

*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

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Саратов 2022

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

**Научный руководитель** – доктор технических наук, доцент  
**Бакиров Сергей Мударисович**

**Официальные оппоненты:** **Шерьязов Сакен Койшыбаевич**, доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный аграрный университет», профессор кафедры «Энергообеспечение и автоматизация технологических процессов»

**Бастрон Андрей Владимирович**, кандидат технических наук, доцент ФГБОУ ВО «Красноярский государственный аграрный университет», доцент, заведующий кафедрой «Электроснабжение сельского хозяйства»

**Ведущая организация** – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ставропольский государственный аграрный университет» (г. Ставрополь).

Защита состоится «\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 года в \_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 220.061.03 на базе ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет им. Н.И. Вавилова» по адресу: 410056, г. Саратов, ул. Советская, 60, ауд. 325.

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

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

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

**Ученый секретарь  
диссертационного совета**



**Василий Васильевич Чекмарев**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснованы актуальность решаемой научной задачи, научная новизна, практическая значимость, поставлена цель, сформулированы задачи исследований, научные положения и результаты исследований, выносимые на защиту.

**В первой главе «Анализ условий применения автономной системы электроснабжения с солнечными и аккумуляторными батареями для дождевальнoй машины кругового действия»** проанализированы особенности эксплуатации электрифицированной дождевальнoй машины кругового действия, рассмотрены условия применения солнечных батарей в Саратовской области, выявлены особенности вентильно-индукторного электродвигателя и описаны режимы орошения электрифицированными дождевальными машинами кругового действия.

Эксплуатация аккумуляторных батарей для передвижных электрифицированных машин описана в ряде работ, однако в известных работах закономерности влияния параметров источника с солнечными и аккумуляторными батареями на характеристики электропривода опорной тележки секции подробно не представлены; данные по эксплуатации солнечных батарей также не приведены. В работе уделено внимание применению солнечных батарей как источника электроснабжения электрифицированной дождевальнoй машины кругового действия. Под автономной системой электроснабжения электрифицированной дождевальнoй машины кругового действия (ЭДМКД) подразумевается автономная система электроснабжения электропривода опорной тележки секции ЭДМКД. Дальнейшие рассуждения приведены на примере одной секции ЭДМКД, представляющей собой совокупность конструктивно одинаковых секций.

Применение солнечных батарей в качестве источника электроснабжения аккумуляторных батарей и электропривода секции дождевальнoй машины возможно лишь на территориях с высокой энергетической экспозицией. Проведена оценка энергетической экспозиции в диапазоне широт от 49°52' до 52°42' с.ш. в период с марта по сентябрь. Средние значения удельной энергетической экспозиции представлены на рисунке 1.

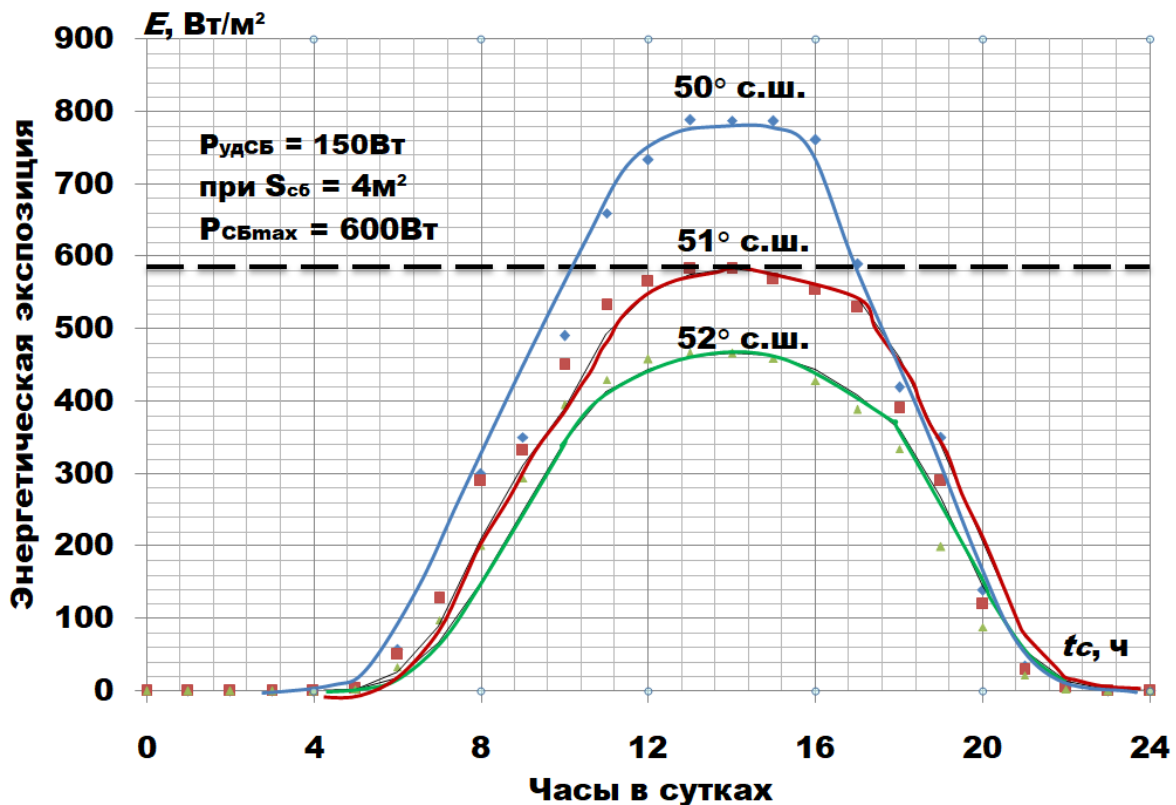


Рисунок 1 – Средние значения энергетической экспозиции в период измерений март – сентябрь

Согласно рисунку 1, на широте  $51^\circ$  с.ш. (г. Саратов, г. Воронеж, г. Курск) энергетическая экспозиция достигает значения  $582 \text{ Вт/м}^2$ . При данной энергетической экспозиции солнечная батарея площадью  $1 \text{ м}^2$  и КПД  $20\%$  имеет пиковую мощность  $150 \text{ Вт}$ . Получая  $150 \text{ Вт}$  электрической мощности с  $1 \text{ м}^2$ , использование СБ площадью  $4 \text{ м}^2$  с максимальной мощностью  $600 \text{ Вт}$  приемлемо для обеспечения рабочего цикла электропривода секции с вентильно-индукторным двигателем.

Использование солнечных батарей приемлемо для вентильно-индукторных двигателей постоянного тока, в комплекте которых имеется контроллер, позволяющий корректировать потребляемую мощность нестабильного источника.

Время эксплуатации ЭДМКД различно. Полив назначают в зависимости от нескольких показателей: влажности почвы, наличия поливной воды в канале (водоёме). Необходимо также определить тариф на воду именно в тот момент, когда нужно поливать, поскольку тариф может меняться в течение суток. Исходя из этого 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. График поливов культур УНПО «Поволжье» представлен на рисунке 3.

Тариф на воду меняется в зависимости от тарифа на электрическую энергию. В мелиорации достаточно большое сезонное потребление электроэнергии (до  $100 \text{ тыс. кВт}\cdot\text{ч}$  в день), и покупка электроэнергии осуществляется на открытом рынке (фондовом или срочном) в режиме реального времени (рисунок 2).

