

**Некоммерческое акционерное общество
«АЛМАТИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ЭНЕРГЕТИКИ И СВЯЗИ»**

Кафедра «Телекоммуникационные системы»

Специальность 6M071900 «Радиотехника, электроника и телекоммуникации»

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ

Зав. кафедрой

к.т.н Шагиахметов Д. Р.

(ученая степень, звание, Ф.И.О.)

«_____» _____ 201_ г.

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ
пояснительная записка**

на тему: Разработка системы наведения для следящего привода солнечных фото
электрических станций для удаленных телекоммуникационных систем

Выполнил Алфёров А.Н. _____ Группа МТСп-12-2
(Ф.И.О.) (подпись)

Руководитель _____ к.т.н. _____ Дараев А.М.
(ученая степень, звание) (подпись) (Ф.И.О.)

Рецензент _____ _____ _____
(ученая степень, звание) (подпись) (Ф.И.О.)

Консультант по ВТ к.х.н., ст.преп. _____ Данько Е.Т
(ученая степень, звание) (подпись) (Ф.И.О.)

Нормоконтролер к.х.н., ст.преп. _____ Кудинова В.С
(ученая степень, звание) (подпись) (Ф.И.О.)

Алматы, 2014

**Некоммерческое акционерное общество
«АЛМАТИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ЭНЕРГЕТИКИ И СВЯЗИ»**

Факультет *Радиотехники и связи*

Специальность 6М071900 – Радиотехника, электроника и телекоммуникации

Кафедра Телекоммуникационных систем

ЗАДАНИЕ

на выполнение магистерской диссертации

Магистранту Алфёрову Антону Николаевичу
(фамилия, имя, отчество)

Тема диссертации Разработка системы наведения для следающего привода солнечных фото электрических станций для удаленных телекоммуникационных систем

утверждена Ученым советом университета № 142 от « 31 » 10. 2013

Срок сдачи законченной диссертации « 25 » 12. 2013 г.

Цель исследования Определение возможности использования системы наведения для следающего привода солнечных фото электрических станций для удаленных телекоммуникационных систем

Перечень подлежащих разработке в магистерской диссертации вопросов или краткое содержание магистерской диссертации:

1. Анализ современных солнечных фотоэлектрических станций и проблем их модернизации.
2. Постановка задачи.
3. Исследование потенциала солнечной энергии в Алматинской области
4. Выбор и обоснование режима слежения за Солнцем
5. Расчет и методика исследования разработанного следающего электропривода солнечной фотоэлектрической станции
4. Экспериментальное определение основных показателей качества получения электроэнергии для удаленных телекоммуникационных систем

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)

1. График вероятности продолжительности солнечного сияния для условий Алматинской области;
2. Конструкция модульной энергетической фотоэлектрической станции;
3. Зависимость силы тока фотопреобразователя от угла падения излучения;
4. Принципиальная схема силовой части инвертора
5. Схема для исследования характеристик фотопанелей

Рекомендуемая основная литература

1. Толстов Г.П. Ряды Фурье. -3-е изд. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы. 1980. -384с.
2. Овсянников Е.М., Особенности следающих электроприводов гелиоустановок. //Труды МЭИ вып.400. Издательство МЭИ 1979. с.79-85.

3. Терехов В.М. Овсянников Е.М. Гулям Савар. //Оптимизация режимов слежения по потерям электроэнергии в тихоходных следящих электроприводах//Труды МЭИ вып. 672.Издательство МЭИ, 1995.С.29-34

Г Р А Ф И К
подготовки магистерской диссертации

Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
1. Обзор литературы согласно темы		
2. Анализ и выбор необходимых литературных источников относительно систем слежения за солнцем.	01.10.12-01.12.12	обзор
3. Математическое сравнение между пассивными и активными способами слежения за солнцем.	14.01.13-17.12.13	отчет
4. Исследование оборудования для эксперимента.	20.01.13-25.03.13	отчет
5. Экспериментальное исследование получения энергии	25.09.13-10.04.13	отчет
6. Анализ полученных значений	11.04.13-21.04.13	отчет

Дата выдачи задания _____

Зав. Кафедрой _____ (Шагиахметов Д.Р.)
(подпись) (Ф.И.О.)

Руководитель диссертации _____ (Дараев А.М.)
(подпись) (Ф.И.О.)

Задание принял к исполнению магистрант _____ (Алфёров А.Н.)
(подпись) (Ф.И.О.)

Содержание

Введение.....	7
1 Современные солнечные фотоэлектрические станции и проблемы их модернизации.....	9
1.1 Исследования потенциала солнечной энергии в Алматинской области	9
1.2 Определение средних месячных значений солнечной энергии, поступающей на поверхность земли.....	11
1.2.1 Вероятностная оценка продолжительности солнечного сияния.....	12
1.2.2 Потенциал Алматинской области по солнечной энергии.....	13
1.3 Разработка и уточнение требований к электроприводам солнечных фотоэлектрических станций в Алматинской области.....	14
1.4 Виды солнечных электростанций.....	16
1.5 Полупроводниковые фотоэлектрические преобразователи, используемые в солнечных электростанциях.....	22
1.6 Обоснование применения электропривода в солнечных фотоэлектрических станциях.....	25
1.6.1 Выбор системы координат для опорно-поворотных устройств.....	26
1.6.2 Основные типы опорно-поворотных устройств солнечных фотоэлектрических станций.....	29
1.6.3 Электроприводы, применяемые в солнечных фотоэлектрических станциях.....	31
1.6.4 Развитие теории и практики электромеханических систем, используемых для электроприводов солнечных фотоэлектрических станций.....	33
1.7 Выводы по разделу.....	37
2 Выбор и обоснование режима слежения за Солнцем.....	38
2.1 Основные режимы работы солнечных фотоэлектрических станций.....	38
2.2 Схема следящего электропривода солнечных фотоэлектрических станций.....	38
2.3 Особенности режимов работы солнечных фотоэлектрических станций и требования к их электроприводам.....	40
2.4 Обоснование основной структуры следящего электропривода солнечных фотоэлектрических станций.....	43
2.5 Оценка экономии энергозатрат в электроприводе слежения солнечной фотоэлектрической станции.....	46
2.7 Выводы по разделу.....	58
3 Определение мощности двигателя следящего электропривода солнечной фотоэлектрической станции.....	59
3.1 Исследование факторов, влияющих на требуемую мощность двигателя следящего электропривода.....	59
3.2 Анализ внешних возмущающих воздействий на следящий электропривод.....	60

3.3 Исследование возмущающих воздействий ветра, действующего на плоский фотоприемник солнечной фотоэлектрической станции.....	62
3.4 Расчет момента трения в опорах фотоприемника.....	67
3.5 Исследование характера упругих колебаний в электроприводе солнечных фотоэлектрических станций.....	68
3.6 Исследования перераспределения мощности в электроприводе вследствие внешних возмущающих воздействий.....	74
3.7 Математические модели следящего электропривода солнечной фотоэлектрической станции.....	81
3.7.1 Математическая модель одноконтурного следящего электропривода солнечной фотоэлектрической станции.....	81
3.7.2 Математическая модель двухконтурного следящего электропривода солнечной фотоэлектрической станции.....	84
3.8 Оценка системы управления следящего электропривода солнечной фотоэлектрической станции.....	88
3.9 Выводы по разделу.....	91
4 Оборудование и методика исследования разработанного следящего электропривода солнечной фотоэлектрической станции.....	92
4.1 Оборудование разработанной солнечной фотоэлектрической станции и основные его характеристики.....	92
4.1.1 Устройство и принцип действия солнечной фотоэлектрической станции.....	92
4.1.2 Солнечные батареи используемые в гелиоустановках.....	93
4.1.3 Аккумуляторы, используемые в солнечной фотоэлектрической станции.....	93
4.1.4 Система контроля и управления солнечной фотоэлектрической станции.....	97
4.1.5 Система наведения солнечной фотоэлектрической станции.....	102
4.1.6 Выбор электродвигателя солнечной фотоэлектрической станции с учётом результатов моделирования.....	104
4.1.7 Инвертор разработанной солнечной фотоэлектрической станции	107
4.2 Методика для измерения параметров панелей солнечной фотоэлектрической станции.....	114
4.3 Выводы по разделу.....	120
Заключение.....	121
Список сокращений.....	122
Список литературы.....	123
Приложения А Графики замеров следящей системы.....	131
Приложение Б Следящая система.....	144
Приложение В Характеристики базовой станции и репитера GSM.....	147

АННОТАЦИЯ

Приводится обоснование применения систем наведения в Солнечных фотоэлектрических станциях (СФЭС) и рассмотрены основные принципы построения электропривода в системах наведения, дано описание основных элементов СФЭС. Проводится анализ, и обоснование выбранного типа электропривода и режима его работы. Выполнены исследования электропривода гелиоустановки на основании которых выбран двигатель. Разработана принципиальная схема системы наведения и произведен расчет инвертора СФЭС.

АНДАТПА

Түсініктеме (СФЭС) Күн электрлік станциялардағы көрсетудің жүйелері қолданудың дәйектемесін тура келеді және СФЭСтың негізгі элементтерін жазба көрсету жүйелеріндегі электр қозғағыштың құрылысының негізгі қағидаттары, дано қарап шыққан. Электр қозғағыш және оның жұмысының тәртібі талдау, және дәлелдеу таңдаған түріндегі жүргізіледі. Түбегейіндегі гелиокондырғысының электр қозғағышын атқарылған зерттеу қай қозғалтқыш таңдаған. Көрсетудің жүйесі маңызды схема жасалған және инвертор СФЭС есептеуі жасалған.

ABSTRACT

Substantiate the use of guidance systems in the Solar Photovoltaic stations (SFES) and the basic principles of the actuator in guidance systems, a description of the main elements SFES. The analysis and study of the selected type actuator and its mode of operation. The studies of solar electric on which engine is selected. A principal scheme of the guidance system and calculated the inverter SFES.

