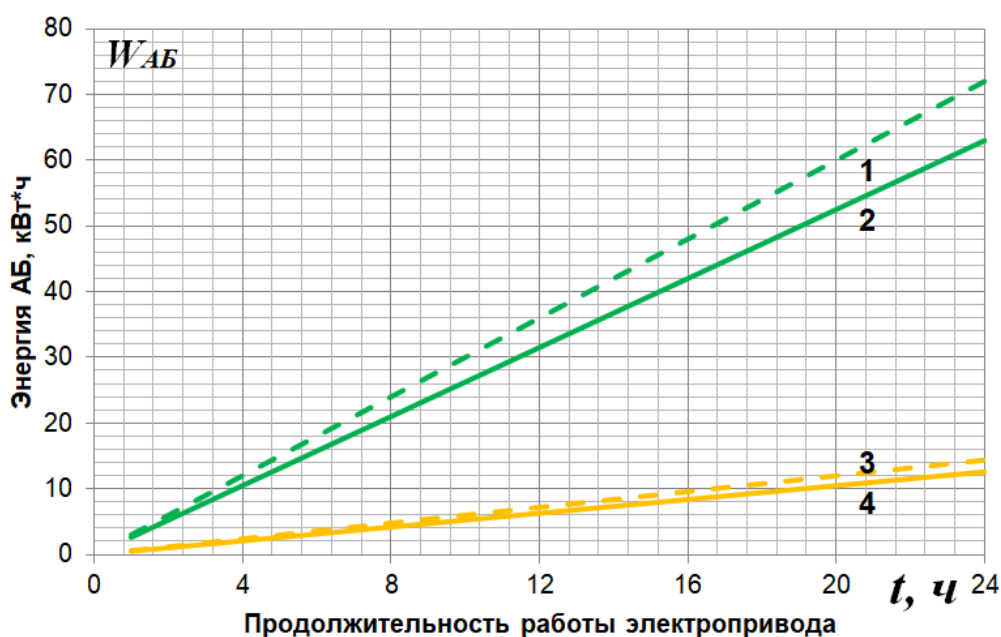


Рисунок 2.17 – Зависимость энергии АБ от продолжительности работы электропривода при числе пусков  $w = 100$ : 1 – при  $k_{AB} = 0,3$ ,  $k_W = 0,05$ ; 2 – при  $k_{AB} = 0,2$ ,  $k_W = 0,05$ ; 3 – при  $k_{AB} = 0,3$ ,  $k_W = 0,002$ ; 4 – при  $k_{AB} = 0,2$ ,  $k_W = 0,002$

Если количество пусков электропривода  $w = 100$ , а коэффициент, учитывающий продолжительность и мощность пуска,  $k_w = 0,002$ , то для электроснабжения электропривода секции ДМ в течение 20 ч непрерывной работы потребуется энергия АБ 10 кВт·ч (желтая линия на рисунке 2.17). Если же пусковые процессы более энергоемкие ( $k_w = 0,05$ ), то для электроснабжения электропривода секции потребуется в 5 раз больше энергии (зеленая линия на рисунке 2.17) при средней мощности нагрузки  $P_{12} = 500$  Вт.

Применив систему уравнений (2.42) для ДМ, состоящей из  $n$  секций, параметры СБ получим из условия:

$$\frac{P_{СБ}}{nP_{12}} \geq 1,0, \quad (2.43)$$

при котором при удельной максимальной мощности 180 Вт/м<sup>2</sup> для ДМ необходима площадь СБ не менее 4 м<sup>2</sup> для  $n$  секций. Общую энергию АБ определим с учетом продолжительности работы электропривода каждой секции и количества их пусков из условия:

$$W_{АБ} = \frac{P_{12}(2+G)t \left[ \frac{n+1}{2} \right] \left( 1 + k_w \left[ w_n + \frac{n360^\circ}{(n-1)\varphi} \right] \right)}{1 - k_{АБ}}, \quad (2.44)$$

где  $w_n$  – количество пусков электропривода крайней секции, которая является задающей;  $\varphi$  – допустимый угол излома трубопровода опорных тележек соседних секций,  $\varphi = 2,0^\circ \dots 2,5^\circ$ .

Электрические характеристики АБ и закономерности взаимодействия батарей с элементами системы близки к линейным.

Согласно полученным данным, параметры автономной системы электроснабжения САБ зависят от вариантов коммутации ее элементов и нагрузки в течение рабочего цикла, который определяется по графику полива, загруженности насосной станции и другим технологическим особенностям.

Рассмотрим варианты взаимной коммутации элементов системы электроснабжения и нагрузки.

## 2.4 Варианты коммутации элементов системы электроснабжения от солнечных и аккумуляторных батарей с нагрузкой

Дождевальную машину эксплуатируют как в дневной, так и в ночной периоды времени суток. Для этого необходимо адаптировать работу автономного источника электроснабжения. Например, ДМ в ночное время работает от АБ без использования энергии от СБ. В дневной период СБ может служить как в качестве основного источника электроснабжения ДМ, так и для заряда АБ. Каждый период имеет свои особенности вариантов коммутации, поэтому для эффективного электроснабжения необходимо обосновать варианты коммутации источника с солнечными и аккумуляторными батареями с нагрузкой секции ДМ.

Согласно полученным данным, параметры автономной системы электроснабжения с САБ зависят от вариантов коммутации источника с САБ и нагрузки в течение рабочего цикла.

Рассмотрим варианты взаимной коммутации источника с САБ и нагрузки.

*Вариант 1* – подключение СБ через контроллер к электроприводу секции ДМ, когда время включения ДМ совпадает с началом светового дня (рисунок 2.18).

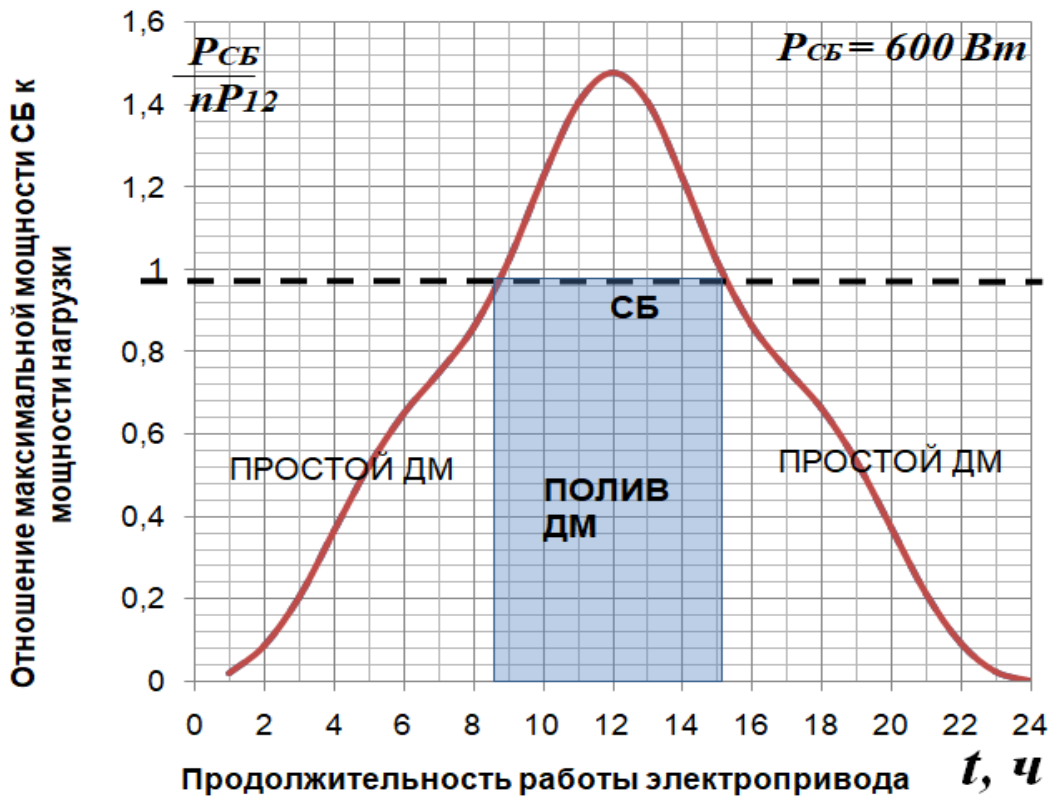


Рисунок 2.18 – Зависимость параметров автономной системы электроснабжения от вариантов коммутации ее элементов и нагрузки (дневной полив с использованием СБ без АБ)

В данном режиме электрическая энергия от СБ расходуется в электроприводе для перемещения трубопровода секции ДМ без применения дополнительного аккумуляторного электроснабжения. Такой вариант возможен при ясной погоде.

*Вариант 2* – подключение, при котором работа электропривода секции ДМ осуществляется от АБ, а заряд АБ – от СБ в свободные от полива промежутки времени (рисунок 2.19). Схемотехнические решения по обеспечению зарядного режима АБ от СБ подробно не рассматриваются.

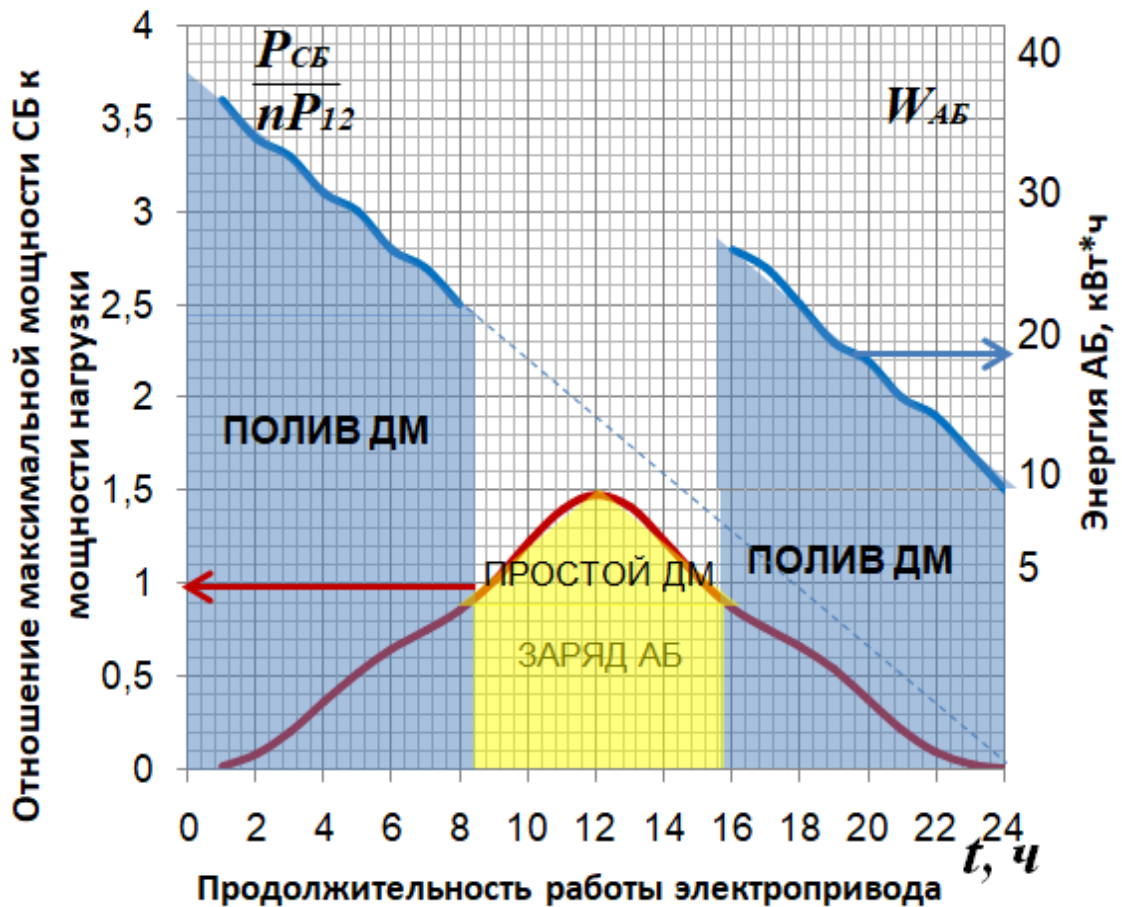


Рисунок 2.19 – Зависимость параметров автономной системы электроснабжения от вариантов коммутации ее элементов и нагрузки (ночной полив с использованием САБ)

В данном случае энергия СБ обеспечивает необходимую энергию заряда АБ в промежуток до следующего полива. В данном режиме можно выполнять полив в ночное время суток.

*Вариант 3* – параллельное подключение САБ к электроприводу ДМ. СБ частично обеспечивает электроснабжение, а остальную часть – АБ (рисунок 2.20, а). Данный режим можно использовать при пасмурной погоде.

Коммутация солнечных и аккумуляторных батарей соответствует буферному электрическому режиму СБ и АБ.

Электроснабжение осуществляется следующим образом. Например, солнечная активность начинается за несколько часов до начала эксплуатации секции ДМ. В это время энергия от СБ поступает на заряд АБ. При этом возможно несколько вариантов распределения электрической энергии на выполнение работы электропривода секции ДМ. Электрическая энергия СБ частично обеспечивает электроснабжение электропривода секций ДМ и частично – заряд АБ.

Если энергии от СБ будет недостаточно для нормальной эксплуатации ДМ (что возможно при пасмурной погоде), часть недостающей энергии будет расходоваться из АБ (рисунок 2.20, б).

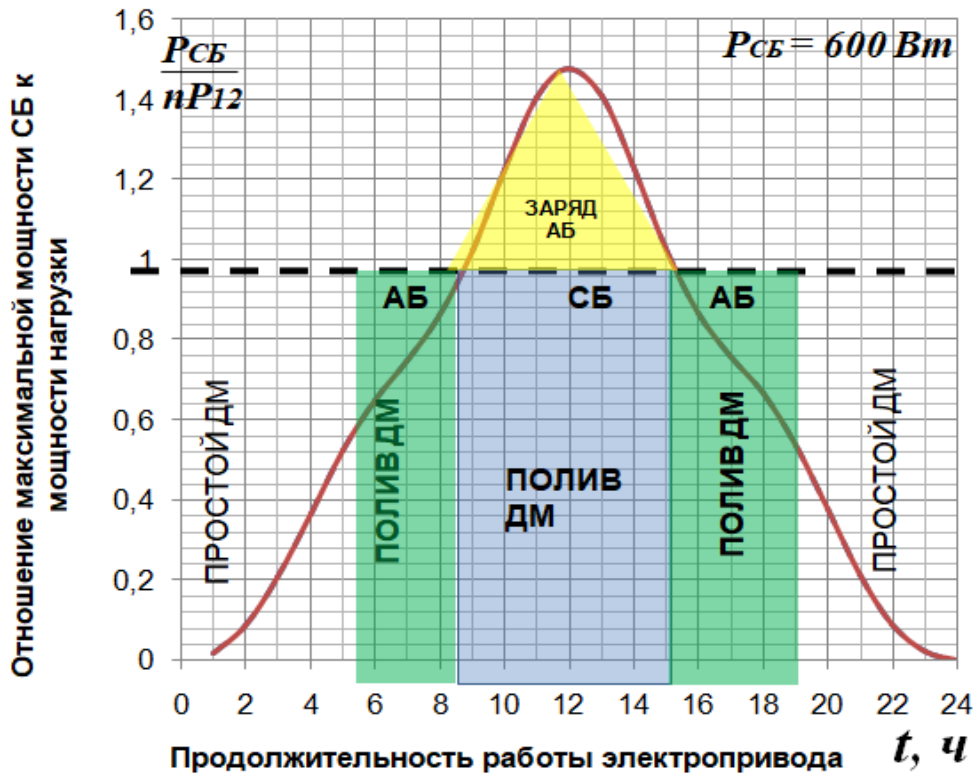
АБ является источником электроснабжения для электродвигателя. Обеспечить электроснабжение электродвигателя номинальным напряжением можно путем последовательного и параллельного соединения аккумуляторов в батарею.

Реализация данных вариантов коммутации источников электроснабжения (САБ) возможна при наличии контроллера управления параметрами выходного напряжения и тока СБ, так как они являются случайными величинами.

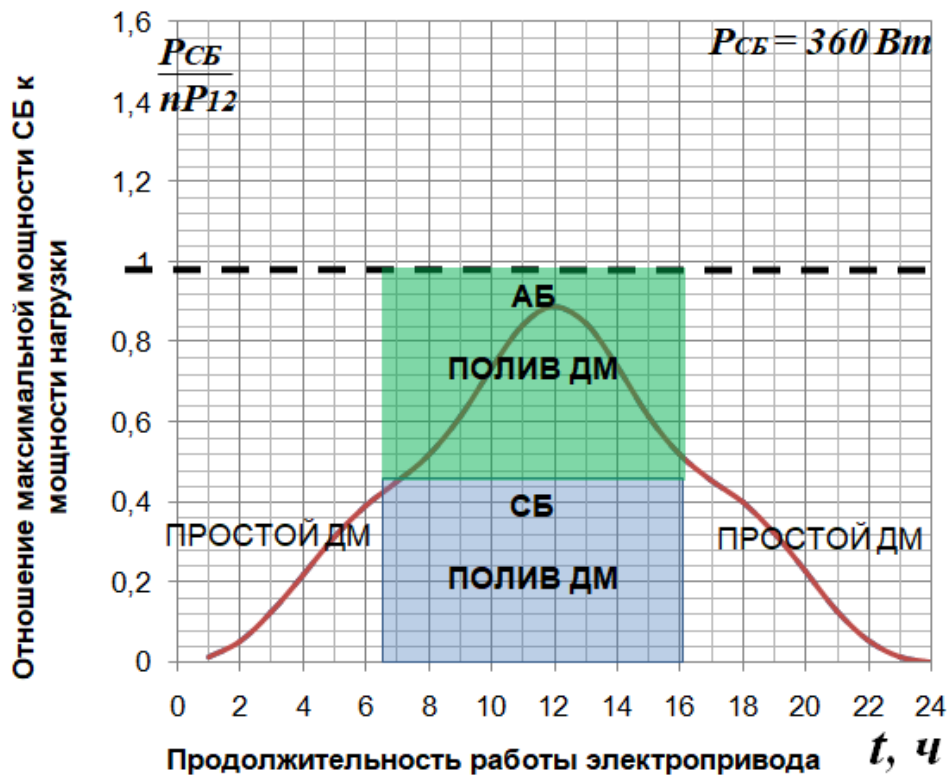
Случайность определяется действием многих факторов: положением солнца, углом наклона СБ, облачностью или другими затенениями, а также положением ДМ в процессе полива (рисунок 2.21).

Как было отмечено в 1-й главе, для Саратовской обл. наибольшее количество солнечной энергии приходится на промежуток времени с 10:00 до 17:00.

Облачность оценивается в Гидрометцентре России баллами: 10 баллов соответствует «затянutoму тучами небу», а 0 баллов – ясному небу.



а



б

Рисунок 2.20 – Зависимость параметров автономной системы электроснабжения от вариантов коммутации ее элементов и нагрузки:

а – заряд АБ от СБ; б – часть недостающей энергии расходуется из АБ

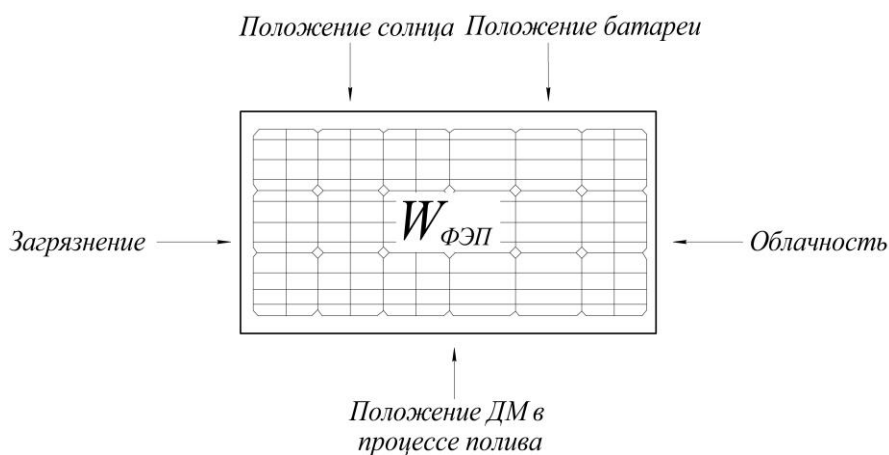


Рисунок 2.21 – Влияние внешних факторов на количество энергии, вырабатываемой СБ

Влияние на преобразование энергии  $W_{СБ}$  такого фактора, как положение солнечной батареи и ДМ, необходимо минимизировать. При установке СБ в вертикальной плоскости относительно поверхности земли в одном положении ДМ от СБ можно добиться максимального преобразования, а другом положении ДМ на солнечную батарею совсем не будут падать солнечные лучи (рисунок 2.22).

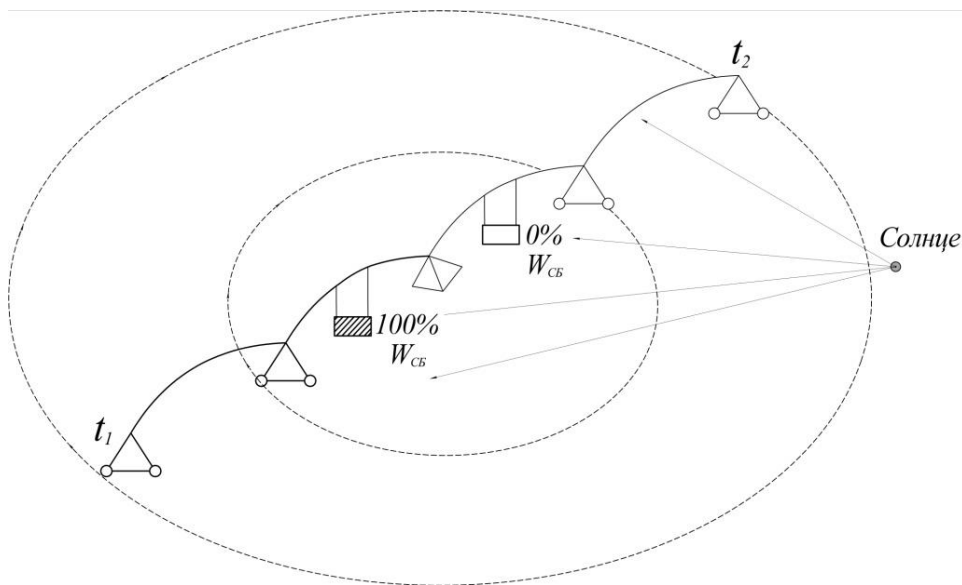


Рисунок 2.22 – Влияние направленного распространения энергии излучения на выработку энергии СБ

Использование устройств ориентации по солнцу также затруднено. Примем, что СБ следует располагать параллельно поверхности грунта, чтобы в любом положении ДМ можно было получить 60–90 % электроэнергии, преобразованной в фотоэлектрическом устройстве. На рисунке 2.23 показано расположение САБ на автономной секции ДМ, на которую получен патент на полезную модель.