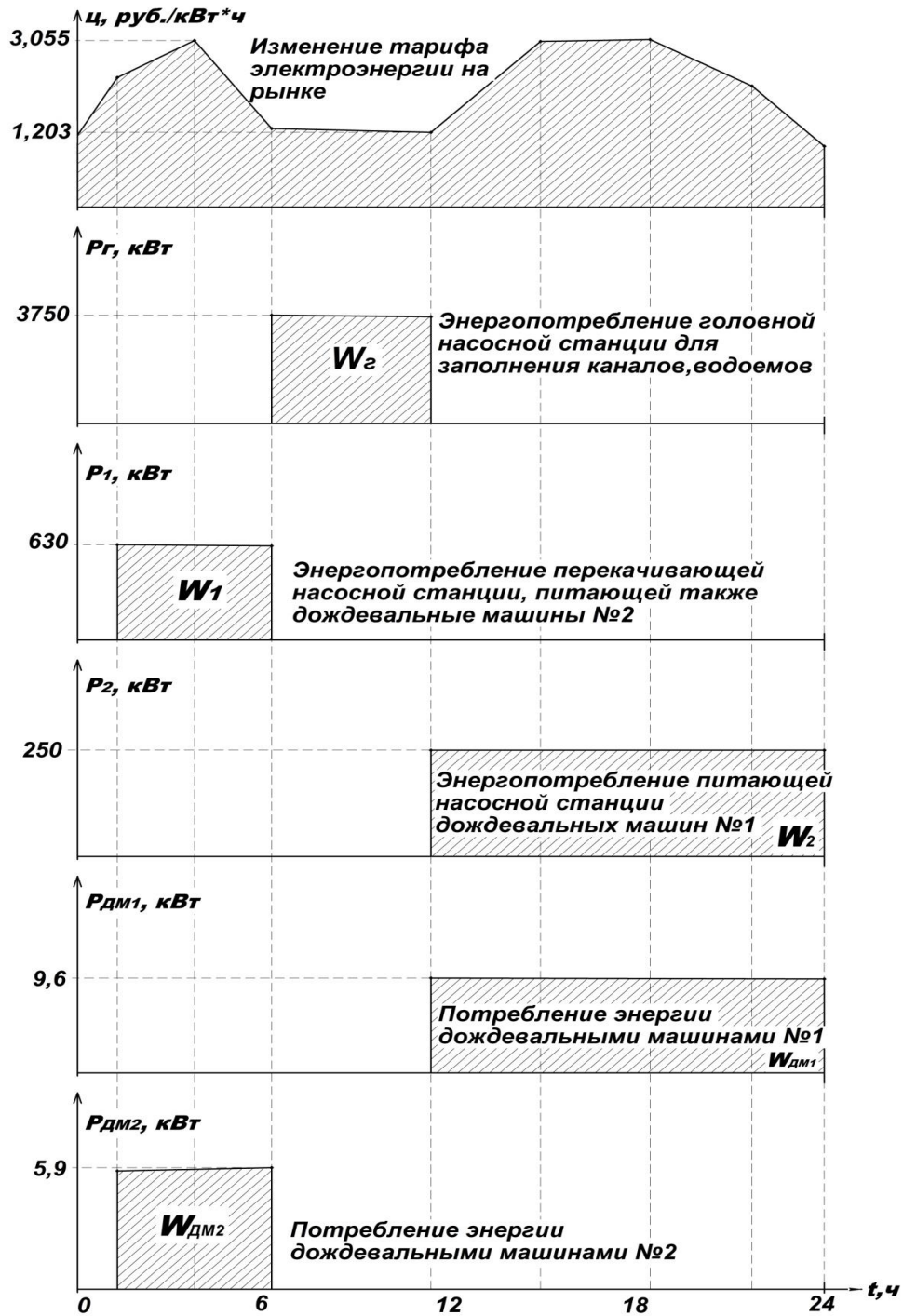


Рисунок 2 – Диаграмма примера энергопотребления насосных станций и дождевальных машин: ц – цена электроэнергии на рынке, руб./кВт·ч;  $P_1$  – мощность головной насосной станции, кВт;  $P_2$  – мощность питающей насосной станции, кВт;  $P_{дм1}$  – мощность дождевальных машин 1, кВт;  $P_{дм2}$  – мощность дождевальных машин 2, кВт

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 3 – Неукомплектованный график поливов культур УНПО «Поволжье» 2021 г.: 1,2,3 – декады месяца



На рисунке 3 видно, что между поливами имеются перерывы. В перерывах между поливами дождевальная машина простаивает, как и в периоды, когда влажность почвы является минимально допустимой, например, в период дождливой погоды. Промежутки времени между поливами достаточны для заряда аккумуляторных батарей.

Совместное применение САБ и вентиляльно-индукторных электродвигателей для опорных тележек секций дождевальной машины кругового действия в различных вариантах полива (ночной, дневной) ограничено отсутствием научно обоснованных параметров автономного источника электроснабжения. Решение данной задачи и реализация автономного электроснабжения ДМ с САБ позволит получить экономию финансовых ресурсов.

Во второй главе «Обоснование автономной системы электроснабжения секции дождевальной машины кругового действия с солнечными и аккумуляторными батареями» представлена структура автономной системы электроснабжения секции дождевальной машины; обоснованы зависимость продолжительности работы электропривода секции дождевальной машины кругового действия от параметров источника на САБ, рабочие процессы электроснабжения секции дождевальной машины от солнечных и аккумуляторных батарей и условия обслуживания СБ.

Объектом исследования являются автономная система электроснабжения, отдельные элементы которой расположены на секции ДМ, а также электропривод опорной тележки секции дождевальной машины кругового действия (рисунок 4). Замена типового асинхронного двигателя с короткозамкнутой обмоткой ротора вентиляльно-индукторным двигателем в приводе опорной тележки проведена по упрощённой методике; нагрузка двигателя принята близкой к номинальной; предполагаемым изменением удельных энергетических показателей системы пренебрегали. Особенности взаимодействия колесного движителя опорной тележки с грунтом при анализе работы электропривода учитывали упрощённо. Блок-схема автономного электроснабжения для одной секции представлена на рисунке 5.

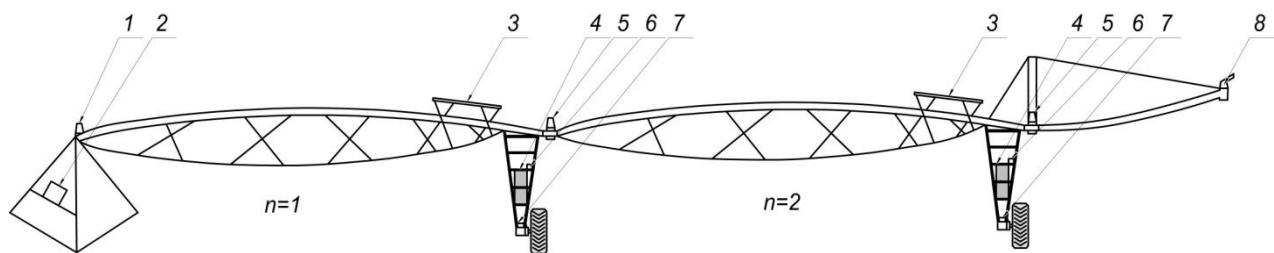


Рисунок 4 – Объект исследования – дождевальная машина с САБ (патент № 189495):  
 $n$  – количество секций,  $n = 2 \dots 10$ ; 1 – неподвижная опора; 2 – щит управления; 3 – СБ;  
 4 – АБ; 5 – ПСЛ; 6 – контроллер; 7 – электродвигатель;  
 8 – дальнеструйный водомет

Солнечная батарея снабжает электроэнергией как аккумуляторную батарею, так и электропривод через контроллер КК (см. рисунок 5). Проведем

анализ условий рабочего процесса автономного источника на примере одной секции на схеме замещения электрической цепи, изображенной на рисунке 6.