Введение

Одной из первостепенных задач в современных условиях является реализация комплекса мероприятий, направленных на общее повышение конкурентоспособности энергоустановок на основе ВИЭ (возобновляемые источники энергии), а также на выявление прогрессивных технологий использования ВИЭ и их сочетаний, поскольку их применение в условиях конкретного региона является экономически, технически и социально оправданным [1].

При этом использование ВИЭ рассматривается как органичный и необходимый элемент программы устойчивого развития территории, определяющей направления развития инженерной инфраструктуры региона и, указывающей способы решения поставленных задач [2,3].

Исходя из вышеизложенного можно спрогнозировать энергетический дефицит и ряд проблем экономического порядка в Республике Казахстан. Поэтому необходимы комплексные действия: интенсификация модернизации промышленности, создание новых энергоисточников, и включая источники альтернативной генерации с одновременным повсеместным внедрением энергосбережения, снижением выбросов парниковых газов [4].

Выступление Президента Республики Казахстан Н. А. Назарбаева в г.Алматы в Казахском национальном университете им. аль-Фараби 24.10.09 было посвящено развитию науки в Казахстане, в том числе и вопросам энергосбережения. Президент отметил необходимость использования ветро-гелиоэнергетики, а также других альтернативных источников энергии.

При этом эффективно должны использоваться имеющиеся разработки в области энергосбережения [5,6].

В свете изложенного среди основных принципов обеспечения комплексного повышения эффективности систем энергоснабжения следует отметить:

- а) использование системного подхода по повышению энергоэффективности;
- б) переход на энергоэкономические нормы проектирования;
- в) внедрение новых, наиболее экономичных и экологичных автономных систем энергоснабжения, использующих ВИЭ и вторичные энергоресурсы.

Энергокомплексы с использованием ВИЭ наиболее полно соответствуют вышеперечисленным критериям. На данный момент необходимость развития нетрадиционных, возобновляемых источников энергии обусловлена следующими факторами [7,8]:

- возможность решения проблем энергообеспечения, экологически неблагоприятных и труднодоступных районов;
- сокращение объемов строительства нерентабельных линий электропередач, особенно в труднодоступных районах;
- участие в оптимизации графиков загрузки оборудования на электростанциях с учетом сезонного использования;

- снижением выбросов CO_2 . NO_2 , позволяющее финансировать строительство за счет оплат «квот за выбросы» [9].

Среди всех источников энергии радиация солнца по масштабам ресурсов, экологической чистоте и повсеместной распространенности наиболее перспективна. Годовое количество солнечной радиации, достигающей поверхности Земли, оценивается в $1,05 \cdot 10^{18}$ кВт.ч. Без ущерба для экологической среды может быть использовано 1,5% всей падающей на Землю энергии, т.е $1,62 \cdot 10^{16}$ кВт.ч. в год, что эквивалентно $2 \cdot 10^{12}$ т условного топлива [10]. Для энергетических гелиоустановок наиболее важными показателями является КПД преобразования солнечной энергии в электрическую и ее стоимость. Одним из важнейших способов повышения КПД солнечных гелиоустановок является оптимизация следящих электроприводов, работающих в непрерывном режиме слежения за Солнцем по энергетическим показателям.

Анализ энергетических показателей различных типов двигателей и потерь мощности в зависимости от обобщенных параметров электропривода позволили определить наиболее адаптированные к нагрузке системы электроприводы. [11]. Однако система управления электроприводами не обеспечивает соответствующей точности и качества переходных процессов следящих электроприводов. Кроме этого, следует указать, что техническая реализация систем управления следящего электропривода вызывает определенные сложности [12,13].

Целью работы является улучшение энергетических показателей СЭП (следящего электропривода), создание системы управления с переменной структурой, обеспечивающей нечувствительность к изменениям параметров системы управления и уменьшение затрат электроэнергии на компенсацию возмущающих воздействий. Указанная цель определила следующие основные задачи диссертационной работы:

- обоснование требований к СЭП современных СФЭС (солнечных фотоэлектрических станций);
- создание методики анализа энергетической эффективности СЭП СФЭС;
- создание методики расчета мощности СЭП СФЭС с учетом конкретных климатических условий;
- разработка математической и компьютерной моделей одноконтурного и двухконтурного следящего электропривода с оптимальными параметрами;
- исследование и рекомендации по расчету параметров следящего электропривода;
- разработка опытного образца СФЭС со следящим электроприводом.

Общая методология. Для решения поставленных задач были использованы методы математического анализа, теории автоматического управления, математического и компьютерного моделирования.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- разработана новая схема для универсальной системы управления электропривода постоянного тока.

- предложена новая математическая модель одноконтурной и двухконтурной системы СЭП СФЭС обеспечивающая оптимальную обработку возмущающих воздействий;

- впервые предложена математическая модель одноконтурной системы наведения с переменной структурой (СПС) и датчиком слежения, которая нечувствительна к изменению параметров системы управления.

Обоснованность и достоверность научных выводов и рекомендаций подтверждается полученным опытно-эксплуатационными данными и сравнением теоретических расчетов с результатами компьютерного моделирования.

На защиту выносятся:

- разработана схема системы управления электропривода для двигателей постоянного тока;

- новая математическая модель одноконтурной и двухконтурной системы следящего электропривода солнечной фотоэлектрической станции;

- новая математическая модель одноконтурной системы наведения с переменной структурой и датчиком слежения;

- результаты исследований опытного образца СФЭС со следящим электроприводом могут быть использованы к проектированию гелиоустановок в условиях Алматинской области.

Практическая ценность работы заключается в следующем:

- создан опытный образец солнечной фотоэлектрической станции с СЭП;

- результаты теоретических и экспериментальных исследований могут быть использованы в задачах проектирования и оптимизации режимов работы СЭП СФЭС различной мощности.

- СФЭС может быть использована для удалённой, от электрических сетей и сельской местностях, для поддержания работы сотовых базовых станций и репитеров GSM.

1 Современные солнечные фотоэлектрические станции и проблемы их модернизации

1.1 Исследование потенциала солнечной энергии в Алматинской области

От Солнца на поверхность Земли каждую секунду поступает определенное количество энергии. Величина этой энергии, приходящаяся на 1 м^2 поверхности, перпендикулярной к направлению солнечных лучей, достаточно постоянна. В течение года она изменяется не более чем на $\pm 3,4\%$.

При прохождении солнечного луча через атмосферу Земли происходит изменение плотности потока и спектра солнечного излучения (рисунок 1.1). Изменение зависит от высоты солнца над горизонтом, высоты местности над уровнем моря, состояния атмосферы, оптических свойств земной поверхности. Суммарная солнечная энергия состоит из двух составляющих – прямой и рассеянной. Иногда в отдельную составляющую выделяют излучение, отраженное от поверхности Земли и различных объектов. Однако с небольшой погрешностью эта составляющая может быть включена в рассеянную солнечную энергию. Прямая солнечная энергия поступает на объект непосредственно от солнечного диска; рассеянная поступает, претерпевая различные оптические изменения при прохождении земной атмосферы.



Рисунок 1.1 - Прохождение солнечного луча через атмосферу Земли

Регистрация солнечной энергии, поступающей на поверхность Земли, производится на актинометрических станциях. На станциях для измерения

прямого солнечного излучения используются актинометры, для измерения суммарного излучения – пиранометры. Информация, полученная на станциях, вносится в публикуемые ежемесячники и справочники. Издания содержат сведения о солнечной энергии за разные интервалы осреднения (часы, сутки, месяцы). Ежемесячники включают ежедневные данные самописцев или срочных наблюдений, справочники-результаты обобщений накопленной информации об энергии и продолжительности солнечного сияния за многолетний период [14]. Доля актинометрических станций в общем количестве метеорологических станций относительно невелика. На метеорологических станциях, не регистрирующих солнечного излучения, регистрируется только продолжительность солнечного сияния. Для этой цели используется универсальный гелиограф ГУ – 1, принцип действия которого основан на прожогах специальной ленты при интенсивности солнечного излучения не менее $0,3 \dots 0,4 \text{ кал}/(\text{см}^2 \cdot \text{мин})$ [15].

К настоящему времени составлено несколько солнечных кадастров, выполненных на основании материалов действующей актинометрической сети. Использование данных о суммарной солнечной энергии, которые можно получить на основе изучения радиационного режима по времени, для определения выработки тепла или электроэнергии гелиоустановки за месяц, сезон или год с дальнейшей оценкой ее технико-экономических показателей позволило бы более объективно оценивать не только возможность, но и эффективность использования солнечной энергии [14].

На рисунке 1.2 представлено распределение солнечной радиации на поверхности Земли.