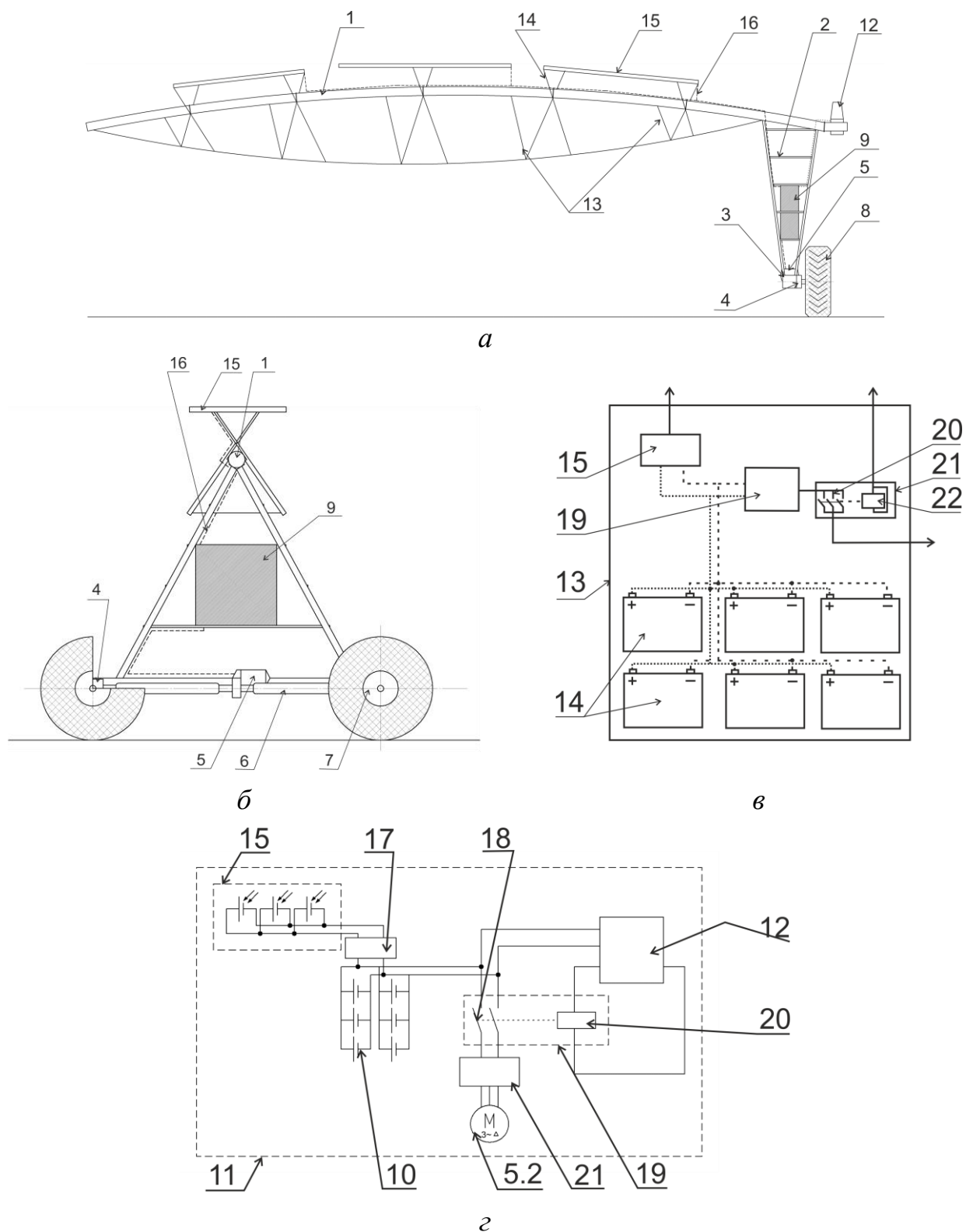


Рисунок 2.23 – Секция ДМ с САБ: *а* – вид с боку; *б* – вид спереди; *в, г* – структурная схема электроснабжения ДМ с САБ; 1 – водопроводящий трубопровод; 2 – А-образная рама; 3 – поперечная балка; 4 – колесный редуктор; 5 – редукторный электродвигатель; 6 – карданные валы; 7 – колеса; 8 – пневматические шины; 9 – герметичный щит с АБ; 10 – аккумуляторные батареи; 11 – схема электроснабжения редукторного электродвигателя; 12 – прибор синхронизации движения в линию; 13 – ферма трубопровода; 14 – Х-образные кронштейны; 15 – СБ; 16 – соединительные провода; 17 – контроллер заряда; 18 – контакты магнитного пускателя; 19 – магнитный пускатель; 20 – катушка магнитного пускателя; 21 – инверторный преобразователь; 22 – подвижная опора секции ДМ с применением предлагаемого способа электроснабжения

Контроллеры управления используют для стационарных режимов заряда АБ. ЭДМКД является мобильным электрифицированным устройством не только с переменной нагрузкой, но и переменным входным значением солнечной энергии, так как машина перемещается.

## **2.5 Разработка алгоритма контроллера источника с солнечными и аккумуляторными батареями**

Коммутация СБ и АБ происходит с помощью контроллера. Заводы-изготовители производят контроллеры, рассчитанные на режим заряда АБ от СБ. Традиционные устройства совместного использования САБ, как правило, обеспечивают только режим заряда, регулируя ток, напряжение заряда и контроль емкости АБ [6]. В нашем случае необходимо разработать устройство, позволяющее реализовать варианты коммутации СБ, АБ или их комбинацию для электроснабжения электропривода в соответствии с режимами полива. Дополнительно следует предусмотреть алгоритм работы, обеспечивающий экономию заряда аккумуляторов в моменты максимального производства энергии солнечными батареями (в дневное время).

Представленные варианты коммутации электроснабжения дождевальной машины обеспечиваются не только включением и переключением источников, но и выполнением ряда требований по управлению параметрами синхронизации двух источников (САБ), работающих на общую нагрузку, и стабилизации параметров заряда при преобразовании энергии в фотоэлектрическом устройстве (СБ), так как количество энергии, получаемой от СБ, – случайная величина.

Работа электропривода опорной тележки с вентильным электродвигателем обеспечивается поддержанием минимальной мгновенной мощности на зажимах его контроллера. Нагрузка на электропривод является случайной величиной и зависит от положения ДМ, колес секции, а также от характеристик грунта [28]. Необходимо ориентироваться на максимальное значение мощности в каждый момент времени. Также для аккумуляторных батарей, оснащенных солнечными батареями, необходимо обеспечить максимальное сохранение заряда для макси-

мальной продолжительности работы. Этого можно достичь, когда в солнечный день электропривод работает только на энергии, преобразованной от солнечных батарей. В течение дня солнечная активность изменяется, и нагрузка может недополучать необходимую мощность. В этот момент часть энергии следует использовать от АБ.

На рисунке 2.24 представлена структурная схема включения нагрузки через САБ.

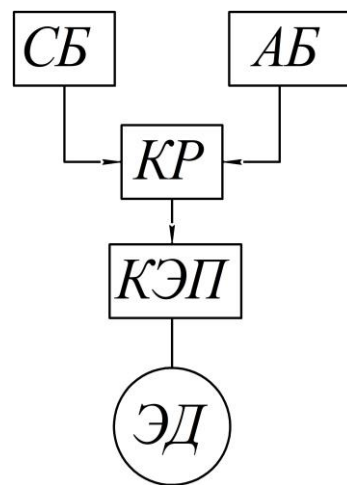


Рисунок 2.24 – Структурная схема включения нагрузки с САБ: СБ – солнечная батарея; АБ – аккумуляторная батарея; КР – контроллер режимов; ЭД – электродвигатель; КЭП – контроллер электропривода

Рассмотрим два варианта работы источника электроснабжения: вариант работы ДМ (режим полива) и вариант ее простоя.

При работе ДМ в любой момент времени необходимо обеспечивать 100%-е значение мощности на выводах КЭП для обеспечения движения ДМ. В зависимости от времени суток и погодных факторов энергия на нагрузку поступает от двух источников одновременно или по отдельности. Процесс распределения энергии (мощности) от источников к нагрузке регулируется контроллером режимов, общая структурная схема которого представлена на рисунке 2.25.

Рассмотрим рабочий процесс контроллера режимов по параметру напряжения и представим структурную схему работы программируемого микропроцессора следующим образом (рисунок 2.26).

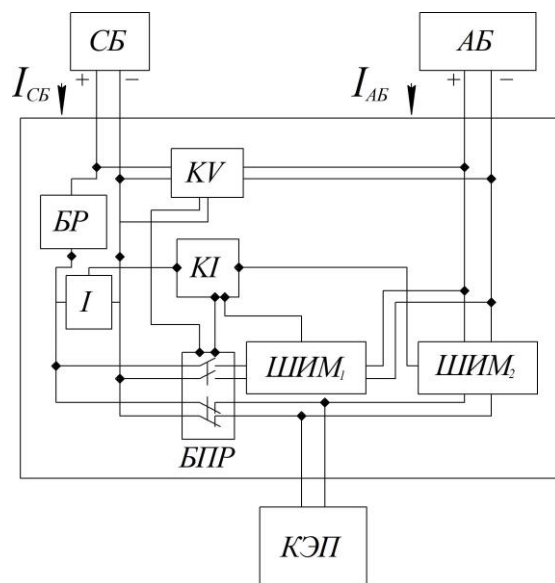


Рисунок 2.25 – Структурная схема контроллера режимов: *СБ* – солнечная батарея; *АБ* – аккумуляторная батарея;  $I_{СБ}$  – ток *СБ*;  $I_{АБ}$  – ток *АБ*; *KV* – контроллер напряжения; *БР* – блок резисторов; *KI* – контроллер тока; *ШИМ<sub>1</sub>* – устройство регулирования тока *СБ* для заряда; *ШИМ<sub>2</sub>* – устройство регулирования тока *АБ*; *КЭП* – контроллер электропривода; *БПР* – блок переключения режимов

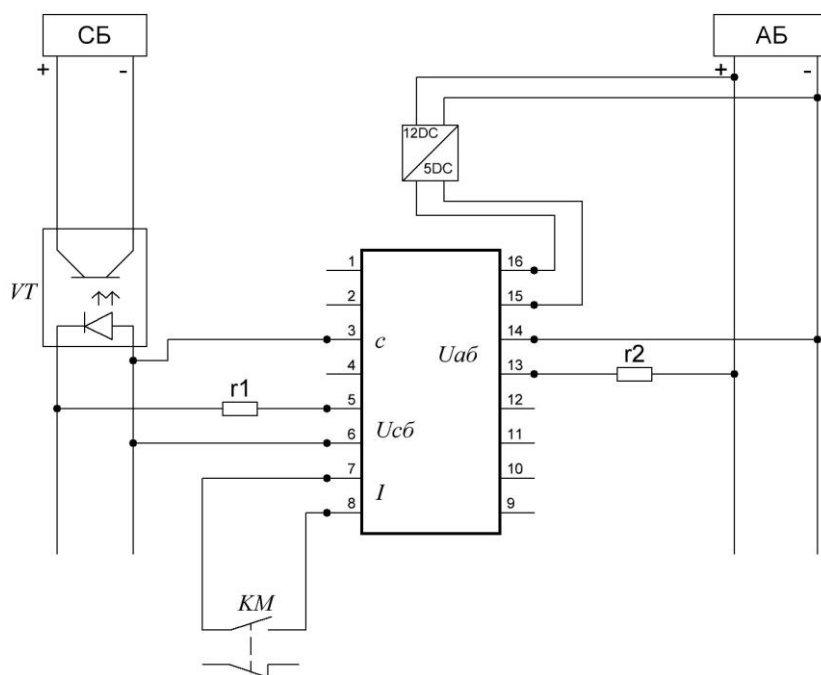


Рисунок 2.26 – Упрощенная электрическая схема соединений выводов микропроцессорного устройства контроля и регулирования напряжения: *СБ* – солнечная батарея; *АБ* – аккумуляторная батарея; 12DC/5DC – блок электроснабжения микропроцессора; *VT* – твердотельное реле; *KM* – переключатель на два положения;  $U_{СБ}$  – напряжение *СБ*;  $U_{АБ}$  – напряжение *АБ*

Из рисунка 2.26 видно, что контроллер режимов регулирует напряжение для выполнения требований синхронизации, так как параллельная работа солнечной и аккумуляторной батарей осуществляется на одну нагрузку, а регулирование происходит путём подачи сигнала на твердотельное реле DC/DC. Электроснабжение процессора обеспечивается блоком 12DC/ 5DC.

Рабочий процесс контроллера по напряжению осуществляется следующим образом.

1. В начальный момент времени ( $t = 0$ ) измеряется разница  $x$  напряжений солнечной и аккумуляторной батарей.

2. Если напряжение СБ незначительно отличается от напряжения АБ, то  $0 < x < 0,05$  В. Управляемый сигнал на твердотельном реле равен 0, и через него проходит напряжение.

3. Если  $x > 0,05$  В, то на твердотельное реле подается сигнал о закрытии его части путем подачи сигнала, например, 0,01 В.

4. Осуществляется сравнение показателей СБ и АБ. Если разница их напряжений остается, то мощность от солнечной батареи подается на АБ для заряда.

Матрица условий и решений контроллера режимов по напряжению представлена в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Матрица условий и решений контроллера режимов по напряжению

Условие		Преобразование	Сравнение	Решение
$I \neq 0$	$t = t_0$	$U_{СБ} - U_{АБ} = x$	$0 < x \leq 0,05$ В	$c_0 = 0$
$I \neq 0$	$t = t_1$	$U_{СБ} - U_{АБ} = x_1$	$x_1 > 0,05$ В	$c_1 = 0,1$ В
$I \neq 0$	$t = t_2$	$U_{СБ} - U_{АБ} = x_2$	$x < 0$	$c_2 = c_1 - 0,1$ В
$I = 0$	$t' = t_0$	$c = 0$	–	$\gamma$ (вкл.)

Примечание: опрос данных по времени  $\Delta t = t_{i+1} - t_i = 20$  мс;  $U_{СБ}$  – напряжение СБ, В;  $U_{АБ}$  – напряжение АБ, В;  $x$  – разница показаний измерения, В;  $t$  – момент времени измерения, с;  $c$  – значение управляемого сигнала, В.

Рассмотрим рабочий процесс контроллера режимов по параметру тока. Представим структурную блок-схему элементов программируемого микропроцессорного контроллера вариантов коммутации (рисунке 2.27).

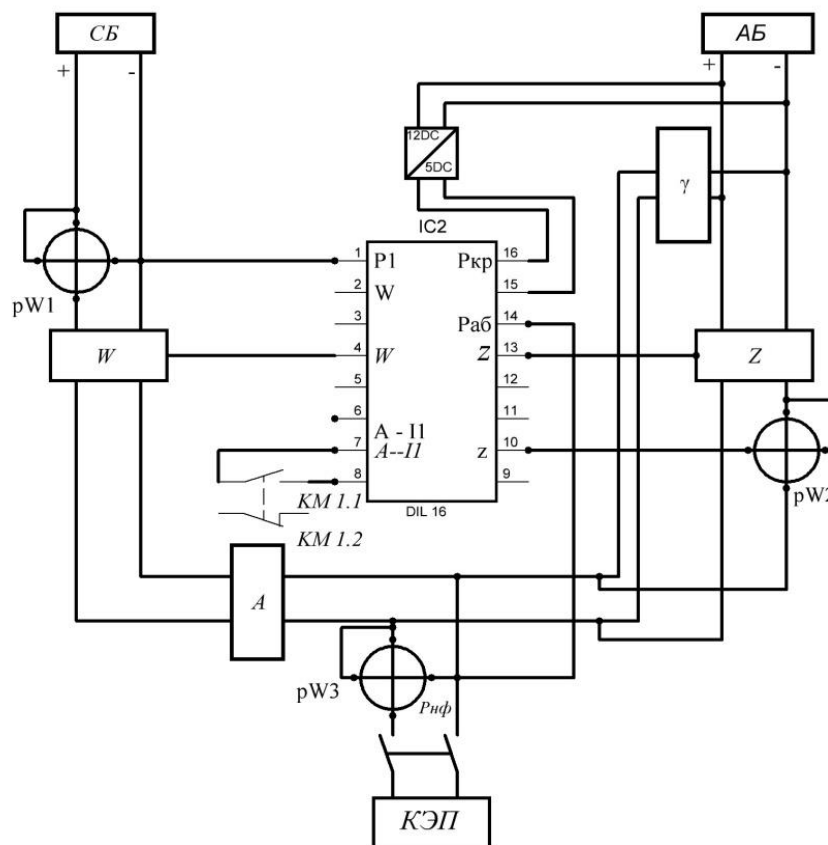


Рисунок 2.27 – Упрощенная электрическая схема соединений выводов микропроцессорного устройства контроля и регулирования мощности: СБ – солнечная батарея; АБ – аккумуляторная батарея; W – устройство регулирования мощности СБ; Z – устройство регулирования мощности АБ; КМ – переключатель на два положения; А – устройство контроля тока СБ; КЭП – контроллер электропривода; 12DC/5DC – блок электроснабжения микропроцессора;  $P_1$  – мощность СБ;  $P_{нр}$  – номинальная расчетная мощность;  $P_{АК}$  – мощность АБ;  $P_{нф}$  – номинальная фактическая мощность;  $\gamma$  – контроллер заряда АБ;  $pW_1$ ,  $pW_2$ ,  $pW_3$  – измерители мощности

Электроснабжение процессора осуществляется блоком 12DC/5DC.

Алгоритм работы контроллера по параметру тока следующий.

1. В начальный момент времени ( $t = 0$ ) по контактору КМ протекает ток (цепь замкнута), т. е.  $I \neq 0$ . Происходит измерение и сравнение разницы мощностей  $\alpha$  и  $\beta$  прибора  $pW_1$  на СБ и прибора  $pW_2$ , подведенного к нагрузке с расчетной номинальной (заданной) мощностью.

2. Если разница  $\alpha$  и  $\beta$  больше нуля, то широтно-импульсный модуль (ШИМ) W находится в максимально открытом положении. ШИМ-контроллер W полностью пропускает через себя ток, вырабатываемый СБ, а его регулировочный резистор находится в положении с сопротивлением, равным нулю –  $R_w = 0$ . ШИМ-контроллер z находится в закрытом положении и не пропускает через себя ток от

АБ. Его регулировочный резистор находится в положении с максимальным сопротивлением –  $R_z = R_{z\text{-max}}$ .

3. Если разница мощностей  $\alpha$  и  $\beta$  меньше нуля, например, в момент времени  $t_1$ , подается сигнал об открытии части ШИМ контроллера  $z$  регулированием резистора на ступень (уменьшение), например,  $R_z = R_{z\text{-max}} - 1$  Ом. Ступень регулирования зависит от максимального значения сопротивления регулировочного резистора.

4. Если значение разницы  $\alpha$  продолжает уменьшаться, то ШИМ-контроллер  $z$  открывается еще на одну ступень.

5. Подача мощности с ШИМ-контроллера  $z$  продолжается до тех пор, пока разницы мощностей  $\alpha$  и  $\beta$  не примут значения больше нуля.

Матрица условий и решений контроллера режимов по параметру тока представлена в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Матрица условий и решений контроллера режимов по параметру тока

Условия		Преобразование	Сравнение	Решение
$I \neq 0$	$t = t_0$	$P_1 - P_{\text{нф}} = \alpha_0$ $P_{\text{нф}} - P_{\text{нр}} = \beta_0$	$\alpha_0 \geq 0, \beta_0 \geq 0$	$R_z = R_{z\text{-max}}, R_w = 0$
$I \neq 0$	$t = t_1$	$P_1 - P_{\text{нф}} = \alpha_1$ $P_{\text{нф}} - P_{\text{нр}} = \beta_1$	$\alpha < \alpha_1 < 0$ $\alpha < \beta_1 < 0$	$R_z = R_{z\text{-max}} - 1 \text{ Ом},$ $R_w = R_{w\text{max}}$
$I > 0$	$t = t_2$	$P_1 - P_{\text{нф}} = \alpha_2$ $P_{\text{нф}} - P_{\text{нр}} = \beta_2$	$\alpha < \alpha_2 < 0$ $\beta_2 \geq 0$	$R_{z2} = R_z,$ $R_w = R_{w\text{max}}$
$I > 0$	$t = t_3$	$P_1 - P_{\text{нф}} = \alpha_3$ $P_{\text{нф}} - P_{\text{нр}} = \beta_3$	$\alpha_3 \geq 0$ $\beta_3 \geq 0$	$R_{z3} = R_{z2} - 1 \text{ Ом},$ $R_w = R_{w\text{max}}$
$I = 0$	$t = t_i$			$R_w = 0, \gamma$ (вкл.)

Примечание:  $\alpha, \beta$  – значения измерителей мощности  $p_{w1}$  и  $p_{w2}$  соответственно, Вт;  $R_w$  – сопротивление ШИМ-контроллера  $w$ , Ом;  $R_z$  – сопротивление ШИМ-контроллера  $z$ , Ом.

Таким образом, контроллер вариантов коммутации ступенчато регулирует параметры тока и напряжения солнечной и аккумуляторной батарей, выставляя минимально необходимые значения мощности источника для обеспечения работы электропривода.

Как было отмечено ранее, дождевальная машина работает в условиях постоянного воздействия факторов окружающей среды, которые отрицательно сказываются на ее электрической и механической системах. Следовательно, САБ подвержены аналогичному воздействию. Таким образом, возникает вопрос о техническом обслуживании и ремонте САБ.

## 2.6 Обоснование условий обслуживания солнечных батарей для секции дождевальная машины кругового действия

Погодные условия являются неконтролируемым фактором, негативно влияющим на производительность солнечных батарей. Например, в результате пылевых бурь, ветра происходит их запыление.