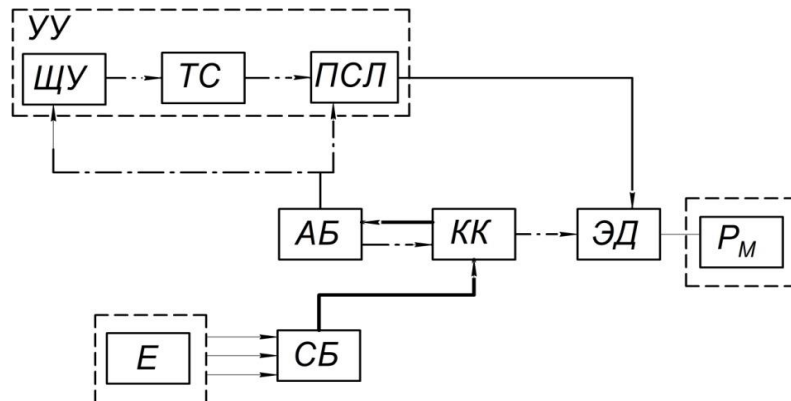


Рисунок 5 – Блок-схема автономной системы электроснабжения электрифицированной секции дождевальная машины кругового действия: УУ – устройство управления; ЩУ – щит управления; ТС – токосъемник, ПСЛ – прибор синхронизации движения в линию; АБ – аккумуляторная батарея; КК – контроллер, ЭД – вентильно-индукторный электродвигатель; СБ – солнечная батарея; РМ – движитель; Е – энергетическая экспозиция

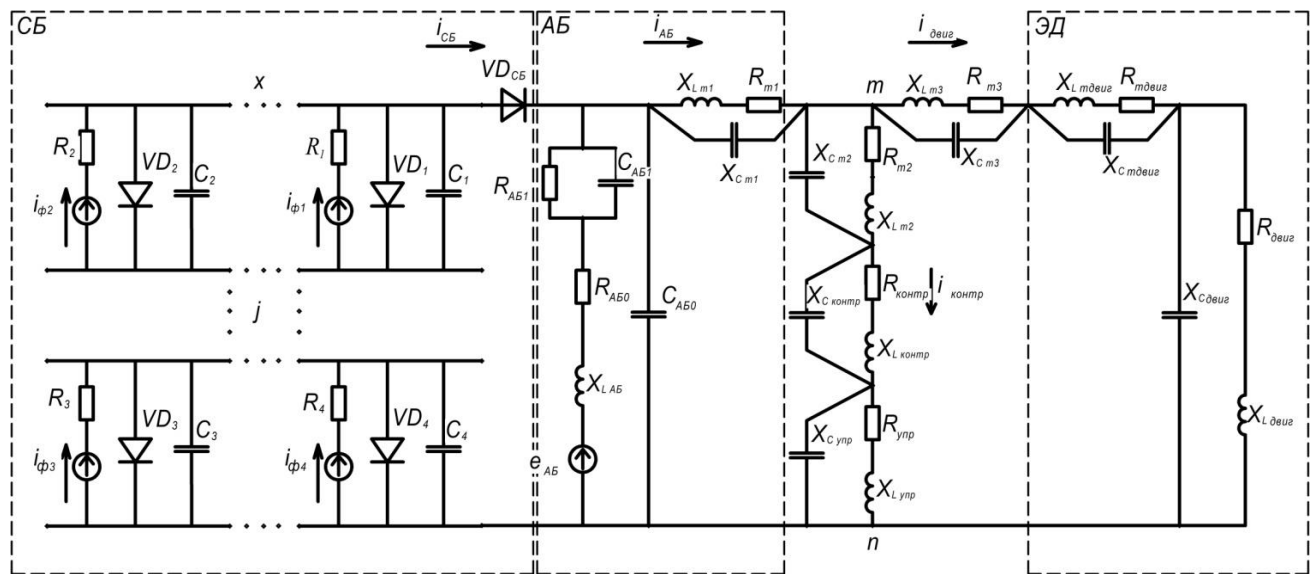
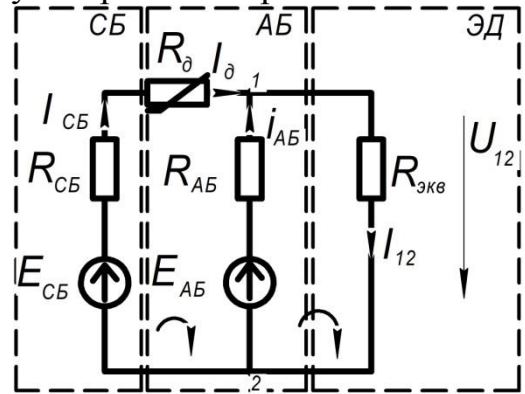


Рисунок 6 – Схема замещения системы электроснабжения секции ДМ с САБ:  
 $x, j$  – соответственно последовательно и параллельно соединенные солнечные элементы, шт.;  
 $i_{\phi 1-4}$  – фототок, протекающий по СБ, А;  $R_{1-4}$  – внутреннее сопротивление СБ, Ом;  $VD_{1-4}$  – диоды цепи СБ;  $C_{1-4}$  – емкость СБ, Ф;  $VD_{СБ}$  – диод между цепями СБ и АБ;  $i_{СБ}, i_{АБ}, i_{двиг}, i_{контр}$  – суммарный ток от СБ, АБ, от цепи двигателя и от цепи контроллера соответственно, А;  $R_{АБ0-1}, R_{m1-3}, R_{контр}, R_{упр}, R_{тдвиг}$  – сопротивление АБ, проводников, контроллера, устройства управления, проводников цепи двигателя соответственно, Ом;  $C_{АБ0-1}$  – емкости АБ, А·ч;  $X_{LАБ}, X_{Lm1-3}, X_{Lконтр}, X_{Lупр}, X_{Lдвиг}, X_{Lтдвиг}$  – индуктивное сопротивление АБ, проводников, контроллера, устройств управления, двигателя, проводников цепи двигателя соответственно, Ом;  $e_{АБ}$  – ЭДС АБ, В;  $X_{Cm1-3}, X_{Cконтр}, X_{Cупр}, X_{Cдвиг}, X_{Cтдвиг}$  – емкостное сопротивление проводников, контроллера, устройств управления, двигателя, проводников цепи двигателя соответственно, Ом;  $R_{двиг}$  – внутреннее сопротивление электродвигателя ДМ, Ом

Упростим схему замещения системы электроснабжения секции ДМ с САБ (рисунок 7).

Обоснуем параметры солнечных и аккумуляторных батарей.

Рисунок 7 – Упрощённая схема замещения системы энергоснабжения секции ДМ с САБ:  $R_{CB}$  – внутреннее сопротивление СБ, Ом;  $R_{экв}$  – эквивалентное сопротивление устройств защиты и автоматики, Ом;  $I_{12}$  – ток нагрузки, А;  $E_{CB}$  – ЭДС СБ, В;  $R_{\delta}$  – сопротивление цепи диода, Ом;  $I_{\delta}$  – ток диода, А;  $U_{12}$  – напряжение на зажимах 1 и 2, В;  $I_{CB}$  – ток солнечной батареи, А



Напряжение  $U_{12}$  на зажимах 1 и 2 (см. рисунок 7):

$$U_{12} = \frac{\frac{E_{CB}}{(R_{CB} + R_{\delta})} + \frac{E_{AB}}{R_{AB}}}{\frac{1}{R_{CB} + R_{\delta}} + \frac{1}{R_{AB}} + \frac{1}{R_{экв}}}. \quad (1)$$

Обозначим нагрузку  $P_{12}$  на зажимах 1 и 2:

$$P_{12} = U_{12} I_{12}, \quad (2)$$

где  $I_{12}$  – ток нагрузки, А.