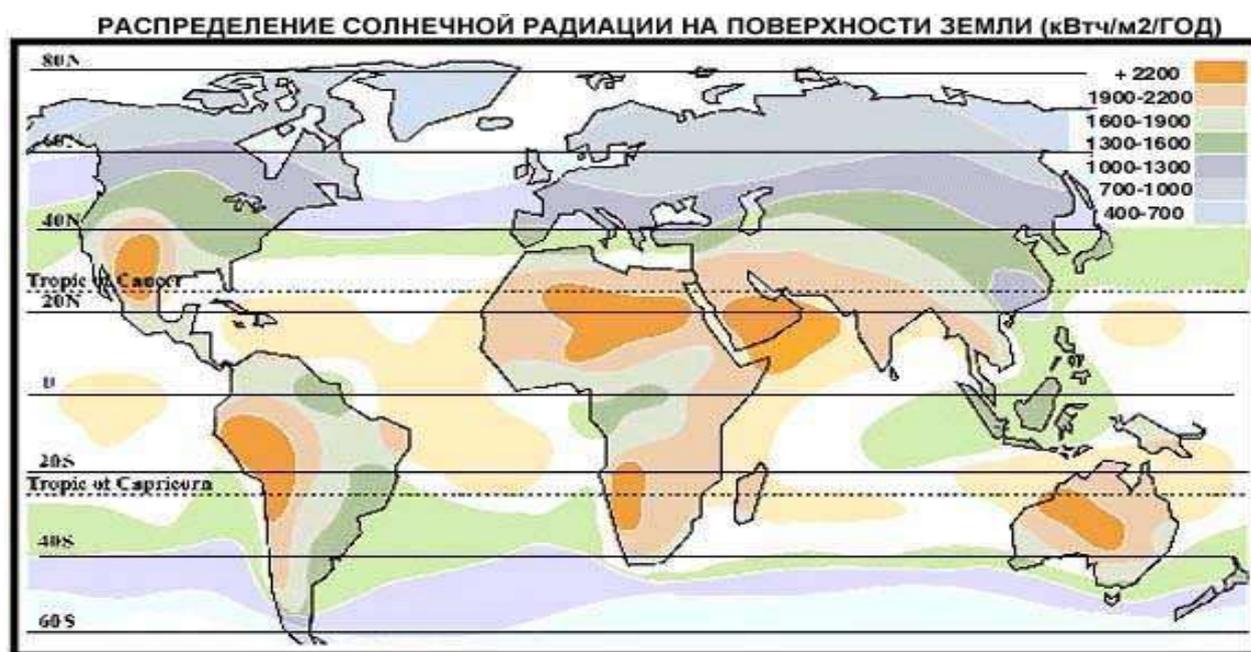


Рисунок 1.2 - Средняя многолетняя годовая сумма прямого солнечного излучения на горизонтальную поверхность, МДж/м²

1.2 Определение средних месячных значений солнечной энергии, поступающей на поверхность земли

На территории Алматинской области расположены метеорологические станции, которые регистрируют продолжительность солнечного сияния.

При помощи расчетного метода, позволяющего на основании промежуточной величины, регистрируемой всеми метеорологическими станциями, можно рассчитать значение солнечной энергии. Для зоны Алматинской области этой величиной служит продолжительность солнечного сияния.

Для косвенного расчета существует целый ряд эмпирических формул

$$Q = Q_0 \cdot [1 + (1-a) \cdot S/S_0], \quad (1.1)$$

$$Q = a + b \cdot S, \quad (1.2)$$

$$Q = Q_0 \cdot (a \cdot c \cdot \cos \varphi + b \cdot (S/S_0)), \quad (1.3)$$

$$Q = Q_0 \cdot (a + b \cdot (S/S_0)), \quad (1.4)$$

где Q – суммарная солнечная энергия; МДж/м² ;

Q_0 – солнечная энергия, поступающая на границу атмосферы Земли – (солнечная постоянная);

S – действительная продолжительность солнечного сияния, ч;

S_0 – действительная продолжительность солнечного сияния, определяемая как продолжительность времени между восходом и заходом солнца, ч;

a и b – коэффициенты регрессии, показывающие связь между продолжительностью солнечного сияния.

Выбор выражения, наиболее адекватно отражающего связь между суммарной солнечной энергией и продолжительностью солнечного сияния, можно сделать только на основании анализа статистического материала, который был собран по актинометрическим станциям региона с глубиной проработки 2-3 года. Аналогичным образом собран материал по продолжительности солнечного сияния, энергетическая освещенность (рисунок 1.1, 1.2). По формуле (1.4) с использованием коэффициентов a и b были рассчитаны значения суммарной солнечной энергии для Алматинской области. При этом использовались усредненные значения продолжительности солнечного сияния по данным наблюдения метеостанций Алматинской области за 5 -10 летний период [14].

Представленные экспериментальные результаты получены на основании детального изучения большого количества информации, поэтому их можно

считать, что они достоверно отражают ход изменения суммарной солнечной энергии в регионе. Полученные значения поступающей суммарной солнечной энергии позволят сделать первые выводы о возможности использования энергии солнца. Однако для более точных выводов необходимо знать вероятностную оценку продолжительности солнечного сияния в течение суток каждого месяца [15].

1.2.1 Вероятностная оценка продолжительности солнечного сияния

Продолжительность солнечного сияния складывается из времени сияния в отдельные часовые интервалы. Вероятностная оценка позволяет определить наиболее вероятные часовые интервалы, в которые будет наблюдаться солнечное сияние. Имеющийся опыт вероятностной оценки продолжительности солнечного сияния показал, что по данным наблюдений за прошлые годы можно объективно предсказывать этот параметр в текущее время [16]. Для вероятностной оценки солнечного сияния в отдельные интервалы были обработаны материалы наблюдений за 5-10 летний период метеорологических станций в Алматинской области. Усредненные значения, занесенные в таблице 1.1, с учетом допустимой погрешности могут адекватно отображать вероятностную зависимость продолжительности солнечного сияния для Алматинской области.

Анализ данных (рисунок 1.3) показывает, что для всех месяцев наиболее вероятное сияние солнца около полудня. В течение дня продолжительность солнечного сияния распределяется более или менее симметрично относительно полудня. Вероятность солнечного сияния в осенне – зимний период (октябрь - январь) не превышает 50%.

Т а б л и ц а 1.1 - Вероятность продолжительности солнечного сияния для условий Алматинской области

Месяцы	Распределение солнечного сияния в сутки по часам													
	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Январь			0,08	0,23	0,41	0,46	0,5	0,48	0,46	0,25				
Февраль		0,06	0,31	0,48	0,62	0,63	0,62	0,63	0,55	0,43	0,18			
Март	0,04	0,25	0,43	0,56	0,67	0,67	0,68	0,7	0,68	0,58	0,44	0,16		
Апрель	0,54	0,55	0,63	0,62	0,7	0,71	0,72	0,72	0,68	0,66	0,63	0,52	0,26	
Май	0,64	0,67	0,68	0,74	0,72	0,74	0,73	0,69	0,67	0,63	0,59	0,56	0,45	0,21
Июнь	0,65	0,68	0,68	0,72	0,74	0,74	0,73	0,72	0,71	0,67	0,64	0,55	0,50	0,28
Июль	0,65	0,68	0,68	0,72	0,74	0,74	0,73	0,72	0,71	0,67	0,64	0,55	0,50	0,28
Август	0,43	0,61	0,67	0,68	0,72	0,72	0,72	0,72	0,68	0,65	0,61	0,54	0,35	0,2
Сентябрь	0,25	0,48	0,57	0,63	0,64	0,65	0,66	0,64	0,62	0,56	0,51	0,28		
Октябрь		0,18	0,31	0,4	0,41	0,44	0,46	0,41	0,38	0,33	0,24			
Ноябрь			0,18	0,32	0,38	0,42	0,38	0,4	0,36	0,22				
Декабрь			0,05	0,26	0,32	0,37	0,41	0,38	0,37	0,13				

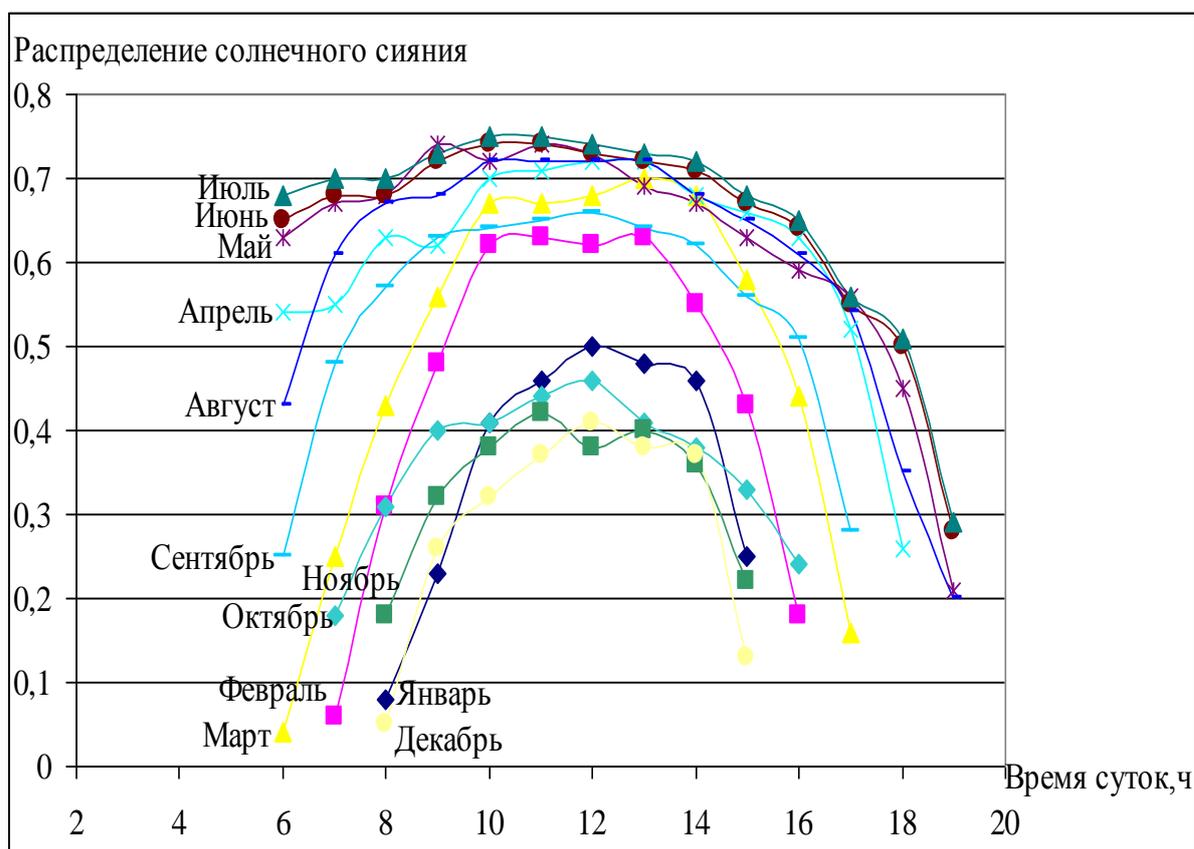


Рисунок 1.3 - Вероятность продолжительности солнечного сияния для условий Алматинской области

Краткий анализ вероятности продолжительности солнечного сияния для условий Алматинской области свидетельствует о высоком потенциале гелиоэнергетического ресурса этого региона Казахстана, и о тех возможностях, которые могут быть использованы при решении практических задач развития ВИЭ, в частности, гелиотехники [17].