Чистку солнечных батарей проводят различными способами: ручным, полуавтоматическим и автоматическим [40, 125]. Обычно эта операция входит в состав технического обслуживания наряду с внешним осмотром, проверкой контактных соединений, мест крепления, измерением рабочих параметров тока и напряжения. При этом, как показывает практика, чистка солнечных батарей является наиболее трудоёмким и часто выполняемым процессом [101].

В литературных источниках отсутствуют данные о периодичности обслуживания солнечных батарей. На солнечных электростанциях чистку выполняют по плановому графику. Уровень запыленности в открытом поле значительно выше, поэтому загрязнение солнечных батарей происходит более интенсивно. При этом уменьшается их производительность, что негативно влияет на энергетическую систему самоходной электрифицированной дождевальной машины.

В общем случае уровень загрязнённости солнечных батарей оценить сложно, поскольку одни СБ используют в поле, другие – на крышах частных домов, третьи – в специальных условиях. Климатические зоны мест установок солнечных батарей в городских условиях и на участках жилого строительства не подвергаются такому воздействию ветра, переносящего пыль на поверхность СБ. В зоне действия дождевальной машины уровень загрязнённости выше.

Для обобщения исследования введём параметр оценки уровня загрязнённости. В этом случае следует ориентироваться на показатель потерь мощности, который отражает отношение мощности загрязнённой СБ к мощности чистой:

$$K_{\text{СБ}} = \frac{P_3}{P_4}, \quad (2.45)$$



где  $K_{СБ}$  – коэффициент снижения мощности солнечной батареи;  $P_з$  и  $P_ч$  – соответственно мощность одной и той же загрязнённой и чистой СБ, Вт.

Для эксплуатации дождевальная машины в автономном режиме необходимо поддерживать уровень заряда аккумуляторных батарей. Для этого солнечная батарея должна вырабатывать количество энергии, достаточное для их заряда.

При запылении солнечной батареи очевидно, что заряд АБ будет занимать больше времени, что сдвигает процесс полива. Возникает проблема сбоя режима полива из-за загрязнения СБ. Учитывая потери от запыления (загрязнения), данную проблему можно решить путем увеличения мощности солнечной батареи или периодическим выполнением ТО.

Проанализируем два варианта:

- 1) увеличение мощности солнечной батареи с учётом запыления;
- 2) выполнение периодического технического обслуживания.

Критерием выбора примем общие эксплуатационные затраты.

Для того, чтобы определить показатели выбора наилучшего способа эксплуатации, рассмотрим технико-экономические показатели обоих вариантов.

В первом варианте мощность, вырабатываемая СБ, состоит из суммы мощности, необходимой для заряда аккумуляторных батарей  $P_{АБ}$ , и запаса мощности вследствие запыления  $P'$ :

$$P_{СБ} = P_{АБ} + P' . \quad (2.46)$$

Затраты на запасную мощность  $Z_1$ :

$$Z_1 = P' C_{ээ} , \quad (2.47)$$

где  $C_{ээ}$  – удельная цена электроэнергии, руб./кВт.

Второй вариант должен учитывать затраты на внеплановое техническое обслуживание  $Z_2$ :

$$Z_2 = C_{ТО} + IC_{оп} , \quad (2.48)$$

где  $C_{\text{ТО}}$  – стоимость разового технического обслуживания, руб.;  $l$  – расстояние до дождевальная машины и обратно, км;  $C_{\text{ор}}$  – стоимость организации выполнения технического обслуживания, руб./км;

$$C_{\text{ТО}} = T_{\text{п}} t, \quad (2.49)$$

где  $T_{\text{п}}$  – трудоемкость выполнения ТО, чел.-ч;  $t$  – средняя часовая тарифная ставка обслуживающего персонала, руб.;

$$C_{\text{ор}} = Z \Pi_{\text{л}}, \quad (2.50)$$

где  $Z$  – расход топлива, л/км,  $Z = 0,08 \dots 0,2$  л/км;  $\Pi_{\text{л}}$  – цена на топливо, руб./л.

Очевидно, что если за срок эксплуатации дождевальной машины затраты на запасную мощность окажутся меньше общих затрат на внеплановое ТО СБ, то экономически целесообразно комплектовать дождевальную машину добавочными СБ. Это условие имеет вид:

$$3_1 < 3_2. \quad (2.51)$$

При соблюдении данного условия следует выбирать СБ увеличенной площади с запасом мощности. В противном случае ( $3_1 > 3_2$ ) принимают выполнение внепланового технического обслуживания.

Для того, чтобы оценить срок эксплуатации солнечной батареи, а также периодичность технического обслуживания, необходимо привести условие (2.51) к единому временному параметру. Подставим в выражение (2.52) выражения (2.45) – (2.50) с учётом временных параметров:

$$\frac{P' \Pi_{\text{ээ}}}{t_{\text{экспл}}} < \frac{C_{\text{ТО}} t_{\text{экспл}}}{t_{\text{п}}} + \frac{2l_{\text{уд}} C_{\text{ор}} t_{\text{экспл}}}{t_{\text{п}}}, \quad (2.52)$$

где  $t_{\text{экспл}}$  – срок эксплуатации, ч;  $t_{\text{п}}$  – периодичность выполнения ТО, ч;  $l_{\text{уд}}$  – удаленность дождевальной машины от пункта ТО, км.

Если представить коэффициент снижения мощности:

$$K_{\text{СБ}} = \frac{P_{\text{СБ}} - P'}{P_{\text{СБ}}}, \quad (2.53)$$

то выражение (2.52) примет вид:

$$\frac{P_{\text{СБ}}(1-K_{\text{ПМ}})\Pi_{\text{ЭЭ}}}{t_{\text{Экспл}}} < \frac{C_{\text{ТО}}t_{\text{Экспл}}}{t_{\text{п}}} + \frac{2l_{\text{уд}}C_{\text{ор}}t_{\text{Экспл}}}{t_{\text{п}}}. \quad (2.54)$$

Количество внеплановых обслуживаний за период эксплуатации:

$$n = \frac{t_{\text{Экспл}}}{t_{\text{п}}}. \quad (2.55)$$

Тогда выражение (2.54) примет вид:

$$2nC_{\text{ор}}l_{\text{уд}} > \frac{P_{\text{СБ}}(1-K_{\text{СБ}})\Pi_{\text{ЭЭ}}}{nt_{\text{п}}} - C_{\text{ТО}}n. \quad (2.56)$$

После преобразования получим:

$$2C_{\text{ор}}l_{\text{уд}} > \frac{P_{\text{СБ}}(1-K_{\text{СБ}})\Pi_{\text{ЭЭ}}}{n^2t_{\text{п}}} - C_{\text{ТО}}. \quad (2.57)$$

Тогда условие (2.57) можно записать как зависимость удалённости дождеваль-  
ной машины от пункта технического обслуживания:

$$l_{\text{уд}} > \frac{P_{\text{СБ}}(1-k_{\text{СБ}})\Pi_{\text{ЭЭ}}}{2C_{\text{ор}}n^2t_{\text{п}}} - \frac{C_{\text{ТО}}}{2C_{\text{ор}}}. \quad (2.58)$$

Как видно из выражения (2.58), условие выполнения внепланового технического обслуживания зависит от удалённости солнечной батареи от пункта ремонта, мощности СБ, потерь мощности при загрязнении СБ, периодичности обслуживания и стоимостных показателей.

Представим данное условие графически (рисунок 2.28).

Границы на рисунке 2.28 позволяют выбрать способ технической эксплуатации ДМ с САБ (послеотказовый или планово-предупредительный). Правая часть от границы указывает на целесообразность послеотказового способа и выбора добавочной мощности СБ, а левая – на выполнение ТО, в том числе для чистки СБ от грязи и пыли. Например, при удалённости дождевальной машины от пункта технического обслуживания и ремонта на 19 км, добавочной мощности СБ  $P' = 0,15$  кВт, стоимости СБ = 50 тыс. руб./кВт, периодичности ТО 100 ч, стоимо-

сти транспортных расходов  $c_{тр} = 8$  руб./ч/км и коэффициенте снижения мощности  $k_{СБ} = 0,75$  находим точку пересечения значений на оси абсцисс и на оси ординат на рисунке 2.28. При стоимости ТО 50 руб./ч (синяя граница на рисунке 2.28) эта точка попадает в область выполнения ТО для чистки. Если же при тех же условиях эксплуатации стоимость ТО 100 руб./ч (красная граница на рисунке 2.28), то эта точка попадает в область комплектования ДМ дополнительной площадью СБ перед началом поливного сезона.

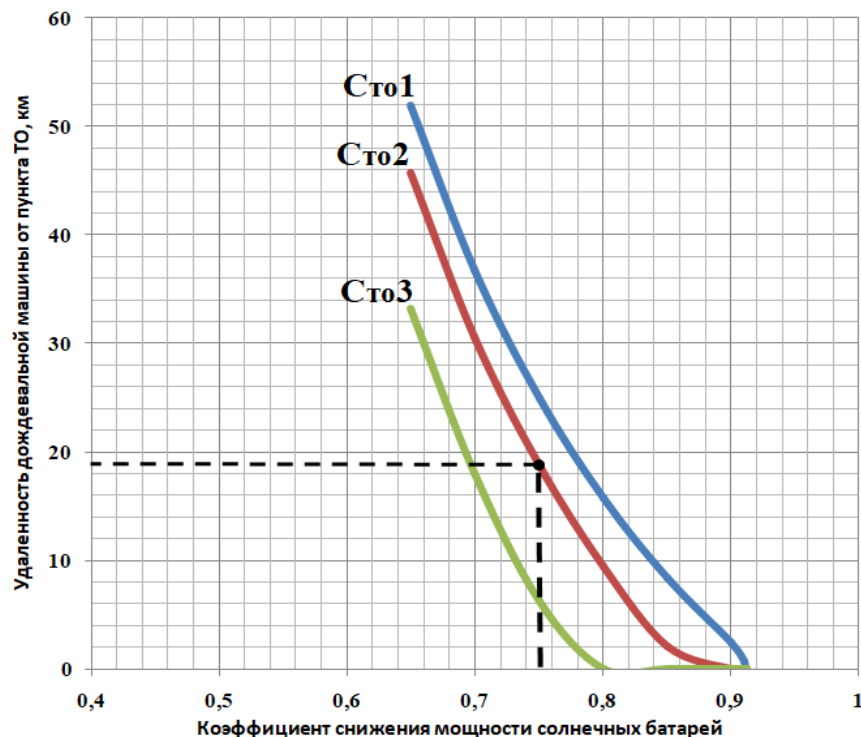


Рисунок 2.28 – Зависимость удаленности ДМ от пункта ТО и коэффициента снижения мощности СБ при загрязнении в процессе эксплуатации при различной стоимости ТО (Сто1, Сто2, Сто3)

На способ эксплуатации существенно влияют стоимость обслуживания и коэффициент потерь мощности от запыления. Оценку стоимости обслуживания выполняют по трудоемкости процесса чистки солнечной батареи. Точно определить стоимость чистки сложно, поскольку два разных работника могут выполнить ее за различное время. Поэтому для оценки этого параметра требуются конкретные данные и продолжительные исследования. Оценить коэффициент потерь возможно в лабораторных условиях.

## 2.7 Выводы по главе

1. Оценена энергетическая эффективность применения автономного электроснабжения дождевальных машин кругового действия с источником на солнечных и аккумуляторных батареях. Установлено, что за счёт применения САБ исключаются потери энергии при передаче, так как аккумуляторная батарея может быть установлена на опорной тележке рядом с электроприводом. В совокупности можно снизить энергопотребление на водораспределение ДМ от 0,20 до 2,01 %.

2. Разработана математическая модель изменения параметров солнечных и аккумуляторных батарей. Установлено, что рабочий цикл электропривода секции дождевальной машины обеспечивается солнечными батареями площадью 4 м<sup>2</sup> с удельной максимальной мощностью 150 Вт/м<sup>2</sup> и аккумуляторной батареей с энергией 5,28 кВт·ч.

3. Определены три варианта коммутации элементов системы электроснабжения и нагрузки: подключение СБ через контроллер к электроприводу секции ДМ, когда время включения ДМ совпадает с началом дневного периода суток в данном географическом месте работы ДМ (дневной полив); подключение, при котором рабочий цикл электропривода ДМ обеспечивается от АБ, а заряд АБ осуществляется при помощи СБ в свободные от полива промежутки времени (ночной полив); параллельное подключение САБ к электроприводу ДМ – СБ частично обеспечивает электроснабжение, а частично – заряд АБ (ночной и дневной поливы).

4. На основании условий согласования запаса энергии СБ и АБ разработаны алгоритм работы и монтажная схема включения контроллера для регулирования параметров тока и напряжения автономного источника дождевальной машины кругового действия.

5. Установлено, что при эксплуатации дождевальной машины кругового действия с автономной системой электроснабжения, удаленной от пункта технического обслуживания более чем 10 км, и с учетом добавочной мощности СБ, периодичности ТО, стоимостных показателей, а также коэффициента снижения мощности солнечных батарей, целесообразно комплектовать ДМ дополнительной площадью СБ.

### **3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АВТОНОМНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА СЕКЦИИ ДОЖДЕВАЛЬНОЙ МАШИНЫ КРУГОВОГО ДЕЙСТВИЯ С СОЛНЕЧНЫМИ И АККУМУЛЯТОРНЫМИ БАТАРЕЯМИ**

#### **3.1. Методика экспериментального исследования**

Целью экспериментальных исследований является проверка результатов теоретических исследований – параметров автономной системы электроснабжения на основе математической модели и вариантов коммутации источника электроснабжения электропривода секции дождевальной машины с солнечными и аккумуляторными батареями.

Экспериментальные исследования включали в себя 2 этапа:

1. Проверка параметров автономного источника электроснабжения в виде совокупности солнечных и аккумуляторных батарей на лабораторном стенде секции дождевальной машины.

2. Проверка параметров источника электроснабжения электропривода секции дождевальной машины, когда СБ и АБ выступают в качестве отдельных и единственных источников.

Режим работы источника электроснабжения в виде совокупности солнечных и аккумуляторных батарей проверяли на макете секции ДМ кафедры «Техносферная безопасность и транспортно-технологические машины» ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет им. Н. И. Вавилова». Макет выполнен в масштабе 1:6 относительно действительных размеров секции дождевальной машины. Он состоит из неподвижной опоры, водопроводящего трубопровода со шпренгельной фермой и подвижной опоры, в нижней части которой расположена платформа для крепления электродвигателя, и колес. На нем также имеется электродвигатель с расчетной мощностью  $P_{\text{дв}} = 0,37$  кВт.

Зная мощность электропривода, необходимо рассчитать параметры солнечных и аккумуляторных батарей. Для установки АБ была разработана платформа прямоугольной формы. Ее расположили на нижней части подвижной опоры. Сол-

нечные батареи размещали в верхней части водопроводящего трубопровода на специальных креплениях. Эксперимент проводили в период эксплуатации дождевальных машин – с мая по август.

Режим работы источника электроснабжения электропривода секции дождевальной машины в случае, когда солнечные батареи выступают в качестве источника электроснабжения аккумуляторных батарей, относится к традиционной схеме включения АБ с СБ на единую нагрузку. Однако в нашем случае в качестве нагрузки выступает электропривод, подведение энергии к которому можно выполнить различными способами. Данный эксперимент позволил обосновать режим совместного использования САБ в качестве источника электроснабжения секции дождевальной машины в полевых условиях.

На втором этапе экспериментальных исследований была использована секция ДМ кругового действия, установленная в УНПК «Агроцентр». Она состоит из неподвижной опоры, водопроводящего трубопровода и подвижной опоры и соответствует размерам и параметрам действующих дождевальных машин.

Для каждого случая необходимо было рассчитать мощность электропривода секции в зависимости от общей рабочей массы конструкции. Далее в зависимости от параметров электропривода определить параметры и количество аккумуляторов, а также мощность солнечных батарей, необходимую для работы секции дождевальной машины.

### **3.2. Разработка лабораторного стенда секции дождевальной машины кругового действия с солнечными и аккумуляторными батареями**

Лабораторный стенд секции дождевальной машины служит для подтверждения теоретических положений полученной математической модели зависимости параметров автономной системы электроснабжения на солнечных и аккумуляторных батареях от продолжительности работы электропривода секции ДМКД.

Для проверки приняты следующие параметры:

- напряжение солнечной батареи  $U_{СБ}$ ;

- ток солнечной батареи  $I_{СБ}$ ;
- напряжение аккумуляторной батареи  $U_{АБ}$ ;
- ток аккумуляторной батареи  $I_{АБ}$ ;
- емкость аккумуляторной батареи  $C_{АБ}$ ;
- коэффициент снижения мощности СБ  $k_{СБ}$ ;
- продолжительность работы электропривода подвижной опоры  $t$ .

Измерения данных параметров производили с помощью сертифицированных приборов: вольтметра, амперметра, секундомера, измерителя емкости АБ.

Лабораторный стенд разработан на базе макета секции дождевальнoй машины кафедры «Техническая безопасность и транспортно-технологические машины» с установленным значением мощности электропривода  $P_{дв} = 0,37$  кВт. Он идентичен секции дождевальнoй машины, эксплуатируемой в полевых условиях, и выполнен в масштабе 1:6. Стенд состоит из водопроводящего трубопровода со шпренгельной фермой, А-образной подвижной опоры с колесами, приводимой в движение электродвигателем, а также неподвижной опоры, на которой закреплен щит управления секцией.

Электроснабжение электропривода осуществляется от сети трехфазного переменного тока. Для применения солнечных и аккумуляторных батарей необходим преобразователь постоянного тока в переменный. Для этого был использован инвертор марки ТITАНТР-300L6. Для подключения аккумуляторной батареи к двигателю с целью преобразования трехфазной обмотки двигателя в однофазную к одной из фаз двигателя присоединили конденсатор емкостью 80 мФ.

Была разработана электрическая схема лабораторного стенда секции дождевальнoй машины, на основе которой собрана электрическая цепь лабораторного стенда (рисунок 3.1).

В качестве испытуемой была принята солнечная батарея с монокристаллическим солнечным элементом фирмы SilaSolar с заявленными параметрами  $P_{max} - 150$  W,  $V_{mp} - 18,2$  V,  $I_{mp} - 8,25$  A). В эксперименте также были задействованы измерительный прибор Multimeter GDM 354A с заявленной относительной погрешностью измеряемого предела  $\beta = 2,5$  %; 2 аккумулятора фирмы Delta серии GEL ( $V - 12$  В;  $Q - 55$  А·ч), соединенные последовательно; контроллер заряда SRNEMC2420N10 20A, инвертор ТITАНТР-300L6, а также двигатель SEWWA30 DT71D4.



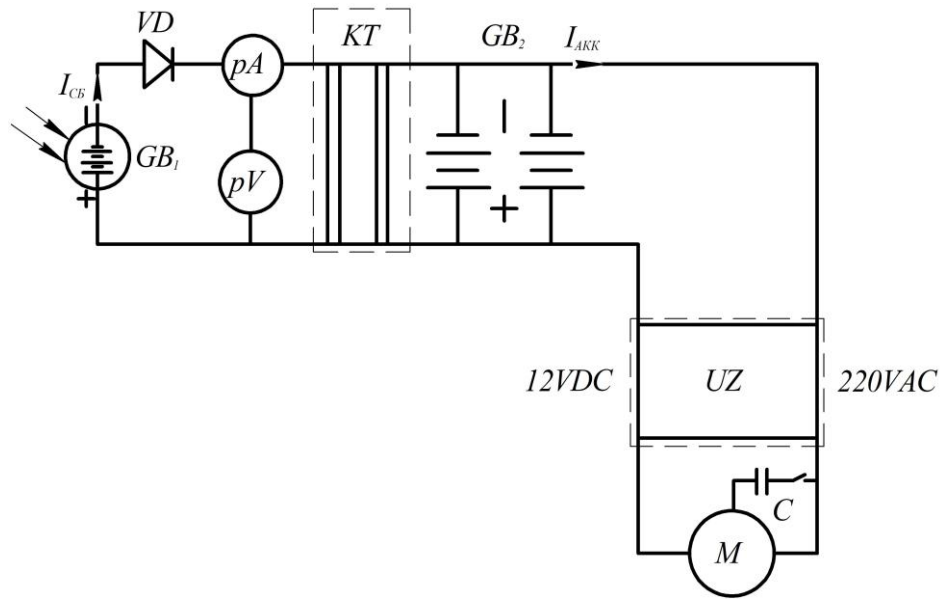


Рисунок 3.1 – Электрическая схема лабораторного стенда секции дождевальная машины:  $GB_1$  – солнечная батарея;  $VD$  – выпрямительный диод;  $pA$  – амперметр;  $pV$  – вольтметр;  $KT$  – контроллер заряда АБ;  $GB_2$  – аккумуляторная батарея;  $UZ$  – инверторный преобразователь;  $C$  – конденсатор;  $M$  – двигатель

Для сборки стенда использованы основные элементы, представленные в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Основные элементы лабораторного стенда секции дождевальная машины

Элемент и его параметры	Значение
Водопроводящий трубопровод	
диаметр, мм	63
длина, м	6
Габаритные размеры неподвижной опоры, мм	6000×1890×2010
Электродвигатель	
мощность, кВт	0,37
напряжение, В	220/380
ток, А	2,15/1,24
габаритные размеры, мм	600×150×130
Солнечная батарея SilaSolar	
максимальная мощность, Вт	150
напряжение, В	18,2
ток, А	8,25
площадь, м <sup>2</sup>	1
количество, шт.	2
Аккумуляторы Delta Gel	
напряжение, В	12
емкость, А·ч	55
Контроллер заряда SRNEMC2420N10	
ток, А	20А
габаритные размеры, мм	250×200×45
Габаритные размеры инвертора TITANTP-300L6, мм	73×120×730

Внешний вид лабораторной установки представлен на рисунках 3.2 и 3.3.



Рисунок 3.2 – Лабораторный стенд секции дождевальной машины кругового действия (вид сверху)



Рисунок 3.3 – Лабораторный стенд секции дождевальной машины кругового действия (вид сбоку)

Рассмотрим варианты коммутации источника с САБ и электропривода секции дождевальной машины в полевых условиях.

### 3.3. Проверка параметров автономной системы электроснабжения секции дождевальная машины кругового действия в полевых условиях

В полевых условиях эксперимент был проведён на секции дождевальная машины кругового действия, расположенной на базе УНПК «Агроцентр» (г. Саратов).