С учетом (1) выражение (2) примет вид:

$$P_{12} = \left( \frac{\frac{E_{CB}}{(R_{CB} + R_{\delta})} + \frac{E_{AB}}{R_{AB}}}{\frac{1}{R_{CB} + R_{\delta}} + \frac{1}{R_{AB}} + \frac{1}{R_{экв}}} \right) I_{экв}. \quad (3)$$

Преобразуем полученное выражение (3) с учетом энергетических показателей САБ:

$$P_{12} t = \frac{W_{CB} + W_{AB}}{2 + G}, \quad (4)$$

где  $t$  – продолжительность работы электропривода, ч;  $W_{CB}$  – энергия СБ, кВт·ч;  $W_{AB}$  – энергия АБ, кВт·ч;  $G$  – отношение эквивалентной проводимости устройств защиты и автоматики к проводимости в цепи САБ.

Энергию солнечной батареи  $W_{CB}$  определим по формуле:

$$W_{CB} = \int_0^t e_{CB} i_{CB} \sin\left(\frac{2\pi}{T} dt + A\right) \left(1 - k_{\gamma} \sin\left(\frac{2\pi}{T_1} dt + A\right)\right) dt, \quad (5)$$

где  $e_{CB}$  – ЭДС СБ, соединенных последовательно и параллельно, В;  $i_{CB}$  – ток СБ в точке максимальной мощности, А;  $T$  – продолжительность суток,

ч,  $T = 24$  ч;  $t$  – продолжительность цикла полива ДМ, ч;  $A$  – угол между вектором Пойнтинга и нормалью к СБ, рад.;  $k_\gamma$  – коэффициент, учитывающий снижение мощности от рассеяния;  $T_1$  – продолжительность светового дня, ч.

Энергия заряженной аккумуляторной батареи номинальной емкостью  $C_H$  (А·ч):

$$W_{AB} = E_{AB}C_H(1 - k_{AB}), \quad (6)$$

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

Электроснабжение нагрузки от СБ обеспечивается в дневное время суток, когда ток в точке максимальной мощности СБ больше или равен току нагрузки. Полагаем, что источник энергетического излучения точечный; взаимное пространственное положение объектов «источник излучения – приемник» и их энергетическое взаимодействие на интервале облучения приемника определим на основе вектора Пойнтинга. Электрический режим СБ устанавливаем в окрестностях точки ВАХ, соответствующей максимальной мощности СБ. Изменение характеристик СБ, обусловленное их нагревом, не учитываем.

Преобразовав выражения (5) и (6), подставим их в (4) и получим систему уравнений, описывающую параметры автономной системы электроснабжения электропривода для различных вариантов коммутации САБ с электроприводом секции ДМ:

- без аккумуляторных батарей (дневной полив):

$$\left. \begin{aligned} U_{12} &= E_{CB} = E_{AB}; \\ W_{AB} &= 0; \\ \frac{P_{CB \max}}{P_{12}} &> 1, 0; \\ \frac{P_{CB \max}}{P_{12}} &= \left( \frac{P_{UCB \max} S}{2P_{12}} \sin \left[ \frac{2\pi}{T} t + A \right] + \frac{P_{UCB \max}}{2P_{12}} \right) \left( 1 - \left[ \frac{k_\gamma}{2} \sin \left( \frac{2\pi}{T_1} t + A \right) + \frac{k_\gamma}{2} \right] \right) \end{aligned} \right\}; \quad (7)$$

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

$$\left. \begin{aligned} U_{12} &= E_{CB} = E_{AB}; \\ W_{AB} &= \frac{P_{12} t (2 + G)(1 + k_w w)}{1 - k_{AB}}; \\ \frac{P_{CB \max}}{P_{12}} &> 1, 0; \\ \frac{P_{CB \max}}{P_{12}} &= \left( \frac{P_{UCB \max} S}{2P_{12}} \sin \left[ \frac{2\pi}{T} t + A \right] + \frac{P_{UCB \max}}{2P_{12}} \right) \left( 1 - \left[ \frac{k_\gamma}{2} \sin \left( \frac{2\pi}{T_1} t + A \right) + \frac{k_\gamma}{2} \right] \right) \end{aligned} \right\}, \quad (8)$$

где  $P_{CB \max}$  – максимальная мощность, вырабатываемая солнечной батареей, горизонтально установленной на водопроводящем трубопроводе ДМ (см. рисунок 2), Вт;  $P_{UCB \max}$  – удельная максимальная мощность, вырабатываемая 1 м<sup>2</sup> СБ,

Вт/м<sup>2</sup>;  $k_w$  – 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 выражений (7) и (8), получим графические решения параметров автономной системы электроснабжения (рисунки 8 и 9).

Рисунок 8 – 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

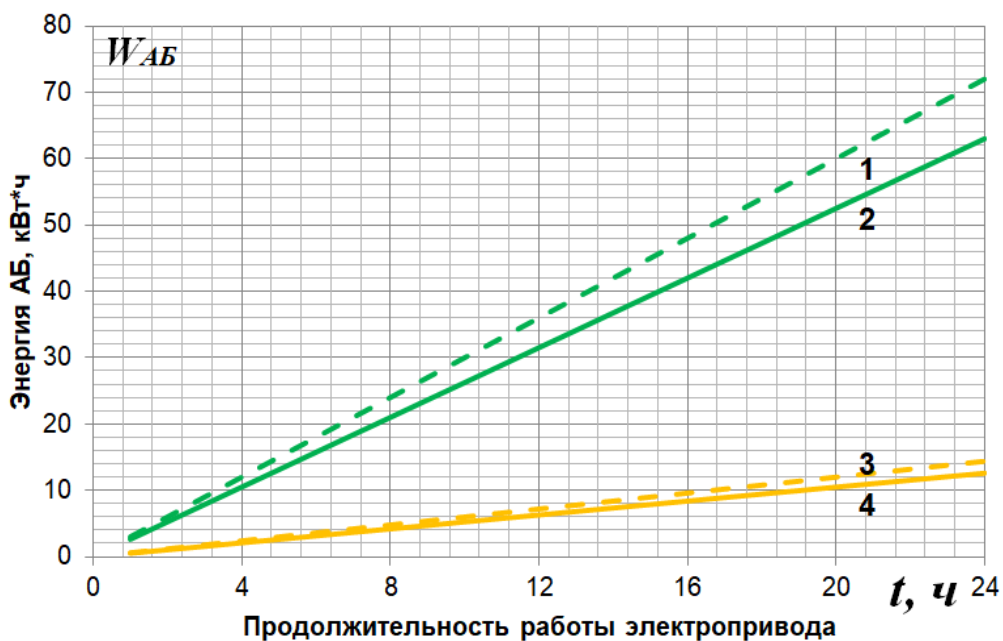
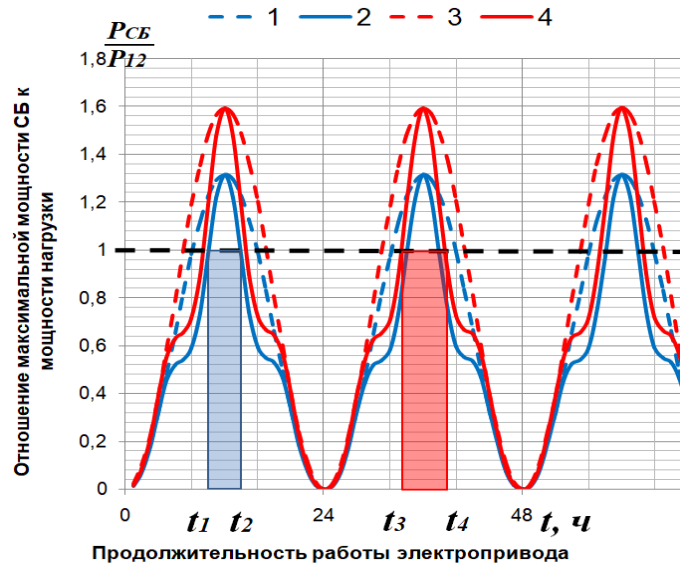


Рисунок 9 – Зависимость энергии АБ от продолжительности работы электропривода при числе пусков  $w = 100$  (1 – при коэффициентах  $k_{AB} = 0,3$ ,  $k_w = 0,05$ ; 2 –  $k_{AB} = 0,2$ ,  $k_w = 0,05$ ; 3 –  $k_{AB} = 0,3$ ,  $k_w = 0,002$ ; 4 –  $k_{AB} = 0,2$ ,  $k_w = 0,002$ )

Если максимальная мощность  $P_{CB}$ , вырабатываемая солнечной батареей, составляет 600 Вт (синяя линия на рисунке 8) 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 электроснабжение электропривода этой секции обеспечивается в интервале времени от  $t_1$  до  $t_2$ . При использовании солнечной батареи с большей максимальной мощностью ( $P_{CB} = 720$  Вт)

продолжительность электроснабжения от СБ увеличивается на 2,4 ч, или в 1,4 раза, в интервале времени от  $t_3$  до  $t_4$  (красная линия на рисунке 8).