1.2.2 Потенциал солнечной энергии Алматинской области

На основании вышеизложенного потенциал суммарной солнечной энергии, поступающей на горизонтальную поверхность в течение суток, можно определить по уравнению (1.5). Суммарная солнечная энергия, поступающая на горизонтальную поверхность в течение сезона (года), рассчитывается простым суммированием значений $Q_{\text{мес}}$. Для определения энергии, полученной непосредственно электроустановкой, можно воспользоваться формулой

$$Q_{\text{пол}} = Q_i \cdot R \cdot \eta \quad (1.5)$$

где Q_i – суммарная солнечная энергия за определенный период (день, месяц, сезон, год);

R – коэффициент пропорциональности между солнечной энергией, поступающей на горизонтальную и наклонную поверхность; зависит от установки (расположения и угла наклона) приемника солнечной энергии;

η – суммарный КПД солнечной установки.

Суммарная солнечная энергия, поступающая на горизонтальную поверхность в течение месяца, определяется следующим уравнением

$$Q_{\text{мес}} = Q_{\text{сут}} \cdot N \cdot p(\tau) . \quad (1.6)$$

где $Q_{\text{мес}}$ – суммарная солнечная энергия, поступающая в течение месяца $\text{Дж}/\text{м}^2$;

$Q_{\text{сут}}$ – то же в течение суток данного месяца (определяется по формуле 1.6);

N – число дней в месяце;

$p(\tau)$ – обеспеченность (вероятность) солнечного сияния в данном месяце.

Количество солнечной энергии рассчитывалась по приведенным формулам. Значение действительной продолжительности солнечного сияния принималось на основании многолетних наблюдений метеостанции области (таблица 1.2). Для упрощения дальнейших расчетов количество солнечной энергии рассчитывалось в $\text{кВт} \cdot \text{ч}$ ($1 \text{кВт} \cdot \text{ч} = 3,6 \text{ МДж}$) [18].

Т а б л и ц а 1.2 -Параметры удельной солнечной энергии за период одного года

Параметры солнечной энергии	Месяцы											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$Q_{\text{сут}}, \text{Вт}/\text{м}^2$	290	550	870	1300	1560	1890	1830	1570	1100	50	230	160
$Q_{\text{мес}}, \text{Вт}/\text{м}^2$	13,15	36,7	80	148,9	201,1	242,2	241,8	194	103	29,7	9	5

1.3 Разработка и уточнение требований к электроприводам солнечных фотоэлектрических станций в Алматинской области

Широкий класс установок с автономными источниками питания построен на базе СЭП, к которым предъявляются повышенные требования по надежности, энергетическим характеристикам, качеству протекания динамических и статистических процессов [19,20].

Специфика СЭП заключается в наличии автономного источника питания, усложняющего реализацию системы с заданными показателями качества регулирования [21]. Это связано с ограниченными ресурсами

энергопитающей установки, что обуславливает требования минимизации потерь, максимума КПД СЭП в целом и высокого качества протекания динамических процессов. Реализовать эти требования возможно путем создания высокодинамичных систем СЭП с широким диапазоном регулирования скорости при высокой плавности ее изменения.

Специфической особенностью установок СФЭС является в некоторых случаях пониженное напряжение автономного источника питания.

В подобных системах технически нецелесообразно или запрещено использовать в качестве питающего стандартного напряжения 220/380В, что связано с обеспечением безопасности обслуживания электрооборудования в полевых условиях, невозможностью в аварийных ситуациях гарантированной защиты обслуживающего персонала от поражения электрическим током. К рассматриваемому классу автономных устройств могут быть отнесены устройства мобильных установок с питанием от аккумуляторных батарей (АКБ) с рабочим напряжением 12-144В, переносные инструменты, передвижные комплексы СФЭС, механизмы космического и глубоководного назначения.

Существует ряд устройств, работающих при значительных динамических нагрузках в широком диапазоне регулирования скорости. К ним следует отнести радиолокационные установки, устройства слежения и наведения и другие высокодинамичные устройства морских и наземных, воздушных и космических установок [11,12]. В исполнительных механизмах устройств этого класса применяются СЭП, отличающиеся повышенными требованиями к энергетическим характеристикам, массогабаритным показателям, уровню надежности, величине шумов и вибраций, электромагнитной совместимости с источником питания. Обработка значительных динамических нагрузок (частые реверсы, большое число включений в час, обработка ступенчатых управляющих воздействий) в широком диапазоне регулирования скорости характерна как для ряда следящих ЭП подвижных установок в целом.

Количество требований, предъявляемых к автономным системам ЭП, условно можно поделить на две группы:

- общие требования, задаваемые технологическим процессом (диапазон скорости, статическая и динамическая точности ее поддержания, пределы изменения момента и ускорения, полоса пропускания частот, предельное время регулирования и т.д)

- специальные требования, определяемые технико-экономическими особенностями самих устройств (массогабаритные и стоимостные показатели, энергетические характеристики, надежность и другие технико-экономические показатели).

Важным требованием к СЭП СФЭС является требование по минимуму массы и габаритов системы, что связано с необходимостью размещения в ограниченном объеме всей требуемой аппаратуры, удобством компоновки двигателя и ПЧ, а также с экономией энергоресурсов СФЭС.

В целях обеспечения заданного ресурса работоспособности оборудования следует учитывать также требования по улучшению его защищенности от неблагоприятных условий окружающей среды. Требования по защите от атмосферных осадков и влаги, от попадания воды, пыли, грязи, от повышенной влажности и перепада давления, недопустимого температурного режима, разреженного ионизированного пространства и других неблагоприятных условий, в которых приходится функционировать СЭП СФЭС, находятся в определенном противоречии с требованиями по улучшению массогабаритных показателей ЭМС. Следует осуществлять поиск оптимальных решений одновременно в двух направлениях – повышение массогабаритных показателей и улучшение защищенности от неблагоприятных условий окружающей среды.

Большое значение при разработке СЭП СФЭС имеет принятие решений, направленных на повышение надежности силовой части ЭМС.

Одно из важных замечаний к СЭП СФЭС обусловлено широким использованием полупроводниковых статических преобразователей [22]. Электроника телекоммуникационных установок чувствительна к электромагнитным помехам и не допускает значительных в отношении электромагнитным помехам отклонений параметров питающего напряжения от номинальных [23].

Среди технико-экономических требований, предъявляемых к СЭП СФЭС, необходимо выделить следующие:

- высокие значения мощности и момента на валу исполнительного двигателя при минимальных массе и габаритах;
- повышенная перегрузочная способность привода в кратковременном и повторно-кратковременном режимах работы привода;
- высокая ремонтпригодность;
- малая энергоемкость;
- унификация узлов и элементов;
- экономичность и низкая стоимость.

Поскольку полное совмещение всех требований в одном устройстве практически невозможно, то при разработке конкретного СЭП СФЭС учет одних требований достигается в ущерб другим. Технические требования СЭП СФЭС подтверждают необходимость построения высокодинамичных систем [24,25]:

- диапазон мощностей исполнительного электродвигателя 0,1-30кВт;
- диапазон изменения скорости в пределах до 50:1 – 1000:1;
- полоса пропускания частот 30-1000 Гц;
- кратковременная перегрузка по моменту кратностью до 2,5-3,0 и выше.

1.4 Виды солнечных электростанций

Устройства, преобразующие солнечную энергию в электрическую или тепловую, называют гелиоустановками.

Солнечная батарея — один из генераторов альтернативных видов энергии, превращающих солнечное излучение в электричество. Простейшая солнечная панель состоит из батареи солнечных элементов и полупроводникового фотоэлектрического генератора. Действие солнечных элементов основано на использовании явления внутреннего фотоэффекта. В результате работы солнечные батареи генерируют постоянный ток. Энергия может использоваться как напрямую различными приборами, так и запасаться в аккумуляторных батареях для последующего использования или же преобразовываться в переменный ток напряжением 220 В.

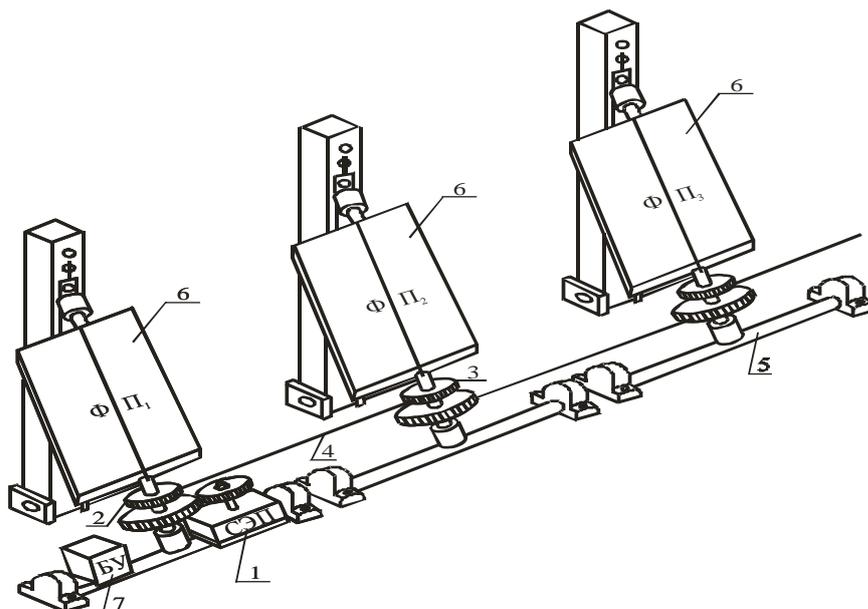


Рисунок 1.4 – Конструкция модульной энергетической фотоэлектрической станции

Модульный тип конструкции позволяет создавать установки практически любой мощности и делает их весьма перспективными (рисунок 1.4). Установки имеют малую массу и отличаются простотой обслуживания.