Проверяли следующие параметры:

- напряжение солнечной батареи  $U_{СБ}$ ;
- ток солнечной батареи  $I_{СБ}$ ;
- напряжение аккумуляторной батареи  $U_{АБ}$ ;
- ток аккумуляторной батареи  $I_{АБ}$ ;
- емкость аккумуляторной батареи  $C_{АБ}$ ;
- коэффициент снижения мощности СБ  $k_{СБ}$ ;
- время работы электропривода подвижной опоры  $t$ .

Проверку параметров осуществляли вольтметром, амперметром, прибором измерения емкости.

Внешний вид экспериментальной установки представлен на рисунке 3.4.



Рисунок 3.4 – Общий вид лабораторного стенда для испытаний источника питания в виде САБ: 1 – солнечные батареи; 2 – аккумуляторы Delta GEL 12-55; 3 – вентильно-индукторный электродвигатель (мотор-редуктор); 4 – измеритель емкости заряда АКБ; 5 – мультиметр 1; 6 – мультиметр 2

Для установки САБ и проведения измерений была разработана схема электроснабжения секции дождевальная машины.

В электрической схеме цепи с измерительными приборами (рисунок 3.5) использованы аккумуляторные батареи Bat с ЭДС 12 В и эквивалентным внутренним сопротивлением батареи  $r1$ , а также солнечные батареи SC с эквивалентным внутренним сопротивлением  $r2$ . В качестве эквивалентного сопротивления  $R2, R5$  использованы устройства управления и защиты, эквивалентного сопротивления  $R1, R4$  – проводники. Имеются также электропривод  $M1$  и ключи  $S1, S2$ .

Путем последовательного или параллельного присоединения аккумуляторов изменяли напряжение питания и емкость батареи.

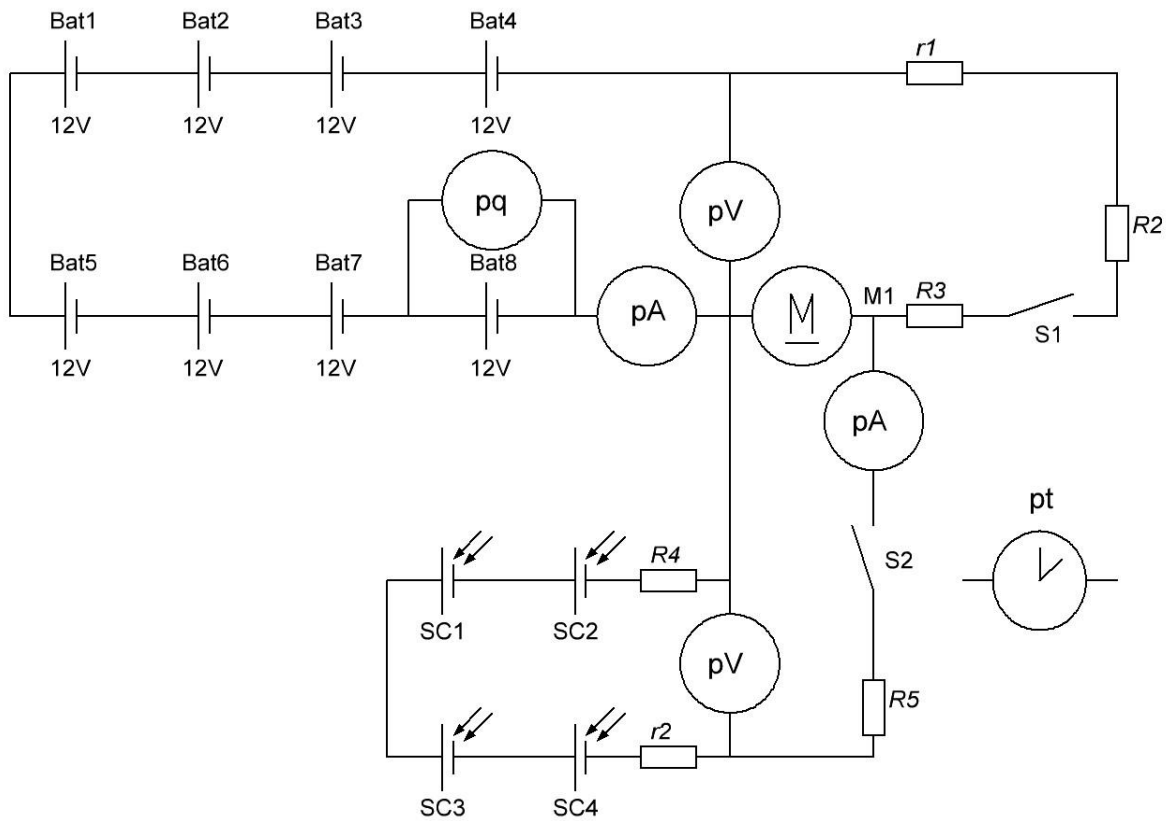


Рисунок 3.5 – Электрическая схема цепи с измерительными приборами (ЭДС источника 48 В, емкость 110А·ч, максимальная пиковая мощность СБ 600 Вт, соединение СБ – последовательно-параллельное): pt – электронный автономный секундомер; pA – амперметр постоянного тока; pV – вольтметр постоянного тока; pq – измеритель емкости заряда батареи; S1, S2 – кнопки «пуск-стоп»

Основные элементы секции приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Основные элементы секции дождевальная машины

Элемент и его параметры	Значение
Длина водопроводящего трубопровода, м	60
Подвижная опора, м	
высота	5
ширина	2
Неподвижная опора, м	
длина	3
ширина	2
высота	5
Вентильно-индукторный электродвигатель VM1418ZXF	
напряжение, В	48
ток, А	7,29
габаритные размеры, мм	118×110×102
Солнечная батарея SilaSolar	
количество, шт.	4
напряжение 1 ед., В	18,2
ток 1 ед., А	8,25
максимальная мощность 1 ед., Вт	150
Аккумуляторы Delta Gel	
количество, шт.	8
напряжение 1 ед., В	12
емкость 1 ед., А·ч	55
Контроллер заряда SRNEMC2420N10	
количество, шт.	1
ток, А	20
габаритные размеры, мм	150×105×68

В качестве испытуемой была принята солнечная батарея с монокристаллическими солнечными элементами фирмы SilaSolar, заявленными параметрами  $P_{\max} - 150$  W,  $V_{\text{mp}} - 18,2$  V,  $I_{\text{mp}} - 8,25$  A. В эксперименте использованы измерительные приборы MultimeterGDM 354A с заявленной относительной погрешностью измеряемого предела  $\beta = 2,5$  % и MAS830L с заявленной относительной погрешностью  $\beta = 0,8$  % + 2; токоизмерительные клещи UNI-Tut201 с погрешностью измерений 0,8 % + 1; 8 аккумуляторов Delta серии GEL ( $V - 12$  В;  $Q - 55$  А·ч), соединенные смешанно; контроллер заряда SRNEMC2420N10 20 А; двигатель VM1418ZXF ( $V - 48$  В;  $I - 7,29$  А).

Для того, чтобы оценить расхождение теоретических и экспериментальных данных, измерили параметры электроснабжения секции дождевальная машины с отдельным применением солнечных и аккумуляторных батарей. Для этого установили элементы электроснабжения секции в соответствии с предложенной схемой (см. рисунок 3.5).

Результаты измерений представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Параметры автономной системы электроснабжения и продолжительность работы электропривода секции ДМ от солнечных батарей в условиях эксплуатации УНПК «Агроцентр» (средние значения)

Дата	$U_{СБ}$ , В	$I_{СБ}$ , А	$P_{двф}$ , кВт	$t_э, ч$		$t_p, ч$	
				600 Вт	750 Вт	600 Вт	750 Вт
07.05	49,2	14,2	0,35	9,0	9,8	8,45	9,6
17.05	49,6	14,3	0,37	9,1	9,83	8,57	9
07.06	49,8	16,5	0,38	9,4	10,1	8,6	9,1
18.06	49,2	16,3	0,36	9,6	10,0	8,4	9,3
10.07	49,4	16,2	0,36	8,25	9,61	7,8	8,48
15.07	50,2	15,5	0,37	8,41	9,4	7,78	8,4
05.08	49,6	13,4	0,35	8,64	9,0	7,43	8,32
17.08	49,5	13,2	0,35	8,6	9,02	7,38	8,3

$U_{СБ}$  – напряжение на зажимах СБ при подключенной нагрузке;  $I_{СБ}$  – ток в цепи подключенной нагрузки к СБ;  $P_{двф}$  – фактическая мощность нагрузки;  $t_э$ ,  $t_p$  – экспериментальные и расчетные значения продолжительности работы электропривода секции ДМ

Расчетные значения продолжительности работы электропривода определены с учетом коэффициента  $k_\gamma$ , который рассчитали в соответствии с вектором Пойнтинга.

Проверка параметров только аккумуляторных батарей проведена с учетом влияния числа пусков  $w$ . Параметры автономной системы электроснабжения и продолжительность работы электропривода секции ДМ от аккумуляторных приведены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Параметры автономной системы электроснабжения и продолжительность работы электропривода секции ДМ с количеством пусков  $w = 100$  от аккумуляторных батарей в условиях эксплуатации УНПК «Агроцентр» (средние значения)

Дата	$U_{АБ}$ , В	$I_{АБ}$ , А	$C_{нф}$ , А·ч	$W_{АБ} = 5,3$ кВт·ч		$C_{нф}$ , А·ч	$W_{АБ} = 3,2$ кВт·ч	
				$t_э, ч$	$t_p, ч$		$t_э, ч$	$t_p, ч$
08.05	48,1	10,9	110,0	7,3	7,9	65,0	4,6	5,2
18.05	48,7	11,0	109,9	7,35	7,92	64,9	4,62	5,4
08.06	48,9	10,9	109,9	7,37	7,94	64,9	4,65	5,42
19.06	48,9	10,9	109,9	7,38	7,96	64,9	4,68	5,46
11.07	49,0	11,0	110,0	7,4	8,0	65,0	4,7	5,5
16.07	49,1	10,9	109,9	7,4	8,0	64,9	4,7	5,5
06.08	49,2	10,9	109,9	7,42	8,2	64,9	4,9	5,7
18.08	49,5	11,0	110,0	7,42	8,2	65,0	4,9	5,72

$U_{АБ}$  – напряжение на выводах аккумуляторной батареи;  $I_{АБ}$  – ток в цепи АБ;  $C_{нф}$  – фактическая емкость АБ в начальный момент работы;  $P_{двф}$  – фактическая мощность нагрузки;  $t_э$ ,  $t_p$  – экспериментальные и расчетные значения продолжительности работы электропривода секции ДМ

В расчетных значениях  $t_p$  учтено, что энергия пуска с мая по август уменьшается, так как принято условие, что коэффициент взаимодействия колес с поверхностью почвы по ходу полива также уменьшался.

### 3.4 Обработка результатов эксперимента и сравнение теоретических и экспериментальных данных

Продолжительность работы лабораторного стенда секции дождевальной машины рассчитали по формуле:

$$t = \frac{W_{СБ} + W_{АБ}}{P_{12}(2 + G)}, \quad (3.1)$$

где  $W_{СБ}$  – энергия СБ, Вт·ч;  $W_{АБ}$  – энергия СБ, Вт·ч;  $P_{12}$  – мощность электродвигателя, Вт;  $G$  – отношение эквивалентной проводимости  $g_{эКВ}$  к проводимости в цепях СБ и АБ.

Она составила 113 мин, или 1 ч 53 мин.

Определены следующие параметры электроснабжения лабораторного стенда секции ДМ:

- напряжение на выводах АБ –  $U_{АБ} = 24$  В;
- ток в цепи АБ –  $I_{АБ} = 5,5$  А;
- емкость АБ –  $C_{АБ} = 55$  А·ч;
- напряжение на выводах СБ –  $U_{СБ} = 18,2$  В;
- ток в цепи СБ –  $I_{СБ} = 8,25$  А;
- мощность нагрузки –  $P_{дв} = 0,37$  кВт.

Для оценки расхождения теоретических и экспериментальных данных продолжительности движения лабораторного стенда секции дождевальной машины измерили параметры режима электроснабжения лабораторного стенда дождевальной машины от САБ в полевых условиях (рисунок 3.6).

Результаты представлены в таблице 3.5.



Рисунок 3.6 – Лабораторный стенд секции дождевальнoй машины в условиях УНПО «Поволжье» (с. Степное Энгельсского р-на Саратовской обл.)

Таблица 3.5 – Параметры солнечной и аккумуляторной батарей (лабораторные условия на базе УК № 2 ФГБОУ ВО «Саратовский ГАУ им. Н. И. Вавилова»)

Дата	$U_{AB}, В$	$I_{AB}, А$	$S_{AB}, А \cdot ч$	$I_{CB}, А$	$U_{CB}, В$	$P_{дв}, кВт$	$t_3, мин$
5.05	24	5,5	55	8,25	18,2	0,37	108
12.05	24	5,5	55	7,15	17,5	0,37	106
19.05	24	5,5	55	7,93	18	0,37	107
23.05	24	5,5	55	8,25	18,2	0,37	107
25.05	24	5,5	55	5,45	16,1	0,37	103
28.05	24	5,5	55	4,16	15,9	0,37	99
02.06	24	5,5	55	7,93	18	0,37	108
08.06	24	5,5	55	7,59	17,9	0,37	108
12.06	24	5,5	55	8,25	18,2	0,37	107
19.06	24	5,5	55	8,25	18,2	0,37	107
23.06	24	5,5	55	8,25	18,2	0,37	108
27.06	24	5,5	55	8,1	18,1	0,37	107
02.07	24	5,5	55	7,92	18	0,37	107
08.07	24	5,5	55	8,05	18,1	0,37	107
11.07	24	5,5	55	8,25	18,2	0,37	108
20.07	24	5,5	55	8,25	18,2	0,37	108
23.07	24	5,5	55	8,25	18,2	0,37	108
28.07	24	5,5	55	8,25	18,2	0,37	108
01.08	24	5,5	55	7,54	17,89	0,37	107
09.08	24	5,5	55	6.1	17,5	0,37	104
15.08	24	5,5	55	4,55	16,9	0,37	103
22.08	24	5,5	55	8,25	18,2	0,37	107
25.08	24	5,5	55	8,25	18,2	0,37	109
29.08	24	5,5	55	7,72	17,89	0,37	108



Средние значения продолжительности движения станда секции ДМ определили по формуле:

$$\bar{t} = \frac{\sum t}{n}, \quad (3.2)$$

где  $n$  – количество опытов.

В мае средняя продолжительность движения станда секции ДМ составила 105,0 мин, в июне – 107,5; в июле – 107,6; в августе – 106,3 мин.

Для оценки отклонения продолжительности движения от его среднего значения рассчитали дисперсию и среднеквадратичное отклонение.

Дисперсию  $\sigma^2$  определили по формуле:

$$\sigma^2 = \frac{\sum (t_i - \bar{t})^2}{n-1}. \quad (3.3)$$

Среднеквадратичное отклонение  $\sigma_s$  продолжительности движения станда секции:

$$\sigma_s = \sqrt{\sigma^2}. \quad (3.4)$$

Оценка продолжительности движения станда секции дождевальнoй машины, полученной на основе результатов эксперимента, допускается при учете средней квадратичной ошибки  $\sigma_{cp}$ :

$$\sigma_{cp} = \sqrt{\frac{\sum (t_i - \bar{t})^2}{n(n-1)}}. \quad (3.5)$$

На основе математической статистики определили достоверность полученных результатов продолжительности движения лабораторного станда секции дождевальнoй машины с вероятностью 95 %. Для этого воспользовались методом Стьюдента [39, 63]. Исходя из количества опытов и вероятности появления того же значения коэффициента мощности при тех же условиях, коэффициент Стьюдента  $\alpha = 2,57$ .

Тогда доверительный интервал  $\Delta t_{дов}$ :

$$\Delta t_{дов} = \pm \alpha \sigma_{cp}. \quad (3.6)$$

Изменение всей совокупности результатов экспериментального исследования изменения продолжительности движения лабораторного стенда секции ДМ:

$$t = \bar{t} \pm \alpha \sigma. \quad (3.7)$$

Результаты расчетов представлены в таблице 3.6

Таблица 3.6 – Результаты расчета продолжительности движения стенда секции дождевальной машины (лабораторные условия на базе УК № 2 ФГБОУ ВО «Саратовский ГАУ им. Н. И. Вавилова»)

Показатель	Обозначение	Месяц			
		май	июнь	июль	август
Средняя продолжительность движения стенда, мин	$\bar{t}$	105,0	107,5	107,6	106,3
Дисперсия, мин	$\sigma^2$	7,6	0,3	0,26	5,46
Среднеквадратичное отклонение	$\sigma_{\sigma}$	2,75	0,54	0,5	2,33
Среднеквадратичная ошибка	$\sigma_{\text{ср}}$	0,458	0,09	0,083	0,388
Доверительный интервал, мин	$\Delta t_{\text{дов}}$	105±1,11	107,5±0,231	107,6±0,213	106,3±0,997

$P = 0,95$ .

Сведем результаты теоретических и экспериментальных исследований режима электроснабжения электропривода секции дождевальной машины при совместном использовании солнечных и аккумуляторных батарей в таблицу 3.7.

Таблица 3.7 – Результаты теоретических и экспериментальных исследований продолжительности движения лабораторного стенда секции дождевальной машины

Экспериментальный расчет				Теоретический расчет
май	июнь	июль	август	
105±1,11 мин (1 ч 45 мин)	107,5±0,231 мин (1 ч 47,5 мин)	107,6±0,213 мин (1 ч 47,6 мин)	106,3±0,997 мин (1 ч 46,3 мин)	1 ч 53 мин

Представим данные таблицы 3.7 в графическом виде (рисунок 3.7).

Из графического представления видно, что значение теоретического расчета выше значений, полученных экспериментальным путём. Отклонения экспериментальных данных от теоретических представлены в таблице 3.8.

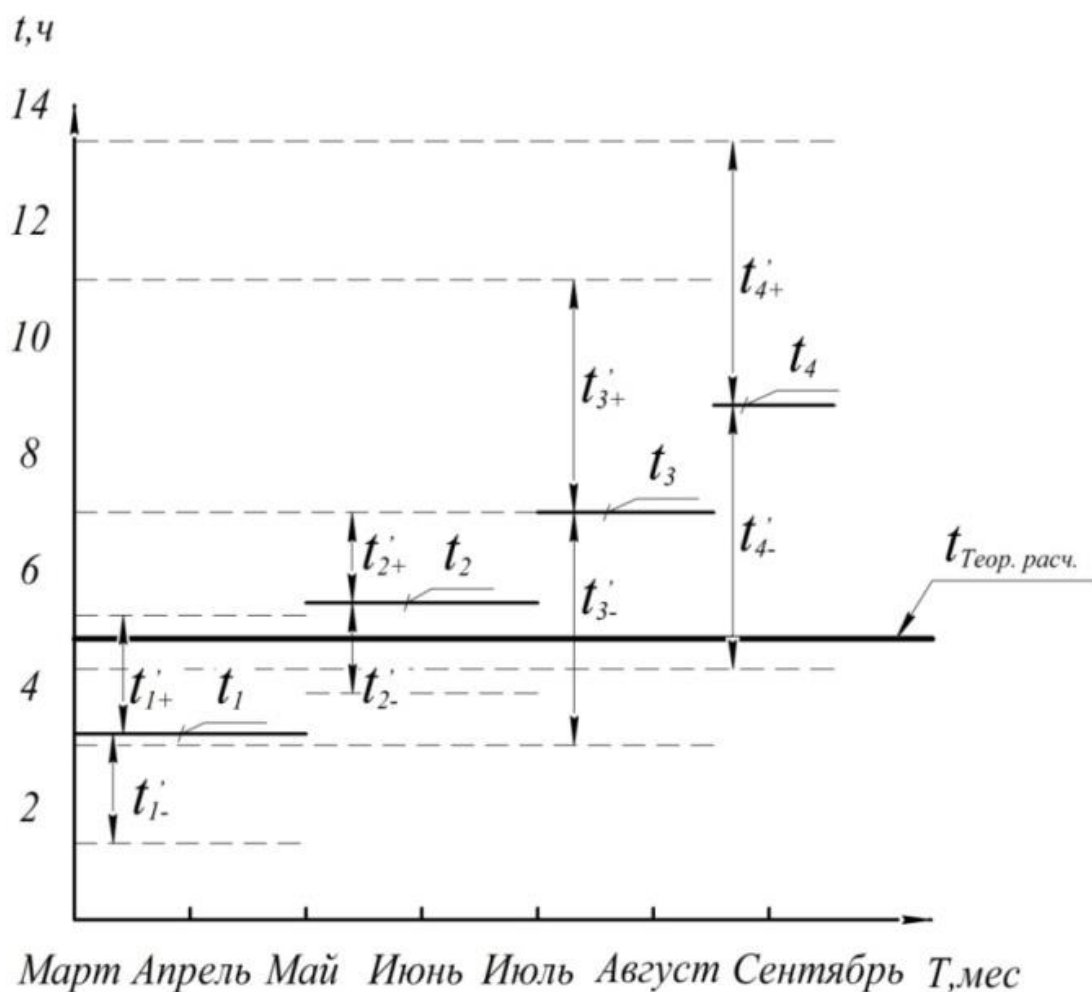


Рисунок 3.7 – Сопоставление теоретических и экспериментальных данных продолжительности движения лабораторного стенда секции ДМ на базе УК № 2 ФГБОУ ВО «Саратовский ГАУ им. Н. И. Вавилова»

Таблица 3.8 – Отклонение экспериментальных данных от теоретических, %

Май	Июнь	Июль	Август
6,2	4,7	4,6	5,2

Согласно математическим моделям, при использовании солнечной батареи максимальной мощностью 600 Вт теоретическая продолжительность работы электропривода секции ДМ с электродвигателем мощностью 500 Вт составила в июне 2020 г. 8,6 ч (синяя гистограмма рисунка 3.8, а), а фактическая (экспериментальная) при тех же данных СБ – 9,5 ч (красная гистограмма рисунка 3.8, а).

Среднее отклонение теоретических и экспериментальных данных производственной проверки зависимости параметров солнечных батарей от средней продолжительности работы электропривода секции ДМ не превысило 7,7 %.