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 9). Если же пусковые процессы более энергоемкие ( $k_w = 0,05$ ), то для электроснабжения электропривода секции потребуется в 5 раз больше энергии АБ, чем в первом случае (зеленая линия на рисунке 9) при средней мощности нагрузки  $P_{12} = 500$  Вт.

Применив систему уравнений (8) для ДМ, состоящей из  $n$  секций, параметры СБ получим из условия:

$$\frac{P_{СБ}}{nP_{12}} \geq 1,0, \quad (9)$$

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

$$W_{АБ} = \frac{P_{12}(2+G)t \left[ \frac{n+1}{2} \right] \left( 1 + k_w \left[ w_n + \frac{n360^\circ}{(n-1)\varphi} \right] \right)}{1 - k_{АБ}}, \quad (10)$$

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 элементов системы электроснабжения и нагрузки в течение рабочего цикла, который определяется по графику полива, занятости насосной станции и других технологических особенностей (рисунок 10).

Рассмотрим варианты взаимной коммутации элементов системы электроснабжения и нагрузки:

*1-й вариант* – подключение СБ через контроллер к электроприводу секции ДМ, когда время включения ДМ совпадает с началом светового дня в данном географическом месте работы ДМ (рисунок 10, *а* – дневное время);

*2-й вариант* – подключение, при котором продолжительность работы электропривода ДМ обеспечивается от АБ, а заряд АБ осуществляется при помощи СБ в свободные от полива промежутки времени (рисунок 10, *б* – простой ДМ между ночными поливами);

*3-й вариант* – параллельное подключение САБ к электроприводу ДМ – СБ частично обеспечивает электроснабжение, а остальную часть – АБ (рисунок 10, *в* и *г* – данные режимы можно использовать при пасмурной погоде).

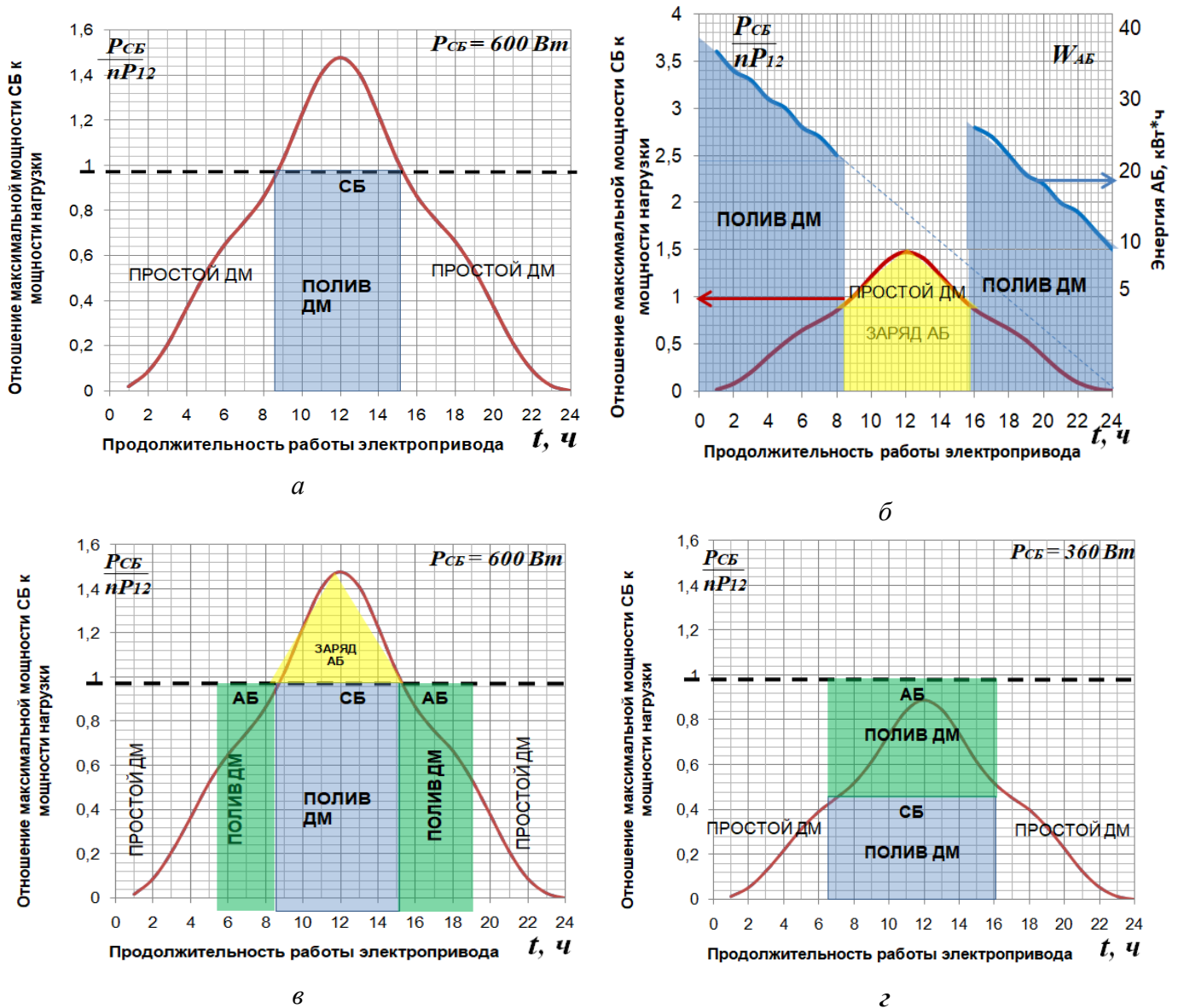


Рисунок 10 – Зависимость параметров автономной системы электроснабжения от вариантов коммутации элементов системы электроснабжения и нагрузки: *а* – дневной полив с использованием СБ без АБ; *б* – ночной полив с использованием АБ; *в* и *г* – варианты использования САБ при дневном поливе

Коммутация солнечных и аккумуляторных батарей соответствует буферному электрическому режиму СБ и АБ. Схемотехнические решения по обеспечению зарядного режима АБ от СБ в работе подробно не рассмотрены.

Для параллельной работы САБ на общую нагрузку используем контроллер режимов АБ, представленный на рисунке 11.

В случаях работы дождевальной машины в дневное время суток, когда СБ не обеспечивает требуемую максимальную мощность для работы электропривода, недостающая часть мощности выделяется от АБ (вариант 3 на рисунке 10, *г*) с помощью блока ШИМ-регулятора (см. рисунок 11).

В момент простоя дождевальной машины контроллером предусмотрена схема для заряда аккумуляторных батарей.