Недостатком фотоэлектрического преобразователя является высокая стоимость и низкий КПД. Фотоэлектрический эффект возникает в солнечном элементе при его освещении светом в ближней инфракрасной области спектра. В солнечном элементе из полупроводникового кремния толщиной 50мкм поглощаются фотоны, и их энергия преобразуется в электрическую посредством р-п соединения. Переход на гетеро соединение типа арсенида галлия и алюминия, применение концентраторов солнечной радиации с кратностью концентрации 50-100 позволяет повысить КПД до 35%. Однако стоимость элементов на базе соединения арсенида галлия и алюминия значительно выше, чем на базе кремния [25].

В настоящее время КПД преобразования солнечной энергии фотоэлементов на основе монокристаллического кремния доходит до 12-15%. Тем не менее, затраты на создание гелиоустановок, даже если учитывать при

этом только затраты на производство фотоэлементов, по своей удельной стоимости все еще превосходят затраты на создание атомных, тепло-гидроэлектростанций. Это объясняется низкой плотностью солнечного излучения. Необходимо собирать солнечное излучение с больших площадей, покрывая их дорогими полупроводниковыми фотоэлементами. Стоимость получаемой электроэнергии значительно превосходит стоимость электроэнергии, вырабатываемой традиционными способами. С течением времени происходит снижение стоимости солнечных элементов, главным образом, за счет снижения стоимости полупроводниковых материалов. На данный момент себестоимость солнечных элементов составляет примерно 2-3 дол/Вт. Стоимость фотоэлектрических гелиоустановок в сборке доходит до 3-4 дол/Вт при стоимости электроэнергии 0,25-0,56 дол/Вт [25].

Как один из способов снижения стоимости солнечной электроэнергии может рассматриваться применение концентраторов излучения [26,27]. В этом случае требуемая площадь солнечных элементов, следовательно, и их стоимость могут быть снижены пропорционально кратности концентрирования солнечного излучения зеркалами или линзами. Однако в этом случае возникает ряд проблем. Прежде всего, при повышении мощности излучения увеличивается плотность генерируемого фототока, что требует усложнения конструкции солнечных элементов для уменьшения омических потерь. Во-вторых, увеличивается тепловая нагрузка на солнечные элементы, что может потребовать создание эффективной системы теплоотвода. В-третьих, требуется разработка высокоэффективных и дешевых концентраторов излучения. И, в-четвертых, требуется сравнительно более точное наведение на Солнце. Таким образом, целесообразность применения концентраторов необходимо определять как разность экономии средств за счет уменьшения площади фотопреобразователя и затрат, направленных на решение вышеуказанных проблем [28,29,30].

Солнечные электростанции (СЭС) с применением тепловых двигателей в настоящее время в основном строят либо как СЭС башенного типа, либо как СЭС турбогенераторного типа. В башенных СЭС используется центральный приемник с полем гелиостатов, обеспечивающий высокую степень концентрации солнечного излучения [31,32,33]. Управление системой, как правило, осуществляется с помощью компьютера. В качестве рабочего тела в тепловом двигателе обычно используется водяной пар с температурой до 550⁰С, воздух и другие газы до 1000⁰С, низкокипящие органические жидкости (в том числе фреоны) – до 100⁰С, жидкометаллические теплоносители – до 8000⁰С [34,35].

В СЭС модульного типа используется большое число модулей, каждый из которых включает параболоцилиндрический концентратор солнечного излучения и приемник, расположенный в фокусе концентратора и используемый для нагрева рабочей жидкости, подаваемой в тепловой двигатель, который соединен с электрогенератором (рисунок 1.5).

При небольшой мощности СЭС модульного типа более экономичны, чем башенного типа [37].

В СЭС модульного типа обычно используются линейные концентраторы солнечной энергии с максимальной степенью концентрации [38] (рисунки 1.6, 1.7).

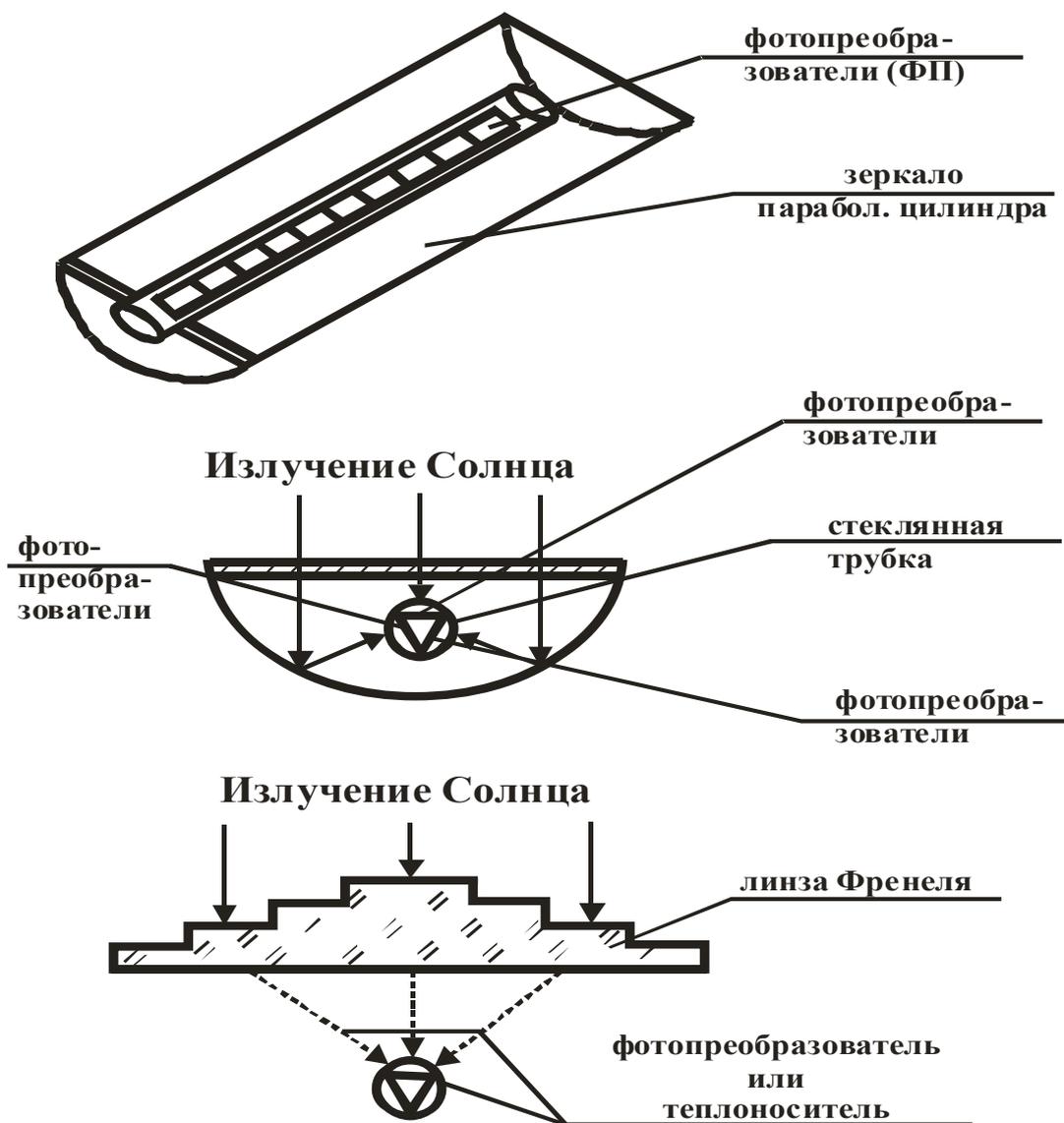


Рисунок 1.5 – Оптические концентраторы солнечной энергии

При достаточном уровне солнечной радиации установка автоматически наводится на Солнце от аккумуляторного НЭ. Вырабатываемая ФЭС электрическая энергия поступает на статический электронный ПРЭ, который перераспределяет ее в БАУ, СНС, ЭУ, к потребителю и в НЭ. Отводимое от ФЭС жидкостное или воздушное тепло также идет на нужды потребителя. При исчезновении видимого диска Солнца установка автоматически

отключается и ждет Солнце в том положении, в котором отключилась. При появлении Солнца установка автоматически на него наводится и начинает работать.

При скорости ветра свыше 15 м/с независимо от уровня радиации ДВН включает САС. Застопоренная установка «ждет» снижения скорости ветра, после чего автоматически включается [39].

При скорости ветра, угрожающей прочности конструкции, включается аварийный звуковой сигнал. В этом случае требуется вмешательство человека для ручного выведения конструкции в положение наименьшей парусности.