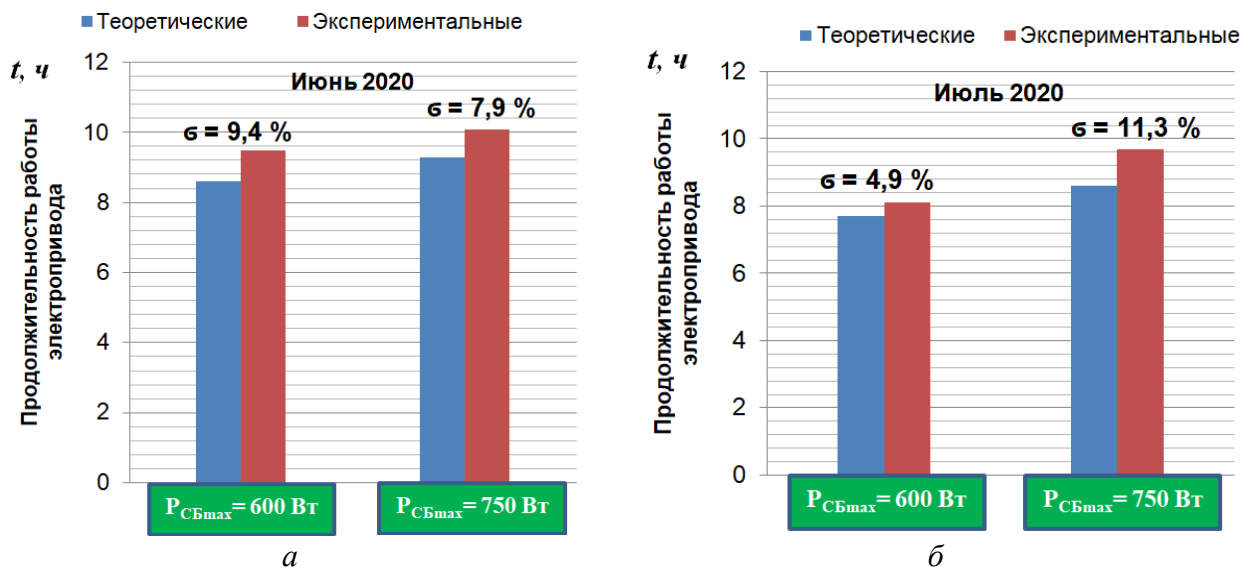


Рисунок 3.8 – Сравнение теоретических и экспериментальных данных параметров СБ:  
 а – июнь 2020 г.; б – июль 2020 г.

Проверка параметров только аккумуляторных батарей проведена с учетом влияния количества пусков  $w$ . Результаты представлены в таблице 3.9.

Таблица 3.9 – Параметры автономной системы электроснабжения от аккумуляторных батарей и продолжительность работы электропривода секции ДМ с количеством пусков  $w = 100$  в условиях эксплуатации УНПК «Агроцентр» (средние значения)

Дата	$U_{AB}, В$	$I_{AB}, А$	$C_{нф}, А \cdot ч$	$W_{AB} = 5,3 \text{ кВт} \cdot ч$		$W_{AB} = 3,2 \text{ кВт} \cdot ч$	
				$t_э, ч$	$t_p, ч$	$t_э, ч$	$t_p, ч$
08.05	48,1	10,9	110,0	7,3	7,9	4,6	5,2
18.05	48,7	11,0	109,9	7,35	7,92	4,62	5,4
08.06	48,9	10,9	109,9	7,37	7,94	4,65	5,42
19.06	48,9	10,9	109,9	7,38	7,96	4,68	5,46
11.07	49,0	11,0	110,0	7,4	8,0	4,7	5,5
16.07	49,1	10,9	109,9	7,4	8,0	4,7	5,5
06.08	49,2	10,9	109,9	7,42	8,2	4,9	5,7
18.08	49,5	11,0	110,0	7,42	8,2	4,9	5,72

$U_{AB}$  – напряжение на выводах аккумуляторной батареи;  $I_{AB}$  – ток в цепи АБ;  $C_{нф}$  – фактическая емкость АБ в начальный момент работы;  $P_{двф}$  – фактическая мощность нагрузки;  $t_э$ ,  $t_p$  – экспериментальные и расчетные значения продолжительности работы электропривода секции ДМ

Согласно математической модели, при использовании АБ с номинальной емкостью 110 А·ч и напряжением 48 В при числе пусков  $w = 100$  теоретическая продолжительность работы электропривода секции ДМ с электродвигателем мощностью

500 Вт составила 7,9 ч (желтая гистограмма рисунка 3.9, б), а фактическая (экспериментальная) при тех же данных – 7,3 ч (зеленая гистограмма рисунка 3.9, б).

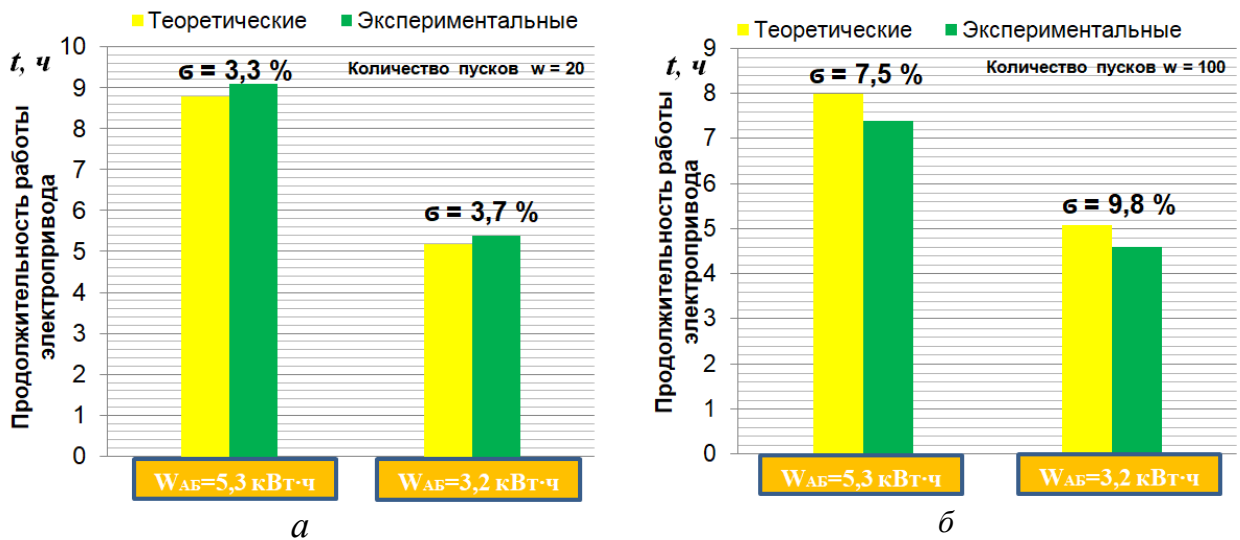


Рисунок 3.9 – Сравнение теоретических и экспериментальных данных параметров АКБ разной емкости (110 и 65 А·ч) в зависимости от количества пусков электропривода: а – 20 пусков; б – 100 пусков

Среднее отклонение теоретических и экспериментальных данных производственной проверки зависимости параметров аккумуляторных батарей от средней продолжительности работы электропривода секции ДМ не превысило 5,6 %.

### 3.5. Выводы по главе

1. Разработан лабораторный стенд секции дождевальная машины с электропитанием от солнечных и аккумуляторной батареи. Установлено, что отклонение экспериментальных данных от результатов теоретических исследований составляет от 4,6 до 6,2 %.

2. Разработан экспериментальный образец секции дождевальная машины кругового действия с электроснабжением от солнечных и аккумуляторных батарей. Проведены экспериментальные исследования параметров автономной системы электропитания ДМ, в ходе которых установлено, что среднее отклонение теоретических и экспериментальных данных производственной проверки зависимости параметров солнечных батарей от средней продолжительности работы электропривода секции ДМ составляет не более 7,7 %, а аккумуляторных батарей – не более 5,6 %.

## **4. ОБОСНОВАНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЕДЛОЖЕННЫХ РЕШЕНИЙ**

### **4.1. Методика расчета технико-экономической эффективности предложенных решений**

Для оценки экономической эффективности предложенных решений сравнили затраты на создание и эксплуатацию источника автономной системы электропитания дождевальная машины с солнечными и аккумуляторными батареями с такими же издержками ДМ, укомплектованной дизельной электростанцией.

Затраты на создание источника с САБ складываются из стоимости аккумуляторов, солнечных батарей, контроллера заряда АБ, комплекта креплений, комплекта кабельных соединений, вентильного электропривода, запасных частей, а также стоимости монтажных работ.

Эксплуатационные затраты включают в себя стоимость проведения работ по техническому обслуживанию и ремонту САБ: внешний осмотр батареи, очистка элементов системы, проверка креплений, кабельных соединений, значений параметров аккумуляторов и солнечных батарей, а также замена износившихся элементов.

Экономический эффект от внедрения САБ оценивается экономией ресурса, а именно – электрической энергии, потребляемой из сети, по сравнению с затратами на топливо для дизельной электростанции или с затратами на устройство трансформаторной подстанции с прокладкой кабеля.

Наряду с экономической эффективностью от внедрения данного способа существуют и другие ее виды, которые заключаются в следующем:

1. Развитие альтернативной энергетики предполагает увеличение КПД солнечных батарей. При этом сокращается площадь батарей, что обеспечивает компактность установки и удобство обслуживания.

2. Использование ресурса солнечной энергии и аккумуляторных источников электропитания для нужд предприятия вне сезона полива.

Для обоснования экономических показателей принята дождевальная машина, состоящая из 6 секций ( $n = 6$ ). Как было отмечено ранее, продолжительность движе-

ния секций различна, что влияет на мощность двигателя, количество аккумуляторов и площадь солнечных батарей секции. Условно обозначим секции дождевальной машины порядковыми номерами, начиная от неподвижной опоры, – 1, 2, 3, 4, 5, 6. Тогда на секциях с порядковыми номерами 4, 5, 6 будут расположены 8 аккумуляторов и солнечные батареи площадью  $4 \text{ м}^2$  (рисунок 4.1), а на секциях с порядковыми номерами 1, 2, 3 – 4 аккумулятора и солнечные батареи площадью  $2 \text{ м}^2$  (рисунок 4.2).

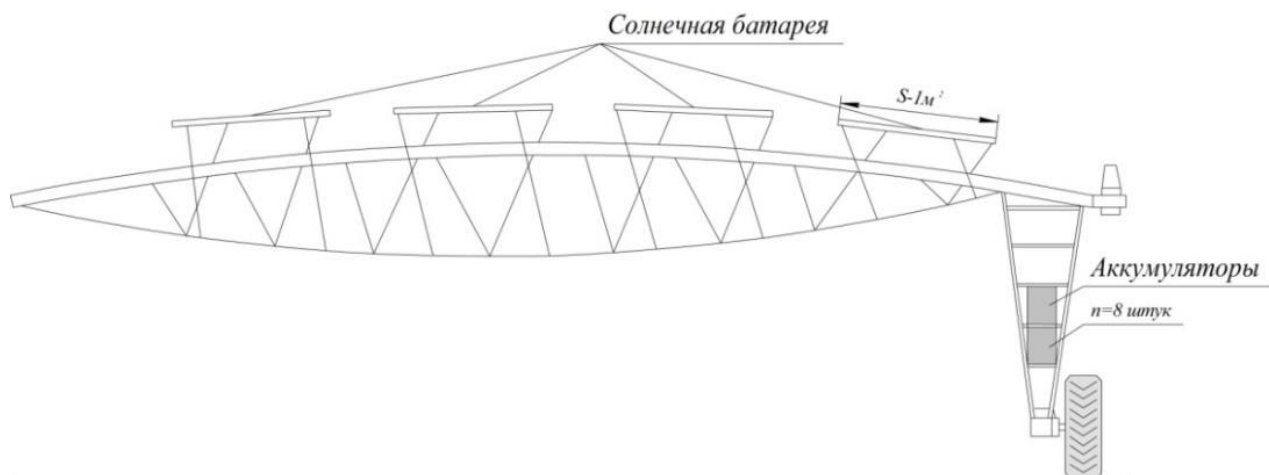


Рисунок 4.1 – Внешний вид секции дождевальной машины с использованием САБ ( $n_{\text{АБ}} = 8$ ,  $S_{\text{СБ}} = 4 \text{ м}^2$ )

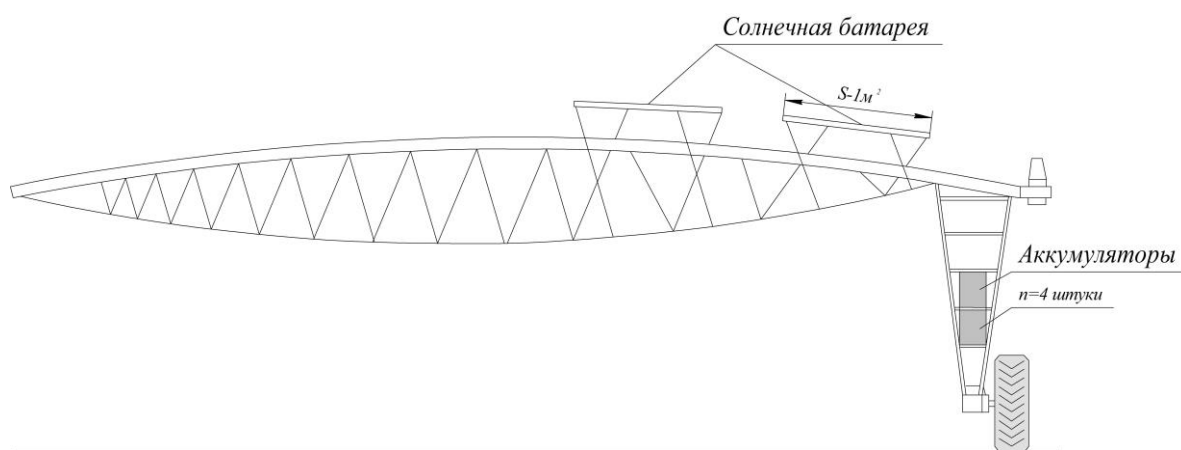


Рисунок 4.2 – Рисунок 4.1 – Внешний вид секции дождевальной машины с использованием САБ ( $n_{\text{АБ}} = 4$ ,  $S_{\text{СБ}} = 2 \text{ м}^2$ )

При расчете экономического эффекта использовали данные, представленные в таблице 4.1.

Проанализировав исходные данные, определили затраты на создание источника электроснабжения с использованием САБ и его эксплуатацию, а также рассчитали экономический эффект от внедрения.

Таблица 4.1 – Исходные данные для оценки экономической эффективности

Элемент	Единица измерения	Количество
Вентильный электропривод	шт.	6
Солнечная батарея	м <sup>2</sup>	18
Аккумулятор	шт.	36
Контроллер заряда	шт.	6
Система креплений	комплект	6
Система соединений	комплект	6
Защитное оборудование	комплект	6
Запасные части	комплект	6

#### 4.2. Расчет капиталовложений в автономную систему электроснабжения с солнечными и аккумуляторными батареями

Затраты  $Z_c$  на создание автономной системы электроснабжения с САБ рассчитали по формуле:

$$Z_c = C_{вэп} + C_{аб} + C_{кз} + Z_{доп} + Z_T, \quad (4.1)$$

где  $C_{вэп}$  – средняя рыночная стоимость вентильного электропривода, руб.;  $C_{аб}$ ,  $C_{сб}$  – средняя рыночная стоимость аккумуляторного источника электроснабжения и солнечной батареи, руб.;  $C_{кз}$  – средняя рыночная стоимость контроллера заряда, руб.;  $Z_{доп}$  – дополнительные затраты на системы креплений, соединений, защитное оборудование и запасные части, руб.;  $Z_T$  – стоимость монтажных работ, руб.

Рассмотрим затраты на создание каждого элемента.

Средняя рыночная стоимость вентильных электроприводов:

$$C_{вэп} = c_{вэп} n_{вэп}, \quad (4.2)$$

где  $c_{вэп}$  – средняя рыночная стоимость одного вентильного электропривода, руб.;  $n_{вэп}$  – количество вентильных электроприводов,  $n_{вэп} = 6$  шт.

Стоимость вентильного электропривода зависит от его марки и мощности. Проанализировав рынок, сравним стоимости существующих вентильных электроприводов (таблица 4.2).



Таблица 4.2 – Рыночная стоимость вентиляльных электроприводов

Марка	$P_{\max}$ , Вт	$U$ , В	$I$ , А	Масса, кг	Средняя стоимость, руб.
BM1418ZXF	350	48	7,29	4,6	7100
MY1020	450	48	9,37	5,5	4500
BM1418HQP	500	48	8	8,5	4700
BM1418W	350	48	7,29	5	4100

В качестве расчетного примем вентиляльный электропривод BM1418ZXF мощностью 350Вт. Тогда:

$$C_{\text{вэл}} = 7100 \cdot 6 = 42600 \text{ руб.}$$

Рыночная стоимость аккумуляторов зависит от их марки, серии, а также напряжения и емкости:

$$C_{\text{аб}} = c_{\text{аб}} n_{\text{аб}}, \quad (4.3)$$

где  $c_{\text{аб}}$  – средняя рыночная стоимость одного аккумулятора, руб.;  $n_{\text{аб}}$  – количество аккумуляторов,  $n_{\text{аб}} = 36$ .

Рассмотрим аккумуляторы, удовлетворяющие требованиям параметров двигателя постоянного тока по напряжению и току (таблица 4.3).

Таблица 4.3 – Рыночная стоимость аккумуляторов

Марка	$Q$ , А·ч	$U$ , В	$I$ , А (20-часовой разряд)	Масса, кг	Средняя стоимость, руб.
Delta Gel 12-55	55	12	3,74	22,7	9840
SunStone Power MLG 12-75	75	12	3,75	23	11700
Deka Marine RV 8G24Dominator GEL 77	77	12	3,85	25	21500
Marine Deep Cycle GEL 75Ah 12V	75	12	3,75	23,5	13533

Для расчета примем аккумуляторы Delta Gel 12-55, удовлетворяющие требованиям электродвигателя, принятого в эксперименте. Тогда:

$$C_{\text{аб}} = 11500 \cdot 36 = 354000 \text{ руб.}$$

Стоимость солнечных батарей можно рассчитать по формуле:

$$C_{\text{сб}} = c_{\text{сб}} S_{\text{сб}}, \quad (4.4)$$

где  $c_{сб}$  – средняя рыночная стоимость солнечной батареи, руб.;  $S_{сб}$  – площадь солнечных батарей,  $S_{сб} = 18 \text{ м}^2$ .

Проанализировав рынок, сведем стоимости солнечных батарей в таблицу 4.4.

Таблица 4.4 – Рыночная стоимость солнечных батарей

Марка	$P_{\max}$ , Вт	$U$ , В	$I$ , А	Габаритные размеры, мм	Средняя стоимость, руб.
SDM-150	150	18,25	8,25	1480×676×35	6500
SIM150	150	18,1	8,29	1485×668×30	5773
ФСМ-180М	180	19,1	9,42	1482×674×35	8750
HVL-130/P	240	30,38	7,9	1671×1002×42	11200

В качестве расчетной примем солнечную батарею SDM-150 мощностью 150 Вт. Так как площадь солнечной батареи  $1,5 \text{ м}^2$ , то для для дождевальная машины потребуется 12 СБ:

$$C_{сб} = 6500 \cdot 12 = 78000 \text{ руб.}$$

Дополнительные затраты на установку СБ складываются из затрат на элементы системы креплений, соединений, защитное оборудование и запасные части (таблица 4.5).

Таблица 4.5 – Рыночная стоимость элементов

Элемент	Единица измерения	Количество	Цена за единицу, руб.	Стоимость, руб.
Монтажная рейка 2100 мм	шт.	24	1047	25128
Соединитель для монтажных реек	шт.	12	196	2352
Зажим концевой	шт.	24	101	2424
Зажим внутренний	шт.	36	101	3636
Набор регулировки высоты установки	шт.	48	183	8784
Зажим заземления	шт.	12	124	1488
Перемычка для монтажных реек	шт.	12	320	3840
Коннектор	шт.	36	150	3600
Кабель для соединений сечением $16 \text{ мм}^2$	м	39	300	11700

Таким образом, дополнительные затраты:

$$\begin{aligned} Z_{\text{доп}} &= 25128 + 2352 + 2424 + 3636 + 8784 + \\ &+ 1488 + 3840 + 3600 + 11700 = 62952 \text{ руб.} \end{aligned}$$

На затраты труда персонала на монтажные работы приходится 15 % стоимости всего оборудования:

$$Z_T = (C_{вэл} + C_{аб} + C_{сб}) \cdot 0,15 = \\ = (42600 + 354000 + 78000) \cdot 0,15 = 71190 \text{ руб.}$$

Тогда затраты на создание автономной системы электроснабжения с САБ:

$$Z_c = 42600 + 354000 + 78000 + 62952 + 71190 = 608742 \text{ руб.}$$

Определим затраты на эксплуатацию источника электроснабжения с использованием САБ в соответствии со спецификой режима работы и конструктивными особенностями отдельных элементов.

Особенность гелевого аккумулятора как одного из источников электроснабжения заключается в том, что электролит представляет собой гелеобразную форму. Аккумуляторы такого типа являются не обслуживаемыми и не подлежащими ремонту. При возникновении неполадок данный аккумулятор необходимо заменить, его текущий и капитальный ремонты не проводят.

При эксплуатации электропривода постоянного тока необходимо содержать его в исправном состоянии. Для этого предусмотрено проведение его технического обслуживания.

Солнечная батарея представляет собой батарею соединенных между собой ячеек, которые закрыты от воздействия внешних факторов прозрачным стеклом со стороны, принимающей солнечные лучи, и металлическим корпусом с обратной стороны. При повреждении ячейки, стекла или корпуса затраты на ремонт СБ сопоставимы с затратами на покупку новой солнечной батареи, поэтому текущий и капитальный ремонты не предусмотрены.

Для поддержания работоспособного состояния источника электроснабжения с использованием САБ необходимо проводить периодическое техническое обслуживание, заключающееся в следующих видах работ:

- чистка элементов конструкции от пыли;
- проверка контактных соединений;

- проверка креплений;
- замена изношенных частей.

Как видно из анализа, эксплуатация источника электроснабжения с использованием САБ не требует значительных затрат труда и материалов на обслуживание. Техническое обслуживание солнечных батарей можно совместить с обслуживанием двигателя постоянного тока. Периодичность проведения – перед началом эксплуатации ДМ и при наработке 200 ч.