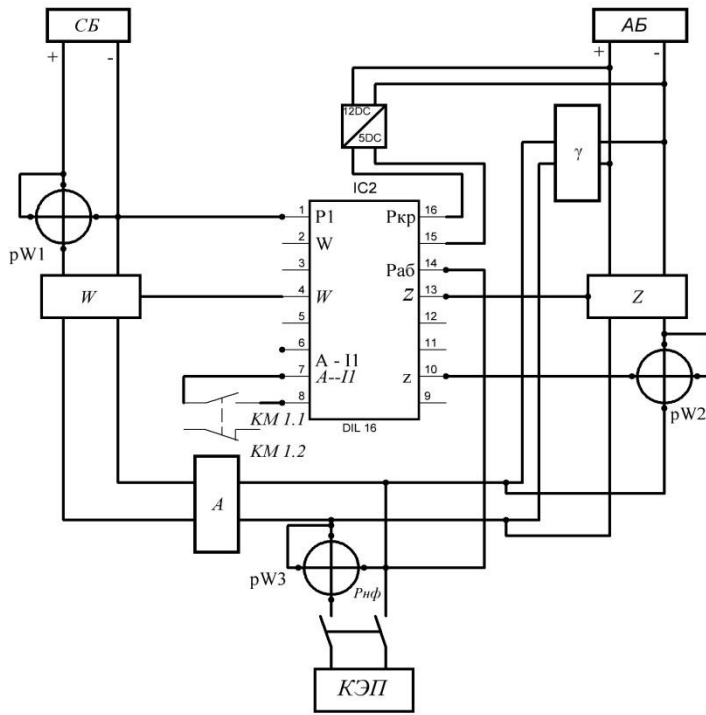


Рисунок 11 – Электрическая схема соединений выводов микропроцессорного устройства контроля и регулирования мощности: *W* – устройство регулирования мощности СБ; *Z* – устройство регулирования мощности нагрузки от аккумуляторной батареи; *КМ* – переключатель на два положения; *А* – устройство контроля тока СБ; *КЭП* – контроллер электропривода; *12DC/5DC* – блок энергоснабжения микропроцессора; *P1* – мощность СБ; *P<sub>нр</sub>* – номинальная расчетная мощность; *P<sub>аб</sub>* – мощность АБ; *P<sub>нф</sub>* – номинальная фактическая мощность;  $\gamma$  – контроллер заряда АБ; *pW1*, *pW2*, *pW3* – измерители мощности

Солнечные батареи в процессе эксплуатации ДМ загрязняются, что влияет на их электрическую мощность. Введем коэффициент снижения мощности  $k_{СБ}$ , который показывает отношение мощности загрязнённой солнечной батареи  $P_3$  к мощности чистой  $P_ч$ :

$$k_{СБ} = \frac{P_3}{P_ч}. \quad (11)$$

При запылении солнечных батарей происходит недополучение электрической энергии нагрузкой. Учитывая потери от запыления (загрязнения), обеспечим максимальную мощность в этих условиях увеличением площади солнечных батарей или периодическим выполнением технического обслуживания (ТО) для очистки СБ:

$$l_{уд} > \frac{P'(1-k_{СБ})Ц_m}{2c_{тр}N^2t_{п}} - \frac{C_{ТО}}{2c_{тр}}, \quad (12)$$

где  $l_{уд}$  – удаленность дождевальная машины от пункта ТО, км;  $P'$  – дополнительная мощность СБ, кВт;  $Ц_m$  – цена единицы мощности СБ, руб./кВт;  $c_{тр}$  – стоимость транспортных расходов на выполнение технического обслуживания, руб./ч/км;  $N$  – число обслуживаний за период эксплуатации;  $t_{п}$  – периодичность выполнения технического обслуживания, ч;  $C_{ТО}$  – стоимость технического обслуживания, руб./ч.

С учетом условия (12) определим границы ТО от удалённости дождевальная машины (рисунок 12).



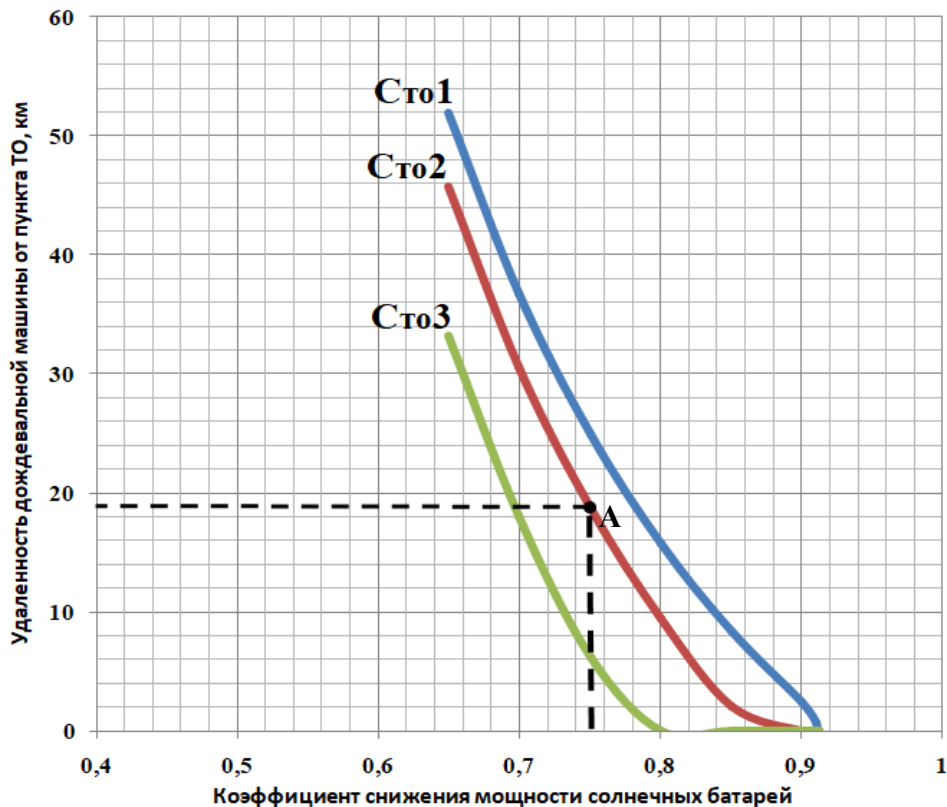


Рисунок 12 – Зависимость удаленности ДМ от пункта ТО и коэффициента снижения мощности СБ при загрязнении в процессе эксплуатации при различной стоимости ТО ( $C_{ТО}$ )

Границы на рисунке 12 позволяют выбрать способ технической эксплуатации ДМ с САБ (послеотказовый или планово-предупредительный). Правая часть от границы указывает на целесообразность послеотказового способа и выбор добавочной мощности СБ, а левая часть – на выполнение ТО, в том числе для чистки СБ от грязи и пыли. Например, при удаленности 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, стоимости транспортных расходов  $c_{тр} = 8$  руб./ч/км и коэффициенте снижения мощности  $k_{СБ} = 0,75$  находим точку A на рисунке 12. При стоимости ТО 50 руб./ч (синяя граница на рисунке 12) эта точка попадает в область выполнения ТО для чистки. Если же при тех же условиях эксплуатации стоимость ТО составит 100 руб./ч (красная граница на рисунке 12), то точка A попадает в область комплектования ДМ дополнительной площадью СБ перед началом поливного сезона.

В третьей главе «*Экспериментальные исследования автономной системы электроснабжения электропривода секции дождевальной машины кругового действия с солнечными и аккумуляторными батареями*» описана методика проведения экспериментов, представлены установки для проверки параметров автономной системы электроснабжения секции ДМ, а также полученные результаты экспериментальных исследований в полевых условиях на сельскохозяйственных предприятиях Саратовской области. Экспериментальная проверка результатов была

осуществлена на полноразмерной физической модели – одной опорной тележке секции ЭДМКД.