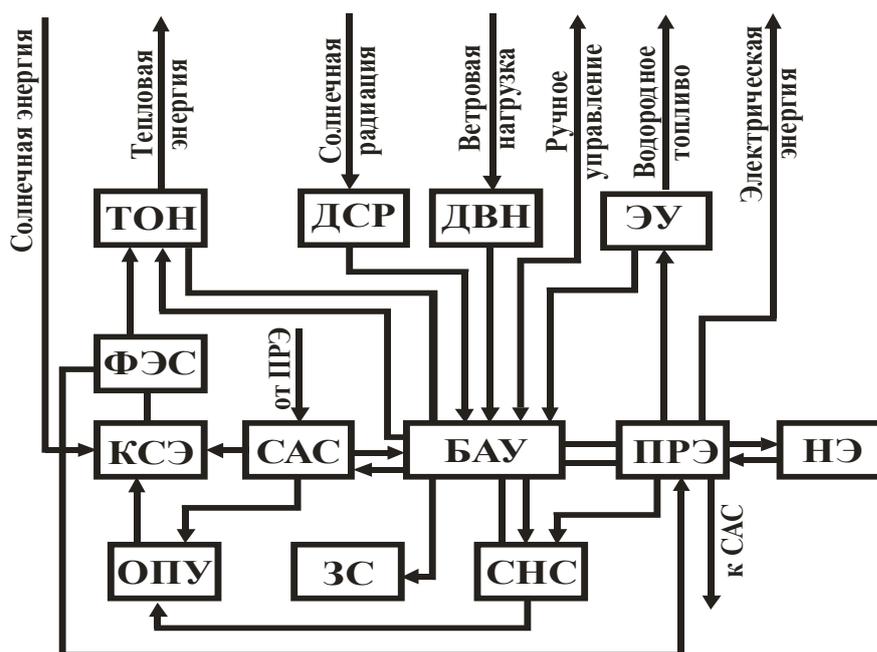


Рисунок 1.6 – Функциональная схема концентрирующей энергетической гелиоустановки

Принцип работы устройства следующий. В начале светового дня датчик уровня солнечной радиации выдает команду в систему наведения на Солнце. После наведения концентратора на Солнце выдаются команды в пусковое устройство турбосистемы и одновременно в регулятор режимов турбосистемы. Электрический стартер, питаемый от НЭ, раскручивает турбину. При этом экран регулятора турбосистемы открывает доступ солнечной энергии в приемник излучения. Происходит запуск турбины. Рабочее тело (например воздух) поступает в ТОП, где предварительно нагревается отработанными газами турбины. Затем сжимается в компрессоре и поступает в приемник излучения с теплообменником и аккумулятором тепла, где подвергается дальнейшему нагреванию от лучистой энергии.

Нагретое рабочее тело проходит через лопатки турбины, вращая ее со скоростью в несколько десятков тысяч оборотов в минуту.

Расположенный на одном валу с турбиной генератор выдает электрическую энергию в преобразователь-распределитель энергии, который распределяет преобразованную энергию к потребителю, к БАУ, к РРТС, к СНС, к вырабатывающему водородное топливо электролизному устройству и не востребуванную электрическую энергию в НЭ.

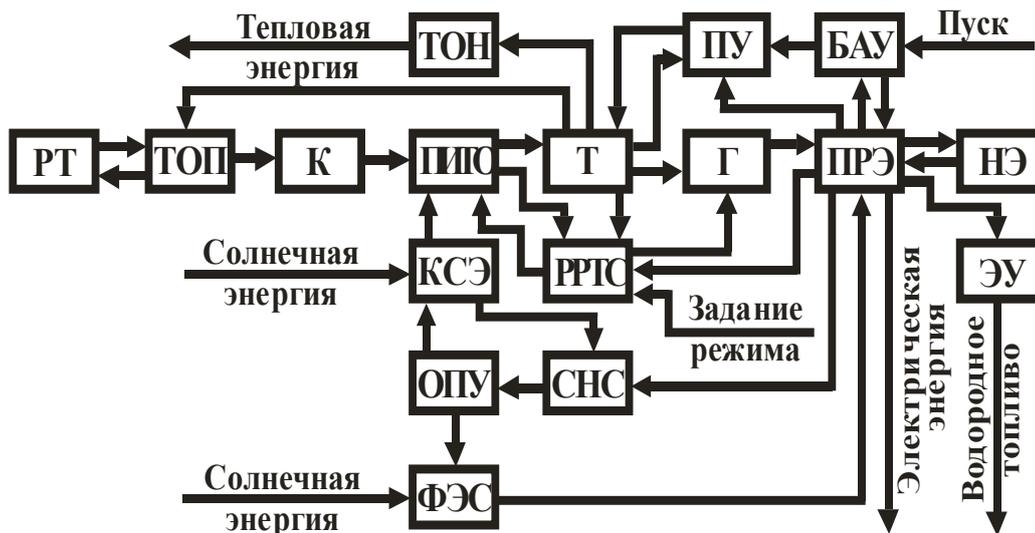


Рисунок 1.7 – Функциональная схема турбогенераторной энергетической установки

РРТС обеспечивает оптимальную скорость и температуру турбосистемы, меняя возбуждение генератора и положение затемняющего экрана приемника излучения. При снижении уровня радиации до недопустимого уровня экран закрывается, турбина останавливается.

При появлении Солнца цикл автоматически повторяется. Вечером, дойдя до конечного положения, установка возвращается в исходное положение «утро» и обесточивается до восхода Солнца.

Кроме электрической энергии установка вырабатывает тепло. Выходящий из турбины отработанный газ, нагретый до температуры около 300⁰С, поступает в ТОН, где используется для приготовления пищи и нагрева воды.

Параллельно с турбосистемой работает ФЭС, которая способна выдавать в ПРЭ ток, при низких уровнях радиации, когда турбосистема неэффективна.

Таким образом, солнечная газотурбинная энергетическая установка способна производить электроэнергию, тепло для нагрева воды и приготовления пищи, водородное топливо для двигателей внутреннего сгорания и нагревательных устройств.

К недостаткам СЭУ относится сложность и дороговизна, низкий КПД (6%) для турбин малой мощности (0,5-1кВт), высокие требования к подшипникам и балансировке.

1.5 Полупроводниковые фотоэлектрические преобразователи, используемые в солнечных электростанциях

Полупроводниковые фотоэлектрические преобразователи – это приборы, принцип действия которых основан на фотогальваническом эффекте – явлении возникновения фото-ЭДС в электрическом р-п переходе при облучении его световым потоком. Широкое применение находят солнечные фото-элементы из кремния и арсенида галлия. Основными параметрами являются выходная мощность P и коэффициент полезного действия

$$\eta_{\phi} = \frac{P_{MAX}}{P_{CB}}.$$

где P_{max} – максимальная мощность, которую можно получить от фотоэлемента, Вт;

P_{CB} – мощность потока излучения, падающего на фотоэлемент, Вт.

У лучших монокристаллических кремниевых солнечных фотоэлементов КПД достигает 10-15%. Такой относительно низкий КПД связан с несовершенством солнечного фотоэлемента как преобразовательного устройства, в котором одновременно с полезным преобразованием происходят процессы, сопровождающиеся бесполезным ее рассеиванием.

Все виды потерь в солнечном фотоэлементе можно разделить на две группы:

- потери энергии, связанные с процессами, когда преобразуемая энергия имеет вид лучистой энергии – потери излучения;

- потери энергии, генерированной излучением электронов и дырок, происходящих во время их движения внутри полупроводника;

- электрические потери.

Потери первой группы происходят вследствие отражения падающего излучения от поверхности фотоэлемента, прохождения излучения на глубину больше диффузионной длины неравновесных носителей заряда (поглощения излучения в нерабочей области), нефотоэлектрическое поглощение излучения в проводнике, поглощение без образования пары неравновесных носителей заряда [40,41].

Для солнечного элемента из кремния к нефотоэлектрическому поглощению относится вся длинноволновая часть солнечного спектра с длиной волны более 1,09 мкм. Эта часть излучения в спектре Солнца составляет 12-20% по мощности [42]. Для уменьшения потерь, связанных с нефотоэлектрическим поглощением излучения Солнца, разрабатываются

гетеропереходы между полупроводниками с различной шириной запрещенной зоны. Расширение области спектральных характеристик солнечных фотоэлементов может быть достигнуто при использовании систем с плавно изменяющейся шириной запрещенной зоны [43].

Потери второй группы происходят за счет:

- рекомбинации генерированных излучением пар носителей заряда, сопровождающейся передачей энергии решетки;
- рассеивания энергии неравновесными носителями заряда при взаимодействии их с решеткой;
- наличие внутреннего, последовательного сопротивления фотоэлемента, уменьшающего напряжение на нагрузки;
- утечки фототока, обусловленной сопротивлением резистора, шунтирующего переход.

Для снижения потерь на рекомбинацию необходимо, чтобы толщина слоя, где образуются пары неравновесных носителей заряда, не превышала диффузионной длины неосновных носителей заряда. Однако в тонком наружном слое полупроводника излучение поглощается незначительно. Для удовлетворения обоих требований солнечные элементы необходимо изготавливать из материалов с большой диффузионной длиной неосновных носителей заряда, зависящего от чистоты полупроводника и регулярности его структуры. Кроме того, следует свести до минимума скорость поверхностной рекомбинации.

На рисунке 1.8 представлена упрощенная эквивалентная электрическая схема фотопреобразователя, а на рисунке 1.9 – вольтамперная характеристика кремниевого фотоэлемента.