Таким образом, затраты на эксплуатацию источника электроснабжения с использованием САБ:

$$Z_3 = Чtn, \quad (4.5)$$

где Ч – часовая тарифная ставка персонала, руб., Ч = 125,3 руб./ч;  $t$  – продолжительность выполнения работ, ч;  $n$  – периодичность выполнения работ,  $n = 2$ .

$$Z_3 = 125,3 \cdot 5 \cdot 2 = 1253 \text{ руб.}$$

### **4.3 Расчет показателей экономической эффективности применения автономной системы электроснабжения с солнечными и аккумуляторными батареями**

Сравним экономическую эффективность источника электроснабжения с использованием САБ с дизельной электростанцией или трансформаторной подстанцией. Однако строительство трансформаторной подстанции и прокладка кабельной линии до дождевальной машины представляют собой трудоемкий процесс, затраты на который могут себе позволить только крупные предприятия. Исходя из этого, сравним экономическую эффективность САБ с дизельной электростанцией.

Внедрение источника электроснабжения с использованием САБ подразумевает изменение электроснабжения дождевальной машины с переменного тока на постоянный. Конструктивные изменения будут заключаться в замене мотор-редуктора переменного тока на вентильный электропривод постоянного тока, а также в сокращении длины кабельной линии. Экономический эффект необходимо рассчитать с учетом этих изменений.

Экономический эффект  $\mathcal{E}$  от применения источника электроснабжения с использованием САБ зависит от стоимости ресурса на производство электроэнергии  $C_p$  (руб.):

$$\mathcal{E} = C_p Q_p, \quad (4.6)$$

где  $C_p$  – цена за ресурс, руб.;  $Q_p$  – количество сэкономленной электроэнергии, кВт·ч.

Экономический эффект можно определить при конкретном сравнении САБ с другим источником. В качестве базового варианта для сравнения принята переносная дизельная электростанция, которая обеспечивает работу дождевальной машины с учётом пусковых токов и одновременного включения всех электроприводов. Для ДМ с количеством секций, равным 6, это может обеспечить генератор мощностью 10 кВт·А. Рассчитаем расход топлива для получения 1 кВт·ч.

Сбереженный ресурс образуется за счет использования солнечной энергии. Ресурсом, используемым дизельной электростанцией для производства электрической энергии, является дизельное топливо.

Рассмотрим сбережение ресурса за сезон эксплуатации дождевальной машины.

Количество ресурса, расходуемого на производство электрической энергии, зависит от продолжительности движения дождевальной машины за сезон и расхода топлива дизельной электростанцией. Продолжительность движения дождевальной машины можно описать количеством времени, за которое осуществляется полный оборот, умноженным на количество полных оборотов за сезон:

$$T = t_{об} n_{об}, \quad (4.7)$$

где  $t_{об}$  – время одного полного оборота дождевальной машины, ч;  $n_{об}$  – количество полных оборотов за сезон эксплуатации ДМ.

Количество дизельного топлива, затрачиваемого на производство электрической энергии, зависит от его расхода электростанцией:

$$Q_p = TP_{эл}, \quad (4.8)$$

где  $P_{эл}$  – расход топлива дизельной электростанцией, л/ч.

Технические характеристики дизельных генераторов представлены в таблице 4.6

Таблица 4.6 – Характеристики дизельных генераторов

Марка	Мощность, кВт	Расход топлива, л/ч	Стоимость, руб.
TCC-AD-10C-T400-1PM19	10	2,2	224978
GMGen GMM9M	10	2,1	894000
TTD 14TS CT	10	2,2	264320
Teksan TJ14PE5A	10	2,8	695755
Yanmar YH170DTLS	10	2,72	624445

Дизельная электростанция является источником электроэнергии для электропривода секций дождевальной машины. Поэтому к стоимости дизельной электростанции необходимо добавить стоимость мотор-редукторов. Примем мотор-редуктор UMC Power Saver 3.5 PSG 35-40 номинальной мощностью 0,55 кВт.

Затраты  $Z_{\text{мр}}$  на мотор-редукторы:

$$Z_{\text{мр}} = C_{\text{мр}} n_{\text{мр}}, \quad (4.9)$$

где  $C_{\text{мр}}$  – цена одного мотор-редуктора, руб;  $n_{\text{мр}}$  – количество мотор-редукторов, используемых в ДМ,  $n_{\text{мр}} = 6$ .

$$Z_{\text{мр}} = 17000 \cdot 6 = 102000 \text{ руб.}$$

Примем за единицу ресурса 1 л дизельного топлива. Ценовой диапазон на него представлен в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Цена дизельного топлива в Саратовской обл.

Расположение АЗС	Наименование АЗС	Цена, руб./л
г. Саратов	ТНК-АЗС	46,05
	Лукойл-АЗС	47,16
	Торэко-АЗС	46,9
г. Маркс	ТНК-АЗС	46,05
	Волга-98 АЗС	47,2
г. Новоузенск	ТНК-АЗС	46,65
п. Базарный Карабулак	ТНК-АЗС	46,65

Примем за расчетную электростанцию TCC-AD-10C-T400-1PM19, автозаправочную станцию ТНК-АЗС (г. Саратов). Тогда исходными данными для расчета будут:

- расход топлива  $P_{\text{эл}} = 2,2$  л/ч;

- цена дизельного топлива  $Q_{рес} = 46,05$  руб./л;
- время 1 оборота ДМ  $t_{об} = 40$  ч;
- количество оборотов ДМ  $n_{об} = 10$ .

Продолжительность движения дождевальная машины за сезон:

$$T = t_{об} n_{об} = 40 \cdot 10 = 400 \text{ ч.}$$

Количество ресурса, используемого дизельной электростанцией:

$$Q_p = TP_{эл} = 400 \cdot 2,2 = 880 \text{ л.}$$

Для получения 1 кВт·ч электроэнергии нужно потратить 0,2 л дизельного топлива. Тогда количество сэкономленной электроэнергии:

$$Q_{эсб} = \frac{Q_p}{Q_{дт1кВт}}, \quad (4.10)$$

где  $Q_{эсб}$  – количество сэкономленной электроэнергии, кВт;  $Q_{дт1кВт}$  – количество дизельного топлива для получения 1 кВт·ч электроэнергии, л.

$$Q_{эсб} = \frac{880}{0,2} = 4400 \text{ кВт} \cdot \text{ч.}$$

Ресурс, используемый дизельной электростанцией, необходимо доставить до места ее установки. Количество доставок можно рассчитать следующим образом:

$$n_d = \frac{Q_p}{V_б}, \quad (4.11)$$

где  $V_б$  – объем топливного бака дизельной электростанции, л.

$$n_d = 880 : 110 = 8 \text{ доставок.}$$

Затраты на доставку ресурса будут складываться из стоимости доставки и расстояния до ее места:

$$З_d = C_d l n_d, \quad (4.12)$$

где  $C_d$  – стоимость доставки, руб.,  $C_d = 30$  руб./км;  $l$  – расстояние, пройденное бензовозом до места доставки, км.

$$Z_d = 30 \cdot 20 \cdot 8 = 4800 \text{ руб.}$$

Рассчитаем затраты на кабельную линию:

$$Z_{\text{кл}} = L_{\text{кл}} C_{1\text{кл}}, \quad (4.13)$$

где  $L_{\text{кл}}$  – протяженность кабельной линии, м;  $C_{1\text{кл}}$  – стоимость 1 м кабельной линии, руб.,  $C_{1\text{кл}} = 300$  руб.

$$L_{\text{кл}} = l_1 + l_2 + l_3, \quad (4.14)$$

где  $l_1$  – расстояние от дизельной электростанции до неподвижной опоры,  $l_1 = 5$  м;  $l_2$  – расстояние от неподвижной опоры до крайней секции дождевальная машины,  $l_2 = 360$  м;  $l_3$  – расстояние от ПСЛ каждой секции дождевальная машины до электроприводов секций,  $l_3 = 18$  м.

Примем за расчетный кабель ВВГ 3×16. Исходя из этого, затраты на кабельную линию:

$$Z_{\text{кл}} = (5 + 360 + 18) \cdot 300 = 114900 \text{ руб.}$$

Экономический эффект  $\mathcal{E}$  от применения источника электроснабжения с использованием САБ:

$$\begin{aligned} \mathcal{E} &= C_{\text{ед}} Q_{\text{рес}} + Z_d + Z_{\text{мр}} + Z_{\text{кл}} = \\ &= 46,05 \cdot 880 + 4800 + 102000 + 114900 = 262224 \text{ руб.} \end{aligned}$$

Определим показатели экономической эффективности от внедрения источника электроснабжения с использованием САБ:

- минимальный, средний и максимальный срок окупаемости;
- чистый дисконтированный доход за 5 лет эксплуатации;
- индекс доходности.

Рассчитаем минимальный  $T_{\text{ок min}}$ , средний  $T_{\text{ок}}$  и максимальный  $T_{\text{ок max}}$  сроки окупаемости дополнительных капиталовложений:



$$T_{\text{ок min}} = \frac{3(1-\gamma)}{\Xi(1+\gamma)}; \quad (4.15)$$

$$T_{\text{ок}} = K_{\text{аб}} - \frac{K_{\text{ген}}}{\Xi}; \quad (4.16)$$

$$T_{\text{ок max}} = \frac{3(1+\gamma)}{\Xi(1-\gamma)}, \quad (4.17)$$

где  $3$  – затраты на источник электроснабжения с использованием САБ, руб.;  $\Xi$  – экономический эффект от использования источника электроснабжения с САБ, руб.;  $\gamma$  – доля изменения стоимости капиталовложений и экономического эффекта  $\pm 10\%$  ( $\gamma = \pm 0,1$ ).

$$T_{\text{ок min}} = 608742 \cdot (1 - 0,1) : 262224 : (1 + 0,1) = 1,9;$$

$$T_{\text{ок}} = 608742 : 262224 = 2,32;$$

$$T_{\text{ок max}} = 608742 \cdot (1 + 0,1) : 262224 \cdot (1 - 0,1) = 2,8.$$

В мировой практике наибольшее распространение получил метод оценки экономической эффективности в виде расчета чистого дисконтированного дохода и индекса доходности.

Чистый дисконтированный доход (или интегральный эффект):

$$\text{ЧДД} = \frac{\sum_1^T \text{Д}}{(1+E)^t} - \frac{\sum_0^T \text{З}}{(1+E)^t}, \quad (4.18)$$

где  $\text{Д}$  – чистый денежный доход за период эксплуатации объекта, руб.;  $\text{З}$  – затраты на приобретение и эксплуатацию, руб.;  $E$  – норма дисконта, о. е.;  $T$  – продолжительность расчетного периода, или горизонт расчета,  $T = 5$  лет;  $t$  – номер шага расчета по годам, начиная с момента начала осуществления проекта.

В рыночной экономике при использовании собственного капитала норму дисконта определяют исходя из депозитного процента по вкладам, а на практике она выше этого процента за счет инфляции и риска, связанного с вложениями. Примем норму дисконта равную  $15\%$  ( $E = 0,15$ ) [85].

Индекс доходности (или индекс прибыльности) проекта:

$$\text{ИД} = \frac{\frac{\sum_1^T \text{Д}}{(1+E)^t}}{\frac{\sum_0^T \text{З}}{(1+E)^t}} \quad (4.19)$$

Чистый дисконтированный доход для источника электроснабжения с использованием САБ в течение 5 лет установлен при норме дисконта 15 %. Он составил 219,8 тыс. руб.

Сведем экономические показатели усовершенствованного варианта ДМ с САБ и базового варианта ДМ с дизельной электростанцией в таблицу 4.8.

Таблица 4.8 – Экономические показатели усовершенствованного варианта ДМ с САБ и базового варианта ДМ с дизельной электростанцией

Показатель	Базовый вариант ДМ с дизельной электростанцией	Усовершенствованный вариант ДМ с САБ
Капиталовложения, тыс. руб.	441,8	609
Годовые эксплуатационные затраты, тыс. руб.	45,3	1,3
В том числе		
затраты на ТО и Р	5,8	1,2
затраты на запчасти	3,0	0,1
Цена 1 кВт·ч выработанной энергии, руб.	15,5	0,5
Годовой экономический эффект, тыс. руб.	–	44,1
Срок окупаемости, лет	–	3,9
Чистый дисконтированный доход, тыс. руб.	–	219,8
Индекс доходности, руб./руб.	–	1,25

Таким образом, годовой экономический эффект от внедрения источника электроснабжения ДМ с САБ составляет 44,1 тыс. руб. при сроке окупаемости 4 года.

#### 4.4 Выводы по главе

1. Дополнительные капиталовложения в источник с САБ составляют 167,2 тыс. руб. Они окупятся за 4 года. Годовой экономический эффект составил 44,1 тыс. руб. на единицу техники.

2. Применение автономной системы электроснабжения дождевальных машин, удаленных от централизованной системы электроснабжения, экономически целесообразно.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С целью обеспечения рабочего цикла электропривода дождевальной машины кругового действия с автономной системой электроснабжения исследованы и установлены параметры солнечных и аккумуляторных батарей.

1. Проведён анализ существующих способов электроснабжения электрифицированных дождевальных машин кругового действия, на основе которого определен наиболее эффективный способ электроснабжения от солнечных и аккумуляторных батарей. Анализ применения СБ показал, что на широте  $51^{\circ}$  с.ш., получая с  $1 \text{ м}^2$  150 Вт электрической максимальной мощности летом в дневной промежуток времени, обоснование параметров автономной системы электроснабжения с солнечными и аккумуляторными батареями позволит обеспечить рабочий цикл электропривода секции дождевальной машины кругового действия с вентильно-индукторным электродвигателем.

2. Разработана математическая модель изменения параметров источника с солнечными и аккумуляторными батареями, которая позволяет установить, что рабочий цикл электропривода секции дождевальной машины обеспечивается при параметрах автономного источника электроснабжения с солнечными батареями площадью  $4 \text{ м}^2$  с удельной максимальной мощностью  $150 \text{ Вт/м}^2$  и аккумуляторной батареей с энергией 5,28 кВт·ч в соответствии с вариантами коммутации элементов системы электроснабжения и нагрузки: *вариант 1* – подключение СБ через контроллер к электроприводу секции ДМ, когда время включения ДМ совпадает с началом дневного периода суток в данном географическом месте работы ДМ (дневной полив); *вариант 2* – подключение, при котором рабочий цикл электропривода ДМ обеспечивается от АБ, а заряд АБ осуществляется при помощи СБ в свободные от полива промежутки времени (ночной полив); *вариант 3* – параллельное подключение САБ к электроприводу ДМ – СБ частично обеспечивает электроснабжение, а остальную часть – АБ (ночной и дневной поливы).

3. Установлено, что при эксплуатации дождевальной машины кругового действия с автономной системой электроснабжения, удаленной от пункта

технического обслуживания более чем 10 км и с учетом периодичности ТО, стоимостных показателей, а также коэффициента снижения мощности солнечных батарей от загрязнения, целесообразно комплектовать ДМ дополнительной площадью СБ 25 % от расчетной.

4. Проведены экспериментальные исследования параметров автономной системы электроснабжения ДМ, в ходе которых установлено, что при использовании солнечной батареи максимальной мощностью 600 Вт фактическая продолжительность работы электропривода секции ДМ с электродвигателем мощностью 500 Вт составила 9,5 ч, а среднее отклонение теоретических и экспериментальных данных составило не более 7,7 %; а при использовании АБ с номинальной емкостью 110 А·ч и напряжением 48 В при числе пусков  $w = 100$  фактическая продолжительность работы электропривода секции ДМ с электродвигателем мощностью 500 Вт составила 7,3 ч, а среднее отклонение теоретических и экспериментальных данных составило не более 5,6 %.

5. Дополнительные капиталовложения при разработке дождевальная машины кругового действия с автономной системой электроснабжения с солнечными и аккумуляторными батареями составят 167,2 тыс. руб. в сравнении с дизельной электростанцией, сроком окупаемости 3,9 лет и годовым экономическим эффектом 44,1 тыс. руб. на единицу техники.

## **РЕКОМЕНДАЦИИ ПРОИЗВОДСТВУ**

Результаты представленной работы определяют общие характеристики солнечных и аккумуляторных батарей. В практических условиях применения автономной системы электроснабжения необходимо учитывать типо-размерный ряд вентильного электропривода, диапазон номинальных значений напряжения, показатели надежности и т. д. Для эксплуатации электрифицированной дождевальная машины с количеством секций 6 необходимо 18 м<sup>2</sup> СБ общей максимальной мощностью 2700 Вт; 36 аккумуляторов Delta Gel с общей энергией

для одной секции 23700 кВт·ч; 6 вентильно-индукторных двигателей с мощностью каждого 500 Вт.

### **ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ**

Перспективным направлением дальнейшей разработки применения солнечных и аккумуляторных батарей для передвижной сельскохозяйственной техники является совершенствование контроллеров заряда и параллельной работы источников на общую нагрузку путем расширения их функциональных особенностей, совершенствования элементной базы и схем управления. Кроме того, автономный источник питания на постоянном токе требует разработки и совершенствования способов управления перемещением дождевальная машины кругового действия на основе бесконтактных устройств.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абдразаков, Ф. К.* Повышение экологической эффективности орошения на основе совершенствования дождевальнoй машины «Фрегат» / Ф. К. Абдразаков, В. В. Васильев. – Саратов : Саратовский государственный аграрный университет им. Н. И. Вавилова, 2005. – 116 с. – ISBN 5-7011-0355-2.
2. *Абдразаков, Ф. К.* Применение солнечных батарей в орошаемом земледелии / Ф. К. Абдразаков, А. С. Дусаева // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н. И. Вавилова. – 2009. – № 9. – С. 43–47.
3. *Абдразаков, Ф. К.* Рациональное снижение металлоемкости при конструировании широкозахватных дождевальных машин / Ф. К. Абдразаков, Л. А. Журавлева, В. А. Соловьев // Аграрный научный журнал. – 2018. – № 5. – С. 37–41. – DOI: 10.28983/asj.v0i5.473У.
4. *Абдразаков, Ф. К.* Солнечные батареи повышают эффективность работы дождевальных машин и урожайность сельскохозяйственных культур / Ф. К. Абдразаков, А. С. Дусаева // Энергосбережение в Саратовской области. – 2007. – № 3(29). – С. 34–35.
5. *Абдрахманов, Р. С.* О возможности использования возобновляемых источников энергии в условиях Среднего Поволжья / Р. С. Абдрахманов, Ю. П. Переведенцев // Метеорология и гидрология. – 1993. – № 5. – С. 92–97.
6. Автономное электроснабжение на основе солнечных панелей / Г. В. Никитенко [и др.] // Сельский механизатор. – 2019. – № 9. – С. 32–33. – EDN KСYRTZ.
7. *Амерханов, Р. А.* Оптимизация сельскохозяйственных энергетических установок с использованием возобновляемых видов энергии / Р. А. Амерханов. – М. : КолосС, 2003. – 532 с.
8. *Амерханов, Р. А.* Солнечная энергетика для Краснодарского края / Р. А. Амерханов, В. В. Дворный // Итоги научно-исследовательской работы за 2017 год : сб. статей по материалам 73-й науч.-практ. конференции преподавателей / ФГБОУ ВО «Краснодарский ГАУ». – Краснодар, 2018. – С. 585–586.

9. Андрианов, В. Н. Электрические машины и аппараты / В. М. Андрианов. – «Колос», 1971. – 448 с.
10. Асинхронные двигатели серии 4А : справочник / М. М. Шлаф [и др.]. – М. : Энергоиздат, – 1982.– 32 с.
11. Бакиров, С. М. Анализ энергозатрат на дождевальную машину / С. М. Бакиров // Аграрный научный журнал. – 2019. – № 10. – С. 95–98.
12. Бакиров, С. М. Обоснование мощности подъемно-транспортного электрифицированного агрегата / С. М. Бакиров, С. С. Елисеев // Аграрный научный журнал. – 2017. – № 5. – С. 61–62.
13. Бакиров, С. М. Сравнение нагрузок электропривода опорной тележки на жестких колесах и на колесах с пневматическими шинами / С. М. Бакиров, О. В. Логачёва, М. А. Левин // Актуальные проблемы и перспективы инновационной агроэкономики : сб. статей Национальной (Всероссийской) науч.-практ. конф. / ФГБОУ ВО «Саратовский ГАУ им. Н. И. Вавилова». – Саратов, 2020. – С. 14–18.
14. Бастрон, А. В. Солнечная энергетика как ресурс развития сельских поселений Красноярского края / А. В. Бастрон, И. Н. Ермакова, Н. Б. Михеева // Социально-экономический и гуманитарный журнал Красноярского ГАУ. – 2018. – № 3(9). – С. 33–47. – EDN XZTHJR.
15. Бекиров, Э. А. Электроснабжение промышленных предприятий, зданий, сооружений с использованием энергоагрегатов возобновляемой энергетики / Э. А. Бекиров. – Симферополь, 2019. – 370 с.
16. Бернгардт, Р. П. Климатологические обобщения и применение информации о скорости ветра и гололеде / Р. П. Бернгардт. – Южно-Сахалинск : Изд-во СахГУ, 2003. – 96 с.
17. Бессель, В. В. Изучение солнечных фотоэлектрических элементов : учебно-методическое пособие / В. В. Бессель, В. Г. Кучеров, Р. Д. Мингалеева. – М. : Издательский центр РГУ нефти и газа (НИУ) им. И. М. Губкина, 2016. – 90 с.
18. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи : учебник / Л. А. Бессонов. – 11-е изд., перераб. и доп. – М. : Гардарики, 2007. – 701 с.