Для проведения полевых испытаний принята дождевальная машина кругового действия МДЭК «КАСКАД», расположенная в УНПО «Поволжье», состоящая из 6 секций. Характеристики машины и особенности энергопотребления по секциям представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Посекционное энергопотребление ДМ, состоящей из 6 секций

№ секции	Режим работы	$l_{\text{сек}}, \text{ м}$	$U_{\text{сек}}, \text{ м/ч}$	$S, \text{ м}$	$t_{\text{об}}, \text{ ч}$	$W_{\text{об}}, \text{ кВт}\cdot\text{ч}, (P_{\text{дв}} = 550 \text{ Вт})$
1	ПВ	65,25	226	410	1,81	0,45–0,99
2				820	3,62	0,9–1,9
3				1230	5,44	1,36–2,9
4				1640	7,25	1,8–3,9
5				2050	9,07	2,2–4,9
6	Д			2460	10,8	5,9–10,8

*Примечание.* Скорость перемещения секции определена частотой вращения электродвигателя  $n_{\text{дв}}, n_{\text{дв}} = 1750 \dots 2000 \text{ мин}^{-1}$ ;  $i$  – передаточное число,  $i = 2000$ ;  $l_{\text{сек}}$  – длина секции, м;  $U_{\text{сек}}$  – скорость движения секций, м/ч;  $S$  – расстояние, проходимое секцией за время полного оборота, м;  $t_{\text{об}}$  – продолжительность движения за один оборот секции, ч;  $W_{\text{об}}$  – энергопотребление секции за оборот, кВт·ч.

Перемещение секций ДМ осуществляется по системе синхронизации движения в линию. Из таблицы 1 видно, что электропривод крайней от неподвижной опоры секции потребляет максимальную мощность. За время полного оборота ДМ прием продолжительность движения крайней секции от неподвижной опоры, так как энергопотребление других секций ДМ пропорционально меньше.

Для проверки значений параметров автономной системы электроснабжения и продолжительности работы электропривода секции ДМ рассмотрены с применением вентильно-индукторного электродвигателя типа BLDC, тяговых аккумуляторных батарей марки Delta Gel и солнечных батарей марки SilaSolar. На рисунке 13 показан внешний вид полноформатной секции ДМ, испытываемой в УНПК «Агроцентр» ФГБОУ ВО «Саратовский ГАУ».

В ходе экспериментов установлены значения параметров солнечных и аккумуляторных батарей и продолжительности работы электропривода в период, приближенный к реальным срокам поливного сезона, – с мая по август. С учетом различной прозрачности атмосферы и облачности в течение всего срока проведения эксперимента для солнечных батарей использованы средние значения вырабатываемой энергии. Средние значения параметров автономной системы электроснабжения и продолжительности работы электропривода секции ДМ от солнечных батарей представлены в таблице 2. Оценка эксплуатационных показателей системы осуществлена без учёта некоторого снижения показателей секции ЭДМКД по ГОСТ Р 58331.2-2019 на примере солнечных батарей системы автономного электроснабжения машины.

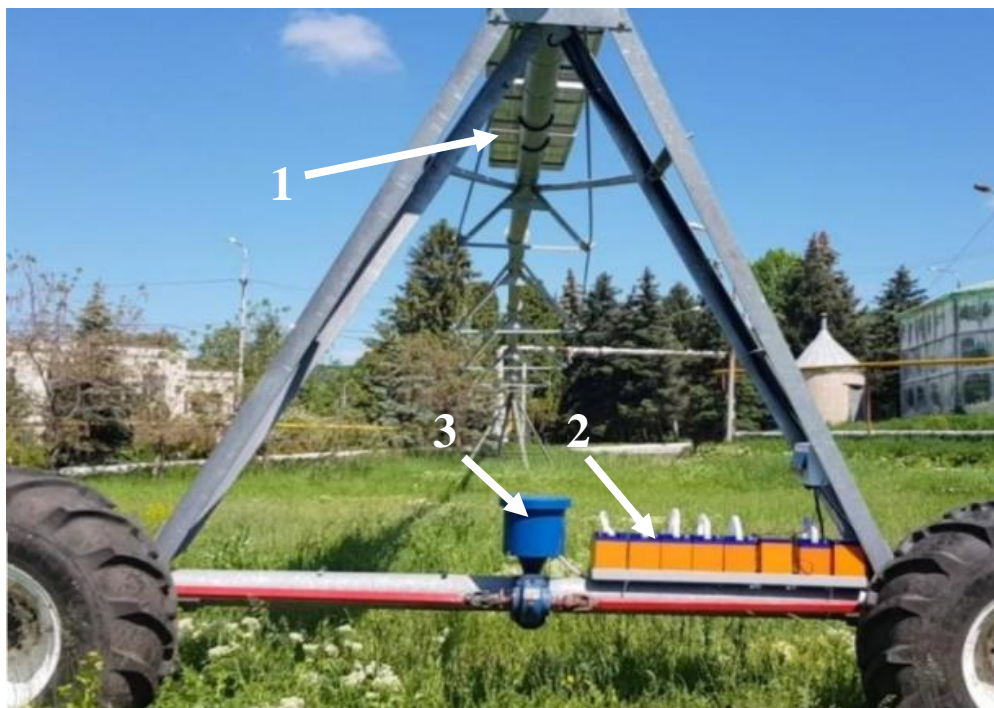


Рисунок 13 – Общий вид испытуемой полноформатной секции ДМ с САБ:  
 1 – солнечные батареи SilaSolar,  $P_{\max \text{ общ}} = 600 \text{ Вт}$ ; 2 – аккумуляторные батареи марки Delta GEL с параметрами 48 В, 110 А·ч,  $C_n = 110 \text{ А·ч}$ ; 3 – вентильно-индукторный электродвигатель (мотор-редуктор),  $P_n = 500 \text{ Вт}$

Таблица 2 – Параметры автономной системы электроснабжения и продолжительности работы электропривода секции ДМ от солнечных батарей в условиях эксплуатации УНПК «Агроцентр» (средние значения)

Дата	$U_{\text{СБ}}, \text{ В}$	$I_{\text{СБ}}, \text{ А}$	$P_{\text{двф}}, \text{ кВт}$	$t_3, \text{ ч}$		$t_p, \text{ ч}$	
				600 Вт	750 Вт	600 Вт	750 Вт
07.05	49,2	14,2	0,35	9,0	9,8	9,2	9,6
17.05	49,6	14,3	0,37	9,1	9,83	9,3	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	15,6	0,35	8,64	9,0	8,43	9,32
17.08	49,5	15,8	0,39	8,6	9,02	8,38	9,3

*Примечание:*  $U_{\text{СБ}}$  –напряжение на зажимах СБ при подключенной нагрузке;  $I_{\text{СБ}}$  – ток в цепи подключенной нагрузки к СБ;  $P_{\text{двф}}$  – фактическая мощность нагрузки;  $t_3, t_p$  –экспериментальные и расчетные значения продолжительности работы электропривода секции ДМ.

Проведена проверка параметров автономной системы электроснабжения с СБ с учетом изменения их максимальной мощности в различные месяцы полива (рисунок 14).

Согласно математическим моделям изменения параметров (7) и (8), при использовании солнечной батареи максимальной мощностью 600 Вт теоретическая продолжительность работы электропривода секции ДМ с электродвигателем мощностью 500 Вт составила 8,6 ч (синяя гистограмма рисунка 14 – июнь 2020 г.), а фактическая (экспериментальная) при тех же данных СБ – 9,5 ч (красная гистограмма рисунка 14 – июнь 2020 г.).