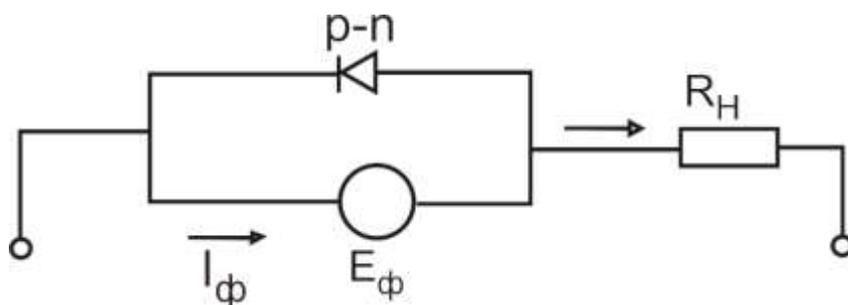


Рисунок 1.8 - Упрощенная эквивалентная схема фотопреобразователя

Сопротивление шунтирующего фото-ЭДС и внутреннее последовательное сопротивление снижают КПД фотоэлемента и вносят значительные коррективы в вольтамперную характеристику солнечного элемента. Все виды электрических потерь составляют 50-55%. У серийных кремниевых фотоэлементов, как правило, плотность тока короткого замыкания $200-250 \text{ А/м}^2$, плотность тока при оптимальной нагрузке $150-200 \text{ А/м}^2$, напряжение холостого хода приблизительно составляет $0,5-0,55 \text{ В}$, напряжение на оптимальной нагрузке $0,35-0,4 \text{ В}$.

Недостатком солнечных фотоэлементов на базе монокристаллов является невозможность получения больших рабочих поверхностей, низкое отношение выходной мощности к массе, а также высокая стоимость. По этим показателям они уступают пленочным фотоэлементам [44].

Пленочные фотоэлементы из сульфида кадмия и теллурида кадмия характеризуются значительно более высоким отношением выходной мощности к массе (разница более, чем в четыре раза), дешевле монокристаллических кремниевых фотоэлементов, обладают достаточно высокой радиационной стойкостью и большим сроком службы. Но при этом их КПД уступает монокристаллическим фотопреобразователям.

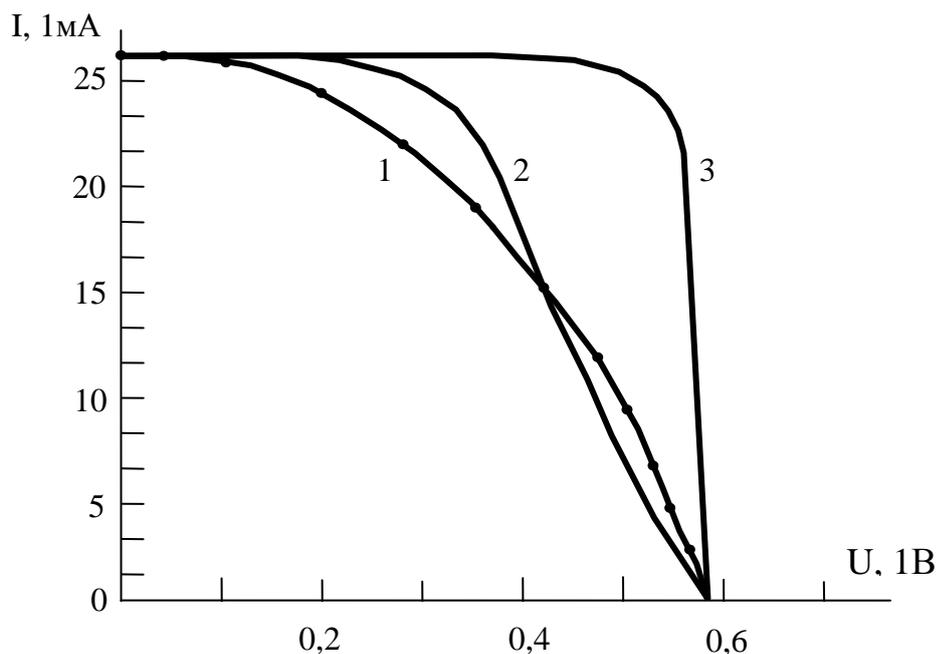


Рисунок 1.9 - Вольт-амперная характеристика кремниевого фотоэлемента

Исследуемые высокоомные эпитаксиальные структуры кремния на низкоомных дешевых подложках кремния могут стать основой для создания высокоэффективных и дешевых фотопреобразователей [45]. Фотоэлементы на основе эпитаксиальных структур обладают рядом особенностей: повышенная фоточувствительность, широкие пределы ватт-амперной характеристики (зависимость тока фотопреобразователя от мощности излучения), происходит логарифмическое возрастание напряжения холостого хода с ростом освещенности (область насыщения отсутствует). КПД таких фотоэлементов соизмерим с КПД монокристаллических фотопреобразователей.

Солнечные фотоэлементы, смонтированные и электрически соединенные по определенным схемам, образуют солнечную фотобатарею. Фотобатареи имеют более низкий по сравнению с отдельными фотоэлементами КПД за счет коммутационных потерь и неидентичности вольт-амперных характеристик фотоэлементов, что приводит при соединении их в батарею к нарушению оптимального режима работы каждого фотоэлемента.

1.6 Обоснование применения электропривода в солнечных фотоэлектрических станциях

В настоящее время во всех странах, активно использующих ВИЭ, в частности СФЭС, применяются системы слежения за Солнцем [46,47]. Существуют основные типы следящих электроприводов:

- шаговый электропривод в режиме программного управления от вычислительной машины;
- следящий шаговый электропривод в режиме автосопровождения с управлением от датчика рассогласования;
- шаговый электропривод в режиме часового завода с управлением от задающего генератора импульсов (только для однокоординатных (экваториальных) систем);
- электропривод постоянного тока непрерывного автосопровождения;
- следящий релейный электропривод постоянного тока в режиме шагового автосопровождения.

Шаговые электроприводы представляются необоснованно дорогими и сложными для гелиоустановок. Кроме этого, работа шагового двигателя на малых частотах вращения сопровождается шумом и вибрациями. Поэтому наиболее предпочтительными по следующим причинам являются простые и недорогие приводы релейного типа:

- при допустимой погрешности $\delta_{\text{п}} = \pm 10^0$ нет смысла в непрерывном автосопровождении – достаточно 8 раз повернуть за световой день фотопанель на 20^0 , в этом случае допустимая погрешность не превысит $\delta_{\text{max}} = 10^0$;
- электрические потери в шаговом режиме намного ниже, чем в режиме непрерывного автосопровождения;
- режимы слежения и переброса осуществляются одним двигателем с номинальной частотой вращения, что упрощает кинематическую цепь и электромеханическую часть привода.

Системы с релейным следящим электроприводом отличаются простотой и надежностью.

Потребители часто используют неподвижные, сориентированные строго на юг системы, но это в основном в частных домах, когда на крышу имеющегося строения крепят неподвижные СФЭС; либо на крышу зданий, где нет возможности устанавливать системы слежения, либо в районах, подверженных сильным ветровым воздействиям. Но в подавляющих случаях все конструкторы стараются устанавливать системы слежения, электроприводы гелиоустановок, так как системы привода СФЭС позволяют экономить и вырабатывать значительное количество электроэнергии, что будет показано ниже.

Так в США и ЕС почти каждая вторая СФЭС имеет следящие приводы. В России также проявляют интерес к этой технологии. В Республике Казахстан по нашему мнению, не уделяется должного внимания этому вопросу. Это

объясняется тем, что в РК не производят солнечные панели, не производят электродвигатели, нет специализированных фирм, которые целенаправленно занимались бы разработкой этого направления энергетики. На сегодняшний день только одна фирма «ND&Co» пытается организовать в РК завод по производству солнечных панелей.

Поскольку промышленно-экономическая база РК основывается на аутсорсинге, то стоимость солнечных панелей на казахстанском рынке очень высока, а из всех типов электроприводов представлена преимущественно дорогостоящая продукция из Индии (примерно 3500\$ для СФЭС мощностью в 1 кВт.). Высокие цены отпугивают потенциальных покупателей, резонно считающих, что дешевле обойтись без привода, чем организовать работу с ним.

В данной работе будет показана необходимость применения электроприводов для СФЭС и будет обоснован экономический эффект от применения электропривода для СФЭС.

1.6.1 Выбор системы координат для опорно-поворотных устройств

Основные положения движения Солнца по небосклону заключается в следующем; положение точки A на земной поверхности относительно солнечных лучей в данный момент времени определяется тремя основными углами – широтой местоположения точки φ , часовым углом r и склонением Солнца δ . Эти углы показаны на рисунке 1.10

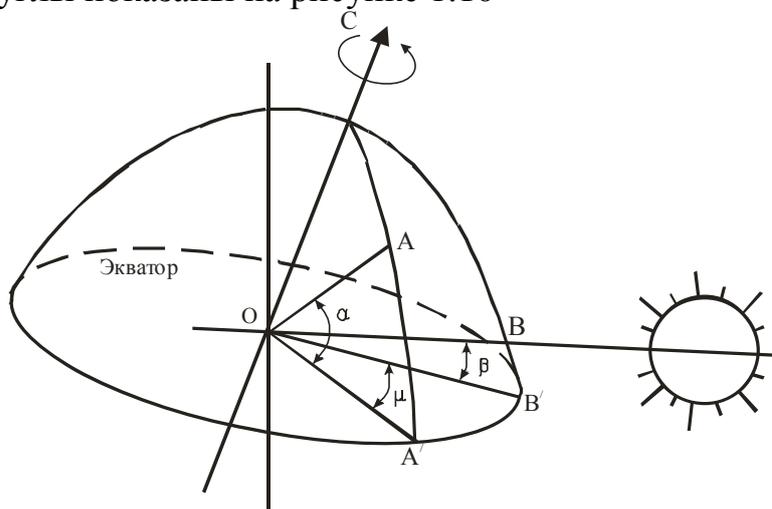


Рисунок 1.10 - Схема движения Солнца по небосклону

Широта φ – это угол между линией, соединяющей точку A с центром Земли, и ее проекцией на плоскости между проекцией OA и проекцией линии, соединяющей центры Земли и Солнца. Угол $r=0$ в полдень, а 1 час соответствует 15° . Склонение Солнца δ – это угол между линией, соединяющей центры Земли и Солнца, и ее проекцией на плоскость экватора. Склонение Солнца в течение года непрерывно меняется от $-23^{\circ}27'$ в день

зимнего солнцестояния 22 декабря до $+23^{\circ}27'$ в день летнего солнцестояния 22 июня. Склонение (в градусах) Солнце в некоторый заданный день определяется по формуле

$$\delta = 23,45 \sin \left[360 \frac{284 + n}{365} \right], \quad (1.7)$$

где n – порядковый номер дня, отсчитанный от первого января.