19. *Богаткин, О. Г.* Основы метеорологии / О. Г. Богаткин, Г. Г. Тараканов. – СПб. : Изд-во РГГМУ, 2006. – 232 с.
20. *Борисенко, М. М.* Атласы ветрового и солнечного климатов России / М. М. Борисенко, В. В. Стадник. – СПб. : Изд-во ГГО им. А. И. Воейкова, 1997. – 173 с.
21. *Бычков, М. Г.* Оптимизация режимов вентильно-индукторного электропривода средствами управления / М. Г. Бычков // Вестник МЭИ. – 1998. – № 3. – С. 73–81.
22. *Бычков, М. Г.* Элементы теории вентильно-индукторного электропривода / М. Г. Бычков // Электричество. – 1997. – № 8. – С. 35–44.
23. *Ваганов, М. А.* Магнитная индукция в воздушном зазоре вентильного двигателя / М. А. Ваганов, А. А. Гарчук // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2016. – № 8. – С. 68–74.
24. *Варнавская, А. В.* Влияния спектрального состава и мощности излучения на эффективность преобразования кремниевого солнечного элемента / А. В. Варнавская, Д. А. Новичков // Сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф. / отв. ред. А. А. Сукиасян. – Уфа : ООО «ОМЕГА САЙНС», 2016. – С. 3–7.
25. *Васильев, С. М.* Дождевание / С. М. Васильев, В. Н., Шкура. – Новочеркасск : РосНИИПМ, 2016. – 352 с.
26. *Герман, В. М.* Дождевальная машина «Кубань» : руководство по эксплуатации ЭДМФ-00.000РЭ / В. М. Герман ; Центр. НИИ «РУМБ». – Л., 1981. – 23 с.
27. Гетероструктурные солнечные элементы на основе монокристаллического кремния с контактной сеткой, напечатанной на принтере методом струйной печати / С. Н. Аболмасов [и др.] // Письма в Журнал технической физики. – 2017. – Т. 43. – № 1. – С. 74–79.
28. *Городничев, В. И.* Автоматизация технологических процессов орошения / В. И. Городничев. – М. : ФГНУ «Росинформагротех», 2009. – 267 с.
29. *Григораш, О. В.* Классификация и основные способы построения солнечных электростанций / О. В. Григораш, И. В. Евтушенко, М. А. Попучиева // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского ГАУ. – 2016. – № 124. – С. 1453–1466.

30. *Григораш, О. В.* Особенности параллельной работы статических преобразователей электроэнергии / О. В. Григораш, О. Я. Ивановский, А. С. Туаев // Актуальные проблемы энергетики АПК : матер. X национальной науч.-практ. конф. с международным участием / под общ. ред. В. А. Трушкина. – Саратов, 2019. – С. 62–64.

31. *Дебрин, А. С.* Обзор солнечных панелей и фотоэлектрических станций отечественных производителей / А. С. Дебрин, А. В. Бастрон, В. Н. Урсегов // Вестник КрасГАУ. – 2018. – № 6(141). – С. 136–141. – EDN YRIYMP.

32. *Еремочкин, С. Ю.* Повышение эффективности мобильных машин в АПК на основе векторно-алгоритмического управления электродвигателем [Электронный ресурс] / С. Ю. Еремочкин. – Барнаул, 2014. – Режим доступа : <https://www.altstu.ru/media/f/Dissertacia-Eremochkin-SY.pdf>.

33. *Ермоленко, В. П.* Система ведения агропромышленного производства Саратовской области / В. П. Ермоленко, Ю. М. Овчаров, В. Я. Сулименко. – Саратов, 1996.

34. *Ерошенко, Г. П.* Адаптация эксплуатации электрооборудования к особенностям сельскохозяйственного производства / Г. П. Ерошенко, С. М. Бакиров. – Саратов : ИЦ «Наука», 2011. – 132 с.

35. *Ерошенко, Г. П.* Оценка применения солнечных модулей в качестве источника электроснабжения мобильных сельскохозяйственных электрифицированных машин / Г. П. Ерошенко, С. М. Бакиров, С. С. Елисеев // Вестник Курганской ГСХА. – 2019. – № 1 (29). – С. 70–73.

36. *Ерошенко, Г. П.* Эксплуатация энергооборудования сельскохозяйственных предприятий / Г. П. Ерошенко, Ю. А. Медведько, М. А. Таранов. – Ростов н/Д : Терра, 2006. – 590 с.

37. *Журавлева, Л. А.* Ресурсосберегающие широкозахватные дождевальные машины кругового действия : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 06.01.02 / Журавлева Лариса Анатольевна. – Саратов, 2018. – 39 с.

38. *Завойкин, В. А.* Экспериментальные исследования модульной солнечной электростанции в различных погодных условиях при изменении угла падения

солнечных лучей / В. А. Завойкин, С.А. Феофанов // *Universum* : технические науки. – 2019. – № 6 (63). – С. 108–112.

39. *Ивченко, Г. И.* Математическая статистика : учебник / Г. И. Ивченко. – М. : Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2014. – 352 с.

40. Исследование когенерационного солнечного модуля с призмным концентратором / Д. С. Стребков [и др.] // *Достижения науки и техники АПК*. – 2014. – № 7. – С. 53–56.

41. Исследование эффективности работы солнечной панели при воздействии на нее загрязнителей / Ю. Н. Зацаринная [и др.] // *Труды Академэнерго*. – 2019. – № 1. – С. 81–92.

42. *Квитко, А. В.* Перспективы и особенности работы солнечных фотоэлектрических станций / А. В. Квитко, Г. С. Отмахов // *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского ГАУ*. – 2017. – № 131 (07). – С. 56–68.

43. *Кобозев, В. А.* Энергосбережение в силовом электрооборудовании сельскохозяйственного производства / В. А. Кобозев. – Ставрополь : АГРУС, 2004. – С. 245–248.

44. *Колтовой, Н. А.* Альтернативные источники энергии / Н. А. Колтовой. – М., 2018. – 308 с.

45. *Коробатов, Д. В.* Система автоматической очистки поверхности солнечного модуля / Д. В. Коробатов, О. В. Серадская, Е. А. Сироткин // *Альтернативная энергетика и экология*. – 2016. – № 11–12 (199–200). – С. 59–67.

46. *Криулин, К. Н.* Орошение дождеванием : учебное пособие / К. Н. Криулин, М. Ю. Патрица, Ю. Б. Полетаев. – СПб., 2003. – 53 с.

47. *Кудрявцева, Н. С.* Основные типы солнечных элементов / Н. С. Кудрявцева // *Теоретические, экспериментальные и прикладные исследования молодых учёных Тверского государственного технического университета* : сб. науч. тр. – Тверь, 2017. – С. 352–357.

48. *Лосев, А. П.* Агрометеорология : учебник для вузов / А. П. Лосев, Л. Л. Журина. – М. : Колос, 2001. – 302 с.

49. *Лукутин, В. Б.* Децентрализованные системы электроснабжения с ветровыми и солнечными электростанциями : учебное пособие / В. Б. Лукутин, И. О. Муравлев, И. А. Плотников. – Томск : Изд-во Томского политехнического ун-та, 2015. – 100 с.

50. *Кузнецов, М. И.* Основы электротехники / М. И. Кузнецов. – М., 2013. – 560 с.

51. *Мартынюк, В. В.* Повышение эффективности отбора энергии источника постоянного тока / В. В. Мартынюк, В. Д. Косенков, Н. В. Федула // Проблемы региональной энергетики. – 2019. – № 1–2 (41). – С. 74–83.

52. Материалы с сайта url : [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://russiabase.ru/prices.php?region=48> – (Дата обращения 07.02.2020).

53. Мелиорация и водное хозяйство. Орошение / И. П. Айдаров [и др.] ; под ред. акад. РАСХН Б. Б. Шумакова. – М. : Колос, 1999. – 432 с. – ISBN 5-10-003258-8. – EDN WFINLZ.

54. *Мигунов, Я. Н.* Моделирование вольт-амперной характеристики солнечных модулей с учетом падения освещенности за счет влияния струй электроракетных двигателей / Я. Н. Мигунов, В. В. Онуфриев // Космическая техника и технологии. – 2019. – № 4 (27). – С. 56–64.

55. *Новгородцев, А. Б.* Теоретические основы электротехники. 30 лекций по теории электрических цепей : учеб. пособие / А. Б. Новгородцев. – 2-е изд. – СПб. : Питер, 2006. – 576 с.

56. Обоснование показателя эффективности энергоснабжения дождевальная машины кругового действия / Д. А. Соловьев [и др.] // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2021. – № 1 (87). – С. 158–163. – EDN JFUOPR.

57. *Ольгаренко, В. И.* Эксплуатация и мониторинг мелиоративных систем : учебник для вузов / В. И. Ольгаренко, Г. В. Ольгаренко, В. Н. Рыбкин. – Коломна, 2006. – 391 с. – ISBN 5-91040-002-9.

58. *Оськин, В. С.* Электрический привод : учебник для вузов / В. С. Оськин, Н. И. Богатырев. – Краснодар : КубГАУ, 2016. – 490 с.

59. *Оташехов, Д. И* Дизель-генераторная установка. Диагностика. Ремонт. Техобслуживание / Д. И. Оташехов. – Издательские решения, 2019. – 770 с.

60. Пат. 2702758 Российская Федерация, МПК Н 01М10/44 Н 02 J 7/00. Способ заряда комплекта аккумуляторных батарей в составе автономной системы электроснабжения космического аппарата / Глухов В. И., Коваленко С. Ю., Тарабанов А. А. ; патентообладатель АО «НИИ электромеханики». – № 2019105464 ; заявлено 26.02.2019 ; опубл. 11.10.2019, Бюл. № 29.

61. Пат. № 189495 Российская Федерация, МПК А 01 G 25/09, СПК А 01 G 25/09, Y 02 P 60/122. Автономная электрифицированная секция дождевальная 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 ; заявл. 08.02.2019 ; опубл. 24.05.2019, Бюл. № 15. – 6 с. : ил.

62. Пат. 2656126 Российская Федерация, С1 МПК Н 01 L 31/18, Н 01 L 21/18, Н 01 L 21/333. Способ изготовления бескорпусного диода для солнечных модулей космических аппаратов / Харитонов В. А., Анурова Л. В., Басовский А. А., Жуков А. А., Дидык П. И. ; патентообладатель АО «Российские космические системы» ; № 2017119459 ; заявлено 05.06.2017 ; опубл. 31.05.2018, Бюл. № 11.

63. *Письменный, Д. Т.* Конспект лекций по высшей математике : полный курс / Д. Т. Письменный. – 10-е изд., испр. – М. : Айрис-пресс, 2011. – 608 с.

64. Повышение эффективности использования фотоэлектрических панелей в сельском хозяйстве / А. Ф. Эрк [и др.] // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. – 2018. – № 94. – С. 71–77.

65. Повышение эффективности системы управления электрифицированной дождевальная машины кругового действия «КАСКАД» / Ф. К. Абдразаков [и др.] // Аграрный научный журнал. – 2018. – № 8. – С. 51–56. – DOI: 10.28983/asj.v0i8.548.

66. Польза и практическое применение солнечных модулей в строительстве автодорог / М. Б. Пермяков [и др.] // Транспортные сооружения. – 2019. – Т. 6. – № 2. – С. 10.

67. Потери мощности солнечных модулей под воздействием околоспутниковой среды на геостационарной орбите / В. А. Шувалов [и др.] // Космические исследования. – 2005. – Т. 43. – № 4. – С. 274–282.

68. Рабинович, М. Д. Сравнение различных методов представления климатической информации при расчете производительности гелиосистем / М. Д. Рабинович // Гелиотехника. – 1986. – № 3. – С. 76–77.

69. Разработка программных продуктов по моделированию характеристик фотоэлектрических модулей для повышения эффективности работы ФЭС автономных потребителей / А. С. Дебрин [и др.] // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2020. – № 3(83). – С. 222–225. – EDN DCPRSX.

70. Раушенбах, Г. Справочник по проектированию солнечных модулей : пер. с англ. / Г. Раушенбах. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 360 с.

71. Режимы и параметры электроприводов дождевальная машины кругового действия / Г. П. Ерошенко [и др.] // J. of Adv. Research in Dynamical & Control Systems. – 2018. – Vol. 10. – Special Issue.

72. Руководство по эксплуатации. Техническое описание и инструкции. Машина дождевальная электрифицированная круговая «Кубань – ЛК1М» (КАС-КАД) / ООО «Мелиомаш». – Саратов, 2012. – 66 с.

73. Сайт АО «ПЗ "МЕЛИОРАТОР"» [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://meliorator64.ru/> – (дата обращения : 05.02.2020).

74. Сайт компании Lindsay [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.lindsayrussia.com> – (дата обращения : 22.10.2019).

75. Семенченко, Б. А. Физическая метеорология / Б. А. Семенченко. – М. : Аспект Пресс, 2002. – 414 с.

76. Снопич, Ю. Ф. Совершенствование технических средств орошения дождеванием / Ю. Ф. Снопич. – Новочеркасск : ООО «Геликон», 2007. – 110 с.

77. Солнечная энергетика : учебное пособие для вузов / В. И. Виссарионов [и др.] ; под ред. В. И. Виссарионова. – М. : МЭИ, 2008. – 276 с.

78. Солнечные фотоэлектрические станции : перспективы, особенности работы и расчета экономической эффективности / А. Е. Усков [и др.] // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского ГАУ. – 2015. – № 114. – С. 902–917.

79. Справочник по механизации орошения / Б. Г. Штепа [и др.] ; под ред. Б. Г. Штепы. – М. : Колос, 1979. – 303 с.

80. *Стрижков, И. Г.* Электрооборудование технологических комплексов орошаемого земледелия : дис. ... д-ра техн. наук / Стрижков Игорь Григорьевич. – Краснодар, 2001. – 432 с.

81. Техничко-экономическое обоснование параметров комбинированной солнечной энергетической установки в климатических условиях г. Краснодара / Р. А. Амерханов [и др.] // Энергосбережение и водоподготовка. – 2019. – № 5 (121). – С. 67–76.

82. *Троицкий, А. О.* Основные факторы снижения КПД солнечных установок и способы поддержания номинального КПД / А. О. Троицкий, О. В. Серадская, И. М. Кирпичникова // Энерго-и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере : матер. Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов, ученых 2015 г. – Т. 3. – № 1. – С. 222–225.

83. *Устинов, П. И.* Обслуживание стационарных свинцово-кислотных аккумуляторов / П. И. Устинов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергия, 1974. – 120 с.

84. *Федосова, Н. Л.* Анतिकоррозионная защита металлов / Н. Л. Федосова. – Иваново, 2009. – 187 с.

85. Финансовый менеджмент : учебник для вузов / Е. И. Шохин [и др.]. – М. : КноРус, 2011. – 480 с.

86. *Фокин, Б. П.* Современные проблемы применения многоопорных дождевальных машин / Б. П. Фокин, А. К. Носов. – Ставрополь, 2011. – 80 с.

87. *Хрусталева, Д. А.* Аккумуляторы / Д. А. Хрусталева. – М. : Изумруд, 2003. – 224 с.

88. *Шакиров, Ю. И.* Автономные источники тока : учебное пособие / Ю. И. Шакиров. – Набережные Челны, 2012. – 313 с.

89. *Шерьязов, С. К.* Ветроэлектрические установки в системе электроснабжения сельскохозяйственных потребителей : [монография] / С. К. Шерьязов, М. В. Шелубаев. – Челябинск : Южно-Уральский ГАУ, 2018. – 184 с.

90. *Шипулин, А. В.* Математическая модель и метод расчета мощности солнечных модулей и емкости аккумуляторных батарей для электроснабжения автономных охранных комплексов / А. В. Шипулин, Ю. П. Стоянов, О. С. Мезенцева // Современная наука и инновации. – 2017. – № 4 (20). – С. 33–42.

91. *Шишкин, Н. Д.* Малые энергоэкономичные комплексы с возобновляемыми источниками энергии / Н. Д. Шишкин. – М. : Готика, 2000. – 236 с.

92. *Штерн, В. И.* Эксплуатация дизельных электростанций / В. И. Штерн. – М. : Энергия, 1980. – 120 с.

93. *Шульга, Н. К.* Учебник мастера орошения / Н. К. Шульга, А. И. Дукмасов. – М. : Колос, 1980. – 352 с.

94. Электроснабжение сельскохозяйственных потребителей с использованием возобновляемых источников : учебное пособие / Л. А. Саплин [и др.]. – Челябинск : ЧГАУ, 2000. – 194 с.

95. Элементарный учебник физики : в 3 т. / под ред. акад. Г. С. Ландсберга. – изд. 16-е. – М. : Физматлит, 2017.

96. *Эрдеи-Груз, Т.* Химические источники энергии / пер. с нем. З. Л. Понизовского. Л. З. Понизовского ; под ред. Ю. А. Мазитова. – М. : Мир, 1974. – 304 с.

97. *Юферов, Л. Ю.* Разработка преобразователя напряжения для концентраторной установки с параллельным соединением солнечных элементов / Л. Ю. Юферов // Вестник ВИЭСХ. – 2016. – № 4 (25). – С. 109–112.

98. *Abdrazakov, F. K.* Electricity Consumption Decrease at Pump Stations during Watering by Multi-Support Sprinkling Units / F. K. Abdrazakov, N. F. Ryzhko, S. N. Ryzhko // Contemporary Dilemmas : Education, Politics and Values. – 2019. – Vol. 6. – No. S3. – P. 74.



99. *Abdrazakov, F. K.* The increase of qualitative indicators during watering with Multiple Support Sprinklers / F. K. Abdrazakov, N. F. Ryzhko, S. N. Ryzhko // *Contemporary Dilemmas : Education, Politics and Values.* – 2019. – Vol. 6. – No. S3. – P. 76. – EDN HCUXKQ.

100. *Arbuzov, Y. D.* Angle-depended photocurrent characteristics of upper-limit efficient cascade pv cells on the base of homogeneous semiconductor / Y. D. Arbuzov, V. M. Evdokimov, O. V. Shepvalova // *Energy Procedia. International Conference on Technologies and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability, TMREES 2017.* – 2017. – P. 980–989.

101. A new kind of transparent and self-cleaning film for solar cells / Q. Xu [et al.] // *Nanoscale.* – 2016. – Vol. 8. – No. 41. – C. 17747–17751.

102. *Boukortt, N. E. I.* Simulation of Electrical Characteristics of PERC Solar Cells / N. E. I. Boukortt, B. Hadri // *Journal of Electronic Materials.* – 2018. – 47 (10). – P. 5825–5832.

103. *Brand, A. E.* The analysis of the development dynamics and structural balance of solar energy in the world / A. E. Brand, S. M. Chekardovskiy, K. A. Akulov // *IOP Conference Series : Earth and Environmental Science.* – 2017.

104. Characterization of photovoltaic-thermoelectric-solar collector hybrid systems in natural sunlight conditions / D. T. Cotfas [et al.] // *Journal of Energy Engineering – ASCE.* – 2017. – Vol. 143. – № 6. – P. 04017055.

105. Design and evaluation of passive concentrator and reflector systems for bifacial solar panel on a highly cloudy region – a case study in Malaysia / Y. S. Lim [et al.].

106. *Dombrovsky, L. A.* The influence of pollution on solar heating and melting of a snowpack / L. A. Dombrovsky, A. A. Kokhanovsky // *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer.* – 2020. – Vol. 233. – P. 42–51.

107. Efficiency of using solar electric panels with grid-tie inverter for public buildings / E. V. Platonova [et al.] // *Journal of Physics : Conference Series International Scientific Conference "Conference on Applied Physics, Information Technologies and Engineering – APITECH-2019". Krasnoyarsk Science and Technolo-*

gy City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations ; Polytechnical Institute of Siberian Federal University. – Krasnoyarsk, 2019. – P. 55013.

108. Efficient ambient-air-stable solar cells with 2d-3d heterostructured butylammonium-caesium-formamidinium lead halide perovskites / Z. Wang [et al.] // *Nature Energy*. – 2017. – Vol. 2. – No. 9. – P. 17135.

109. *Energy Matters* / How to clean solar panels [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.energymatters.com.au/panelsmodules/cleaning-solar-panels/>.

110. *Gençer, E.* Synthesis of efficient solar thermal power cycles for base load power supply / E. Gençer, R. Agrawal // *Energy Conversion and Management*. – 2017. – Vol. 133. – P. 486–497.

111. *Grigorash, O. V.* Power supply of agricultural facilities of Krasnodar territory through use of renewable energy / O. V. Grigorash, V. V. Dvorny, K. V. Pigarev // 2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM. – 2019. – P. 8742932.

112. *Hoekstra, J.* Introduction to nanoelectronic single-electron circuit design : second edition / J. Hoekstra. – 2016. – P. 1–328.

113. Improving the energy efficiency of using solar panels (Повышение энергоэффективности при использовании солнечных панелей) / G. V. Nikitenko [et al.] // IOP Conference Series : Earth and Environmental Science, Veliky Novgorod, 22 октября 2020 года. – Veliky Novgorod, 2020. – P. 012092. – DOI: 10.1088/1755-1315/613/1/012092. – EDN MBPDYF.

114. Investigation of microcrystalline silicon by the small-angle x-ray-scattering technique / M. D. Sharkov [et al.] // *Semiconductors*. – 2015. – Vol. 49. – No. 8. – P. 1052–1056.

115. *Keykha, H. A.* Solar powered electro-bio-stabilization of soil with ammonium pollution prevention system / H. A. Keykha, A. Asadi // *Advances in Civil Engineering Materials*. – 2017. – Vol. 6. – No.1. – P. 360–371.

116. *Kittler, R.* Scattered sunlight determining sky luminance patterns / R. Kittler, S. Darula // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2016. – Vol. 62. – P. 575–584.

117. *Koyuncu, T.* Practical efficiency of photovoltaic panel used for solar vehicles / T. Koyuncu // IOP Conference Series : Earth and Environmental Science 2.. "2nd International Conference on Green Energy Technology, ICGET 2017". – 2017. – P. 012001.

118. Large reductions in solar energy production due to dust and particulate air pollution / M. H. Bergin [et al.] // Environmental Science and Technology Letters. – 2017. – Vol. 4. – No. 8. – P. 339–344.

119. *Li, Y.* Ultrathin c-si solar cells based on microcavity light trapping scheme / Y. Li, X. Wang, Y. Wang // Optical and Quantum Electronics. – 2019. – Vol. 51. – No. 5. – P. 138.

120. *Low, F. W.* Recent developments of graphene-tio<sub>2</sub> composite nanomaterials as efficient photoelectrodes in dye-sensitized solar cells : a review / F. W. Low, C. W. Lai // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2018. – Vol. 82. – P. 103–125.

121. *McEvoy, A. J.* Sensitization in photochemistry and photovoltaics / A. J. McEvoy, M. Gratzel // Solar Energy Materials & Solar Cells. – 1994. – Vol. 32. – No. 3. – P. 221–227.

122. *McKone, J. R.* Solar energy conversion, storage, and release using an integrated solar-driven redox flow battery / J. R. McKone, F. J. Di Salvo, H. D. Abruña // Journal of Materials Chemistry A. – 2017.

123. Optimal power supply synthesis for circular action sprinkler / G. P. Eroshenko [et al.] // Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems. – 2018. – Vol. 10. – No. 10. – Special Issue. – P. 2129–2134.