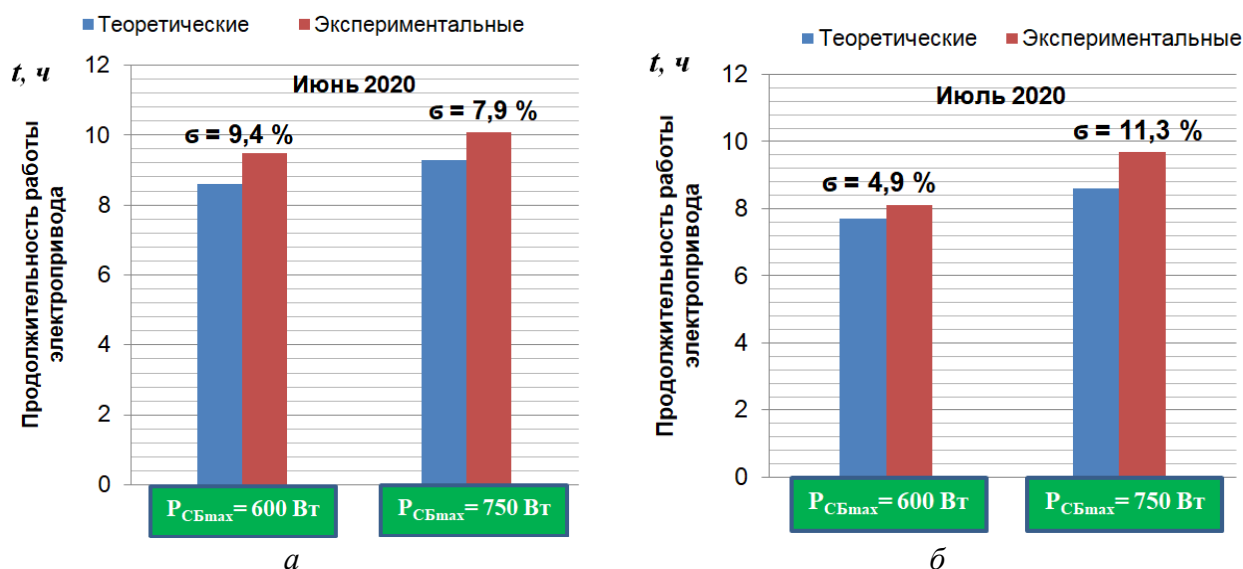


Рисунок 14 – Сравнение теоретических и экспериментальных данных параметров СБ в зависимости от месяца эксплуатации ДМ: а – июнь 2020 г.; б – июль 2020 г.

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

Проверка параметров только аккумуляторных батарей проведена с учетом влияния числа пусков  $w$  (рисунок 15). Параметры автономной системы электроснабжения и продолжительность работы электропривода секции ДМ от аккумуляторных приведены в таблице 3.

Таблица 3 – 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		$W_{АБ} = 3,2$ кВт·ч	
				$t_э$ , ч	$t_р$ , ч	$t_э$ , ч	$t_р$ , 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

*Примечание:*  $U_{АБ}$  – 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;  $t_э$ ,  $t_р$  – экспериментальные и расчетные значения продолжительности работы электропривода секции ДМ.

Согласно математической модели (8), 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 15), а фактическая (экспериментальная) при тех же данных – 7,3 ч (зеленая гистограмма рисунка 15).

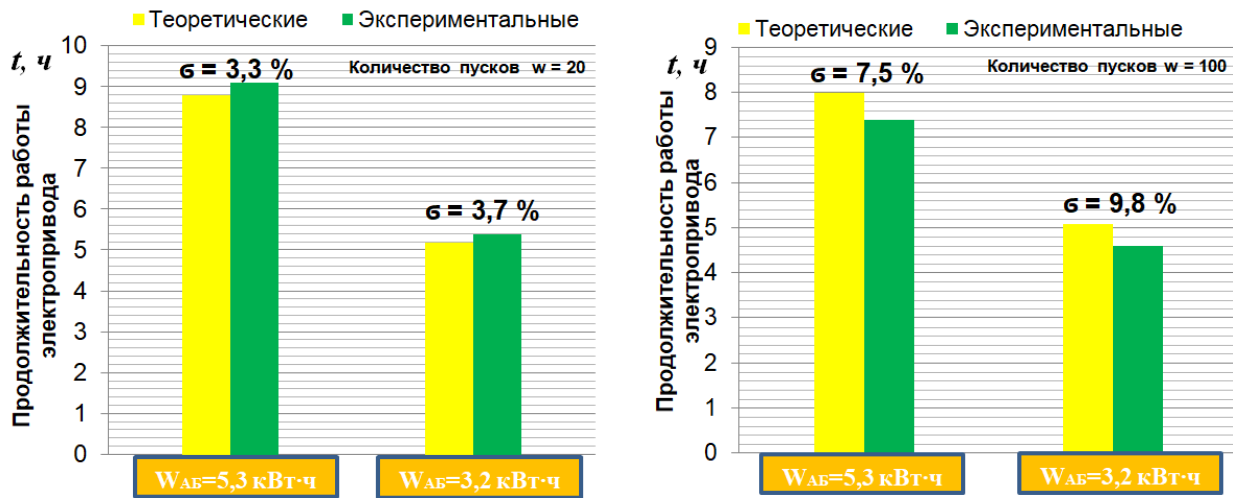


Рисунок 15 – Сравнение теоретических и экспериментальных данных параметров АБ разной энергии в зависимости от числа пусков электропривода

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

В четвертой главе «Обоснование экономической эффективности предложенных решений» выполнен расчет экономической эффективности внедрения усовершенствованной автономной системы электроснабжения дождевальная машины кругового действия.

Экономическая эффективность применения автономной системы электроснабжения на САБ представлена в сравнении с электроснабжением от дизельного генератора для дождевальная машины, состоящей из 6 секций (таблица 4).

Таблица 4 – Сравнительные показатели экономической эффективности источников электроснабжения дождевальная машины

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, тыс.руб.	5,8	1,2
затраты на запчасти, тыс. руб.	3,0	0,1
Цена 1 кВт·ч, руб.	15,5	0,5
Годовой экономический эффект, тыс. руб.	–	44,1
Срок окупаемости, год.	–	3,9
Чистый дисконтированный доход, тыс. руб.	–	219,8
Индекс доходности, руб./руб.	–	1,25

Дополнительные капиталовложения в САБ составят 167,2 тыс. руб. в сравнении с дизельной электростанцией и окупятся за 3,9 года со средней годовой экономией 44,1 тыс. руб. на единицу техники.

## 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 дождевальной 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 типоразмерный ряд вентиляльного электропривода, диапазон номинальных значений напряжения, показатели надежности и т. д. Для эксплуатации электрифицированной дождевальной 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 вентиляльно-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 дождевальной машины кругового действия на основе бесконтактных устройств.

#### **Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах**

*В рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ*

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

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

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

4. *Бакиров, С. М.* Оценка повышения энергетической эффективности дождевальной машины с аккумуляторным источником питания / С. М. Бакиров, С. С. Елисеев, Е. В. Рыжова // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. – 2021. – Т. 68. – № 1(42). – С. 29–33.

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

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

*В патентах РФ*

6. Пат. 189495 Российская Федерация, МПК А 01 G 25/09, СБК А 01 G 25/09, У 02 Р 60/122. Автономная электрифицированная секция дождевальной машины кругового действия / Бакиров С. М., Ерошенко Г. П., Трушкин В. А., Соловьев Д. А., Елисеев С. С. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Саратовский ГАУ им. Н. И. Вавилова». – № 2019103591 ; заявл. 08.02.2019; опубл. 24.05.2019, Бюл. № 15. – 6 с. : ил.

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

*В сборниках научных трудов, материалах конференций и семинаров*

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

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

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

11. *Елисеев, С. С.* Роль солнечных модулей в мобильных сельскохозяйственных электрифицированных машинах / С. С. Елисеев // Современные проблемы и перспективы развития агропромышленного комплекса : сб. статей по итогам Междунар. науч.-практ. конф. – Саратов, 2019. – С. 272–275.