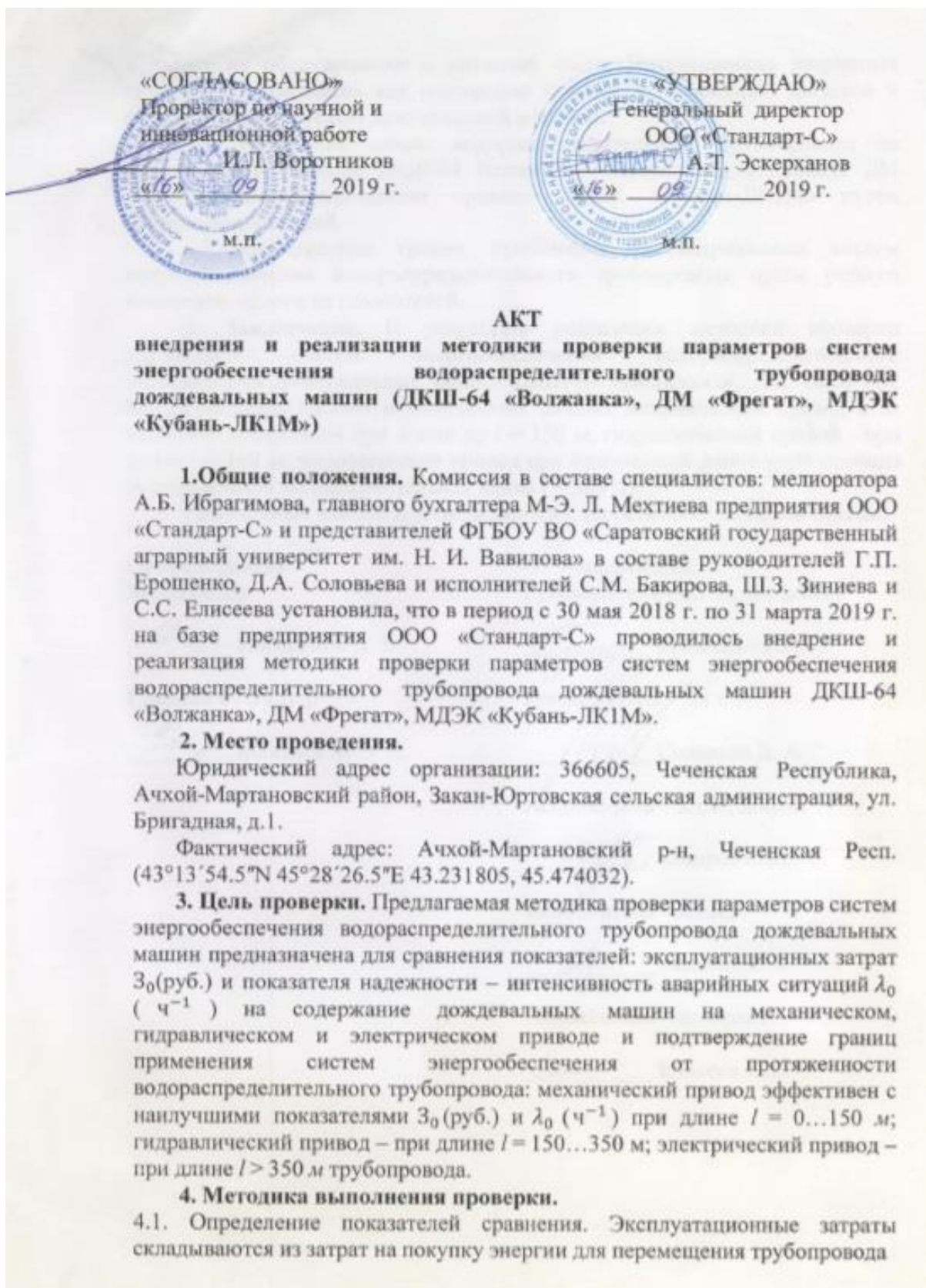
124. Reduction in the operating voltage and active power of extended electric power sources / T. A. Konev [et al.] // Journal of Physics : Conference Series International Scientific Conference "Conference on Applied Physics, Information Technologies and Engineering - APITECH-2019". Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations ; Polytechnical Institute of Siberian Federal University. – Krasnoyarsk, 2019. – C. 22011.

125. Solar energy harvesting and self-cleaning of surfaces by an impacting water droplet / G. Hassan [et al.] // International Journal of Energy Research. – 2019.

126. Solar photovoltaics : current state and trends / V. A. Milichko[et al.] // *Physics-Uspekhi*. – 2016. – Vol. 59. – No. 8. – P. 727–772.
127. *Sonrell, H.* Zeitgemusse Beregnung Verringerung des Wasser – und Energien auf wandes bei mobilen Beregnung maschinen / H. Sonrell // *Landtechnik*. – 1991. – Vol. 46. – Iss. 5. – P. 209–219.
128. *Sun, H.* Recent progress in anti-reflection layer fabrication for solar cells / H. Sun // *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics*. – 2016. – Vol. 11. – No. 3. – P. 257–264.
129. *Tan, M.-H.* Rectifying structural deflection effect of large solar concentrator via correction of sun-tracking angle in the concentrator photovoltaic system / M.-H. Tan, K.-K. Chong // *Solar Energy*. – 2017. – Vol. 148. – P. 140–148.
130. The effect of the pcb solder mask type of the hull outer surface of the cubesat 3u on its thermal regime / V. N. Gorev [et al.] // *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations*. – Krasnoyarsk, 2020. – P. 12027.
131. The studies of water flow characteristics in the water conducting belt of wide-coverage sprinkling machines / F. K. Abdrazakov [et al.] // *The Turkish Online Journal of Design Art and Communication*. – 2018. – Vol. 8. – No S-MRCHSPCL. – P. 567–577.
132. Ultra-short-term forecast of photovoltaic output power under fog and haze weather / W. Liu [et al.] // *Energies*. – 2018. – Vol. 11. – No. 3. – P. en11030528.
133. *Yilbas, B. S.* Dustrepellent materials / B. S. Yilbas, G. Hassan, A. Al-Sharafi // *Comprehensive Energy Systems*. – 2018. – P. 832–880.
134. *Ziapour, B. M.* Power generation enhancement in a salinity-gradient solar pond power plant using thermoelectric generator / B. M. Ziapour, M. Saadat, V. Palideh, S. Afzal // *Energy Conversion and Management*. – 2017. – Vol. 136. – P. 283–293.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А



и затрат на обслуживание и запасные части. Интенсивность аварийных ситуаций определяется как отношение количества аварийных запусков к общему числу запуском дождевальной машины.

4.2. Изменение длины водораспределительного трубопровода на механическом приводе ДКШ-64 Волжанка, гидравлическом приводе ДМ «Фрегат» и электрическом приводе МДЭК «Кубань-ЛК1М» путем отсоединения секций.


4.3. Определение границ применения рассматриваемых систем энергообеспечения водораспределительного трубопровода путем резкого изменения одного из показателей.

**5. Заключение.** В результате реализации методики проверки параметров систем энергообеспечения водораспределительного трубопровода дождевальных машин ДКШ-64 «Волжанка», ДМ «Фрегат», МДЭК «Кубань-ЛК1М» и полученных данных механический привод стал наиболее эффективен при длине до  $l = 150$  м; гидравлический привод - при длине  $l = 180$  м; электрический привод при наибольшей длине трубопровода (максимальная экспериментальная длина  $l = 589$  м).


Полученные данные подтверждаются с теоретическими положениями.

От предприятия:

Мелиоратор

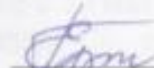
 Ибрагимов А. Б.

Главный бухгалтер

 Мехтиев М-Э. Л.

От университета:

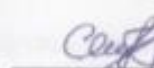
Руководитель - д.т.н., профессор

 Ерошенко Г. П.

Руководитель - д.т.н.,

 Соловьев Д. А.

Исполнитель - к.т.н., доцент

 Бакиров С. М.

Исполнитель - к.т.н.,

 Зиниев Ш. З.

Исполнитель - аспирант

 Елисеев С. С.



Индивидуальный предприниматель  
ГЛАВА КРЕСТЬЯНСКОГО (ФЕРМЕРСКОГО) ХОЗЯЙСТВА  
Вязовов Виктор Владимирович

ИНН 641200731587

ОГРНИП 304644634300110

Саратовская область, Екатериновский район, село Новоселовка

«УТВЕРЖДАЮ»

ИП Глава К(Ф)Х

В. В. Вязовов

«30» сентября 2020 г.

**АКТ**

**О ВНЕДРЕНИИ ЗАКОНЧЕННОЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ,  
ОПЫТНО-КОНСТРУКТОРСКОЙ РАБОТЫ**

Мы, ниже подписавшиеся, глава крестьянского (фермерского) хозяйства Вязовов В. В. и представители ФГБОУ ВО Саратовского ГАУ доктор технических наук Соловьев Д. А., доценты Бакиров С. М., Камышова Г. Н., аспирант Елисеев С. С. составили настоящий акт о том, что в условиях сельскохозяйственного предприятия ИП Глава К(Ф)Х Вязовов В. В. внедрены результаты научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы «Повышение энергетической эффективности дождевальных машин кругового действия обоснованием способов и средств энергосбережения», выполненных в ФГБОУ ВО Саратовском ГАУ. В результате проведенной законченной работы получены следующие научно-технические результаты:

1. Рекомендации по применению алгоритма и программы выбора оптимальной системы энергоснабжения дождевальных машин кругового действия в различных условиях эксплуатации.

2. Технические и технологические способы повышения энергетической эффективности дождевальных машин кругового действия путем изменения диаметра трубопровода, параметров движителей опорных тележек; совершенствования аккумуляторного источника питания; разработки устройств динамической компенсации реактивной мощности для электродвигателей переменного тока, определения угла поворота секции;

схемы логического управления движением; адаптивной системы управления потребляемой мощностью электроприводами опорных тележек, которые в совокупности позволяют снизить энергопотребление дождевальная машины на 28,3-39,8 %.

3. Ожидаемый экономический эффект от внедрения способов и средств энергосбережения составит около 2 млн. руб.

От предприятия:  
ИП Глава К(Ф)Х



Вязовов В. В.

От университета:

Руководитель – Врио ректора д.т.н.,  
доцент

Соловьев Д. А.

Исполнитель – к.т.н., доцент

Бакиров С.М.

Исполнитель – к.ф.-м.н., доцент

Камышова Г. Н.

Исполнитель – аспирант

Елисеев С. С.



«УТВЕРЖДАЮ»

Директор ООО «НАШЕ ДЕЛО»

С. В. Ботов

«22» июля 2020 г.



### АКТ

#### производственных испытаний дождевальных машин кругового действия

Комиссия в составе представителя ООО «НАШЕ ДЕЛО»: инженера по эксплуатации мелиоративных систем Мещенкова В. Н. и представителей ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет имени Н. И. Вавилова»: Врио ректора, доктора технических наук, доцента Соловьева Д. А., кандидатов технических наук, доцентов Бакирова С. М., Левина М. А., кандидата физико-математических наук, доцента Камышовой Г. Н., аспиранта Елисеева С. С. составила настоящий акт на производственные испытания 75 единиц дождевальных машин кругового действия, эксплуатируемых в различных условиях для выбора оптимальной системы энергоснабжения по критерию наименьшего энергопотребления.

Испытания проводились в период с 19 июля 2018 по 21 июля 2020 г. на 42 единицах дождевальных машин в Энгельсском районе и 33 единицах дождевальных машин в Марксовском районе Саратовской области.

В ходе проведения производственных испытаний получены следующие результаты:

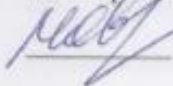
- 24 единицы дождевальных машин кругового действия эксплуатируются с завышенным энергопотреблением на 17...42 %;
- разработаны рекомендации по оснащению оптимальными системами энергоснабжения для энергозатратных дождевальных машин;

- ожидаемый эффект от применения оптимальных систем энергоснабжения дождевальных машин кругового действия оценивается в диапазоне 20-40% снижения энергопотребления;

- прогнозируемый экономический эффект составит около 1,5 млн. рублей в год со сроком окупаемости менее 3 лет при дополнительных капитальных вложениях 3,6 млн. рублей.

От предприятия:

Инженер по эксплуатации  
мелиоративных систем

 В. Н. Мещенков

От университета:


Руководитель – Врио ректора д.т.н.,  
доцент

 Соловьев Д. А.

Исполнитель – к.т.н., доцент

 Бакиров С.М.

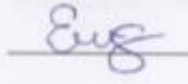
Исполнитель – к.т.н., доцент

 Левин М.А.

Исполнитель – к.ф.-м.н., доцент

 Камышова Г. Н.

Исполнитель – аспирант

 Елисеев С. С.

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор ООО «НАШЕ ДЕЛО»

С. В. Ботов

«14» августа 2020 г.

**АКТ**

**производственных испытаний дождевальной машины кругового действия на аккумуляторном источнике питания**

Комиссия в составе представителя ООО «НАШЕ ДЕЛО» инженера по эксплуатации мелиоративных систем Мещенкова В. Н. и представителей ФГБОУ ВО Саратовского ГАУ: руководителя - Врио ректора Соловьева Д. А. и исполнителей доцентов Бакирова С. М., Камышовой Г. Н., аспиранта Елисеева С. С. составила настоящий акт на производственные испытания дождевальной машины кругового действия на аккумуляторном источнике питания, разработанной в ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ доцентами С. М. Бакировым, Г. Н. Камышовой и аспирантом Елисеевым С. С. на основании результатов научного исследования обеспечения требуемой продолжительности движения дождевальной машины на аккумуляторном источнике питания с использованием солнечных батарей.

Испытания проводились в период с 19 июля 2020 по 18 августа 2020 г.

Производственная проверка дождевальной машины кругового действия на аккумуляторном источнике питания с использованием солнечных батарей показала работоспособность и надежность движения в полевых условиях, а также высокую энергетическую эффективность машины.

В результате получено:

1. Продолжительность работы дождевальной машины на аккумуляторном источнике питания соответствует данным научной работы и на 1,0–12,0 % больше обеспечивает последовательное соединение стандартных тяговых аккумуляторных батарей.


2. Использование солнечных батарей для заряда аккумуляторов исключает потребность в дополнительном источнике питания и исключает затраты на электроэнергию, требуемую на движение дождевальной машины.

3. Подтверждено, что в режиме работы электропривода опорной тележки крайней секции ДМ  $PВ\% = 100\%$  для полного заряда АКБ потребуется 5 дней, а при  $PВ\% = 10\%$  – 1 день.

4. Ожидаемый экономический эффект внедрения аккумуляторного источника питания с использованием солнечных батарей составит ориентировочно 1,6 млн. руб. в год на 20 единиц дождевальных машин кругового действия.

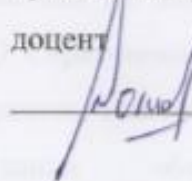
От предприятия:

Инженер по эксплуатации  
мелиоративных систем


 В. Н. Мещенков

От университета:

Руководитель – Врио ректора д.т.н.,  
доцент

 Соловьев Д. А.

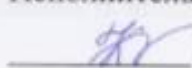
Исполнитель – к.т.н., доцент

 Бакиров С.М.

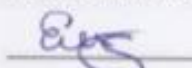
Исполнитель – к.т.н., доцент

 Левин М.А.

Исполнитель – к.ф.-м.н., доцент

 Камышова Г. Н.

Исполнитель – аспирант

 Елисеев С. С.



## АКТ

**внедрения и реализация программы поиска оптимальной системы энергоснабжения дождевальных машин кругового действия предприятия на основе структуры энергопотребления**

**1. Общие положения.** Комиссия в составе специалистов: ведущего инженера по эксплуатации систем орошения В. В. Рубанова, исполнительного директора Кутового Д. В. предприятия ООО «АПК» Райгород» и представителей ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет им Н.И. Вавилова» в составе руководителя Д. А. Соловьева и исполнителей С. М. Бакирова, М. А. Левина, и С. С. Елисеева установила, что в период с 01.08.2018 г. по 01.11.2019 г. на базе предприятия ООО «АПК» Райгород» (Волгоградская область) проводилось внедрение и реализация программы поиска наилучшей системы энергообеспечения и обработке данных о структуре энергопотребления ресурсов дождевальных машин кругового действия с электрическим приводом Valley – 18 шт.

**2. Место проведения.**

Юридический адрес организации: 404173, РФ, Волгоградская область, Светлоярский район, село Райгород, ул. Промышленная, д. 1.

Фактический адрес: 404173, РФ, Волгоградская область, Светлоярский район, село Райгород, ул. Промышленная, д. 1.

**3. Цель проверки.** Предлагаемый алгоритм и программа поиска эффективной системы энергообеспечения ходовой части дождевальных машин относительно показателя энергопотребления на основе агротехнических данных и типа привода ходовой части (гидравлический, механический, электрический). В качестве сравнительных показателей принимаются показатели удельной мощности  $k_1$ , показатели коэффициента полезного действия  $k_2$ , показатели стоимостей комплектов приводов  $k_3$ , показатели надежности комплектов приводов  $k_4$ , показатели массы комплектов приводов  $k_5$ , поливная норма  $z_1$ , площадь поливного участка  $z_2$ , давления потока жидкости на входе в дождевальную машину  $z_3$ , удаленностей от централизованного энергоснабжения  $z_4$  и водоема  $z_5$ , прироста прибыли от полива  $z_6$ , диаметры трубопроводов  $d$ , стоимости ресурса  $ц_p$ , трудоемкости работ  $t_{1m}, t'_{1m}, t_{100}$ ; плотности поливной воды  $\rho_0$




Показатели дождевальных машин		Исследуемые дождевальные машины предприятия								
Обозначение	Ед-ца измерения	Valley №1-2	Valley №3-5	Valley №6	Valley №7-9	Valley №10-11	Valley №12	Valley №13-14	Valley №15-16	Valley №17-18
$V_{гр}$	млн.руб. * кВт*ч	6,17	6,23	8,93	6,39	7,12	8,03	7,11	7,65	7,31
Соответствие эффективной системе энергообеспечения		Соотв.	Соотв.	Не соотв.	Соотв.	Соотв.	Не соотв.	Соотв.	Соотв.	Соотв.
Наилучшая система энергообеспечения в агротехнических условиях		Электропривод с кабельной линией	Электропривод с кабельной линией	Электропривод с аккумулятор- питанием	Электропривод с кабельной линией	Электропривод с кабельной линией	Электропривод с кабельной линией	Электропривод с кабельной линией	Электропривод с кабельной линией	Электропривод с кабельной линией


Полученные данные подтверждаются с теоретическими положениями.

От предприятия:

Ведущий инженер по эксплуатации  
систем орошения

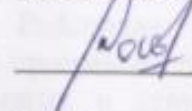
 В.В. Рубанов

Исполнительный директор

 Д.В. Кутовой

От университета:

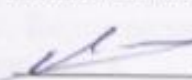
Руководитель - д.т.н., доцент

 Соловьев Д. А.

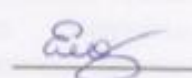
Исполнитель – к.т.н., доцент

 Бакиров С.М.

Исполнитель – к.т.н., доцент

 Левин М. А.

Исполнитель – аспирант

 Елисеев С. С.

«СОГЛАСОВАНО»

И.о. проректора по научной  
и инновационной работе

И.Д. Воротников

«19» октября 2020 г.

М.П.



«УТВЕРЖДАЮ»

Директор

ООО «Мелиоративные машины»

С. В. Гомберг

«19» октября 2020 г.

М.П.

**АКТ**

**о внедрении законченной научно-исследовательской  
и опытно-конструкторской работы**

Мы, ниже подписавшиеся, представитель ООО «Мелиоративные машины» директор С. В. Гомберг и представители ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет им Н.И. Вавилова»: доктора технических наук, доцента Д. А. Соловьев, кандидаты технических наук, доценты С. М. Бакиров, М. А. Левин, кандидат физико-математических наук, доцент Г. Н. Камышова и аспирант С. С. Елисеев составили настоящий акт о том, что в период с 01.08.2018 г. по 18.10.2020 г. проведена научно-исследовательская и опытно-конструкторская работа на тему «Повышение энергетической эффективности дождевальных машин круговых электрифицированных «КАСКАД» за счет разработки и внедрения способов и средств энергосбережения» в полном объеме.

Работа выполнена по следующим направлениям:

- влияние изменения диаметра водораспределительного трубопровода для одной секции длиной 59,5 м и дождевальной машины в целом длиной 357 м на потребление энергии;



- влияние изменения колес (жестких и на пневматических шинах) опорных тележек для одной секции и дождевальной машины в целом на энергопотребление;
- влияние устройств динамической компенсации реактивной мощности электродвигателей, определения пространственного положения секции, схем управления движением дождевальной машины на энергопотребление.

Эффективность предложенных способов и средств энергосбережения в дождевальных машинах подтверждается снижением энергопотребления на 20–40%, а ожидаемый экономический эффект оценивается в 1,1–1,3 млн. руб.

От предприятия:  
Директор



С. В. Гомберг

От университета:  
Руководитель – д.т.н., доцент

Соловьев Д. А.

Исполнители – в.т.н., доцент

Бакиров С.М.

К.т.н., доцент

Левин М. А.

К.ф.-м.н., доцент

Камышова Г. Н.

Аспирант

Елисеев С. С.

## РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 189495

**Автономная электрифицированная секция дождевальной  
машины кругового действия**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
"Саратовский государственный аграрный университет  
имени Н.И. Вавилова" (RU)*

Авторы: *Бакиров Сергей Мударисович (RU), Ерошенко Геннадий  
Петрович (RU), Трушкин Владимир Александрович (RU),  
Соловьев Дмитрий Александрович (RU), Елисеев Сергей  
Сергеевич (RU)*

Заявка № 2019103591

Приоритет полезной модели 08 февраля 2019 г.

Дата государственной регистрации в  
Государственном реестре полезных  
моделей Российской Федерации 24 мая 2019 г.

Срок действия исключительного права  
на полезную модель истекает 08 февраля 2029 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Г.П. Излиев



## РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2707919

**Устройство определения угла поворота секции  
дождевальная машины кругового действия**

Патентообладатель: **Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
"Саратовский государственный аграрный университет  
имени Н.И. Вавилова" (RU)**

Авторы: **Бакиров Сергей Мударисович (RU), Ерошенко Геннадий  
Петрович (RU), Трушкин Владимир Александрович (RU),  
Соловьев Дмитрий Александрович (RU), Елисеев Сергей  
Сергеевич (RU)**

Заявка № 2019103602

Приоритет изобретения 08 февраля 2019 г.

Дата государственной регистрации в

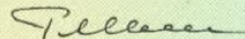
Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 02 декабря 2019 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 08 февраля 2039 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ивлиев