В таблице 1.3 приводятся данные для n и δ для среднего дня 1..12 месяцев.

Т а б л и ц а 1.3 - Данные для n и δ для среднего дня 12-ти месяцев

n	17	47	75	105	135	162	198	228	258	288	318	344
δ ,град	-20,9	-13	-2,4	9,4	18,8	23,1	21,2	13,5	2,2	-9,6	-18,9	-23

Наряду с тремя основными углами φ , τ , δ в расчетах солнечной радиации используют также зенитный угол z , угол высоты λ и азимут α Солнца. Эти углы показаны в рисунке 1.11

Зенитный угол Солнца z – это угол между солнечным лучом и нормально к горизонтальной плоскости в точке A . Угол высоты Солнца λ – это угол в вертикальной плоскости между проекцией солнечного луча и направлением на юг.

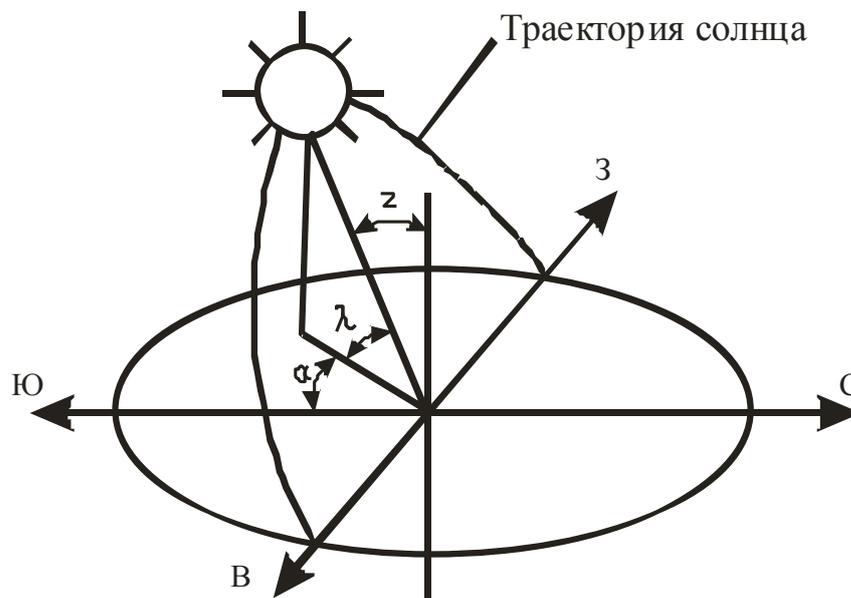


Рисунок 1.11 - Углы, определяющие положение точки A на земной поверхности относительно солнечных лучей

Азимут поверхности α_n измеряется как угол между дополнительными и основными углами, устанавливается следующими уравнениями

1. Зенитный угол

$$\cos z = \cos \tau \cos \varphi \cos \delta + \sin \varphi \sin \delta, \quad (1.8)$$

2. Угол высоты

$$\lambda = 90 - z, \quad (1.9)$$

3. Азимут Солнца

$$\sin\alpha = \sec\lambda\cos\delta\sin\tau. \quad (1.10)$$

Угол падения солнечных лучей на произвольно ориентированную поверхность, имеющую азимут α_n , и угол наклона к горизонту γ определяется по формуле

$$\begin{aligned} \cos\alpha = \sin\gamma(\cos\delta(\sin\varphi\cos\alpha_n\cos\tau + \sin\alpha_n\sin\tau) - \sin\delta\cos\varphi\cos\alpha_n) + \\ + \cos\gamma(\cos\delta\cos\varphi\cos\tau + \sin\delta\sin\varphi). \end{aligned} \quad (1.11)$$

Отсюда угол падения солнечных лучей на произвольную поверхность, имеющую азимут α_n , и угол наклона к горизонту γ определяются по формуле

$$\cos\alpha = \cos\delta\cos\varphi\cos\tau + \sin\delta\sin\varphi. \quad (1.12)$$

Из выражений (1.11) и (1.12) определим для горизонтальной поверхности часовой угол восхода и захода Солнца соответственно

$$\tau_в = \arccos(\operatorname{tg}\varphi\operatorname{tg}\delta), \quad (1.13)$$

$$\tau_з = \arccos(-\operatorname{tg}\varphi\operatorname{tg}\delta). \quad (1.14)$$

Для наклонной поверхности в качестве часового угла захода Солнца принимают меньшую из двух величин: $\tau_з$ или величину $\tau_{з.ч}$, а в качестве часового угла восхода Солнца – большую из двух величин: $\tau_в$ или величину $\tau_{в.ч}$, их рассчитываем по формулам

$$\tau_{з.ч} = \arccos(-\operatorname{tg}(\varphi - \gamma)\operatorname{tg}\delta), \quad (1.15)$$

$$\tau_{в.ч} = \arccos(\operatorname{tg}(\varphi - \gamma)\operatorname{tg}\delta). \quad (1.16)$$

Изложенная информация поможет в дальнейшем понять выбор систем координат опорно-поворотных устройств гелиоустановок. [47,48,49]

1.6.2 Основные типы опорно–поворотных устройств солнечных фотоэлектрических станций

Для СФЭС и прочих гелиоустановок используются азимутально–зенитальное опорно–поворотное устройство (ОПУ), и наведение происходит по двум осям. На рисунке 1.12 представлено азимутально-зенитальное опорно-поворотное устройство СФЭС.

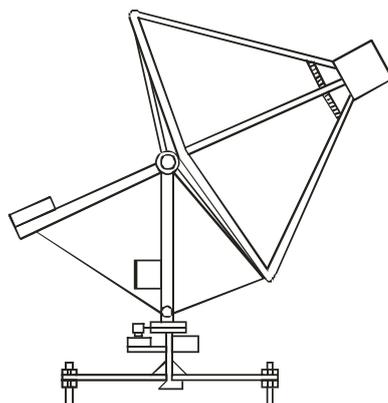


Рисунок 1.12 - Азимутально – зенитальное ОПУ гелиоустановки

Данная конструкция имеет ряд недостатков: сложности передачи теплоносителя к теплообменнику, под действием силы тяжести веса фотопреобразователя возникает опасность расфокусировки установки и пр. В связи с этим интересен предложенный способ нестандартного расположения осей, как это представлено на рисунке 1.13 [46].

Здесь следящий электродвигатель с редуктором вынесен от вертикальной опоры специальным кронштейном. На катушке выходного вала редуктора закреплен трос. Второй трос закреплен на несущем ободе концентратора. Наматыванием троса на катушку меняется угломестное положение концентратора. Для предотвращения раскачивания концентратора от ветра применен дополнительный трос, также крепящийся к ободу концентратора.

Большое распространение получили неподвижные фотоэлектрические гелиоустановки. Однако среднесуточная мощность, вырабатываемая неподвижной солнечной батареей меньше, чем при слежении за Солнцем.

На рисунке 1.14 представлена экспериментально полученная [12,20,47] зависимость фототока I_{ϕ} от угла падения излучения α_i .

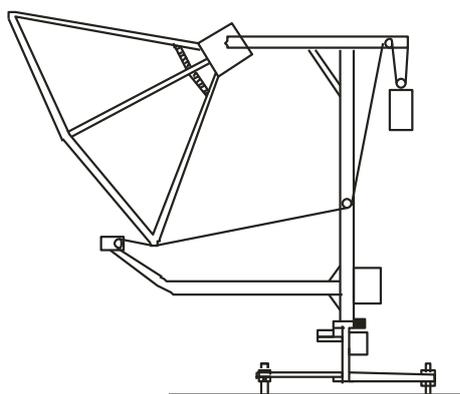


Рисунок 1.13 - Азимутально – зенитальное ОПУ гелиоустановки с вынесенным электроприводом

Методом графического интегрирования среднее значения фототока при изменении углов падения от 0^0 до 180^0 определим $I_{\phi,ср} = 110$ мА.

$$\varepsilon = \frac{I_{\phi.\max} - I_{\phi.\text{ср}}}{I_{\phi.\max}} \cdot 100\% = \frac{196 - 110}{196} \cdot 100\% = 44\%$$

Таким образом, если гелиоустановка неподвижна и сориентирована в полдень по направлению на Солнце, то она теряет порядка 40% по сравнению с подвижной гелиоустановкой при условии, что часовой угол восхода и захода составляет соответственно 0° до 180° и весь световой день доступна прямая солнечная радиация.

Для СФЭС целесообразно применять экваториальную систему координат, где по основной оси положение регулируется автоматически в течение всего дня, а по координате склонения положение достаточно менять вручную несколько раз в год. На рисунке 1.15 представлена ОПУ энергетической СФЭС с экваториальной системой координат.

На оси по координате склонения 1 расположена наклонная ось по основной координате 2, верхний конец которой крепится к опоре. Вращение по оси 1 осуществляется вручную, вращение по оси 2 осуществляется с использованием СЭП-3, которая управляется от блока управления 4. На основной оси укреплен фотоприемник 5.

При необходимости автоматического регулирования по двум осям экваториальную систему координат использовать нецелесообразно, так как вследствие наклонного положения основной оси проявляется ряд недостатков, делающих азимутально-зенитальную систему координат более предпочтительной.

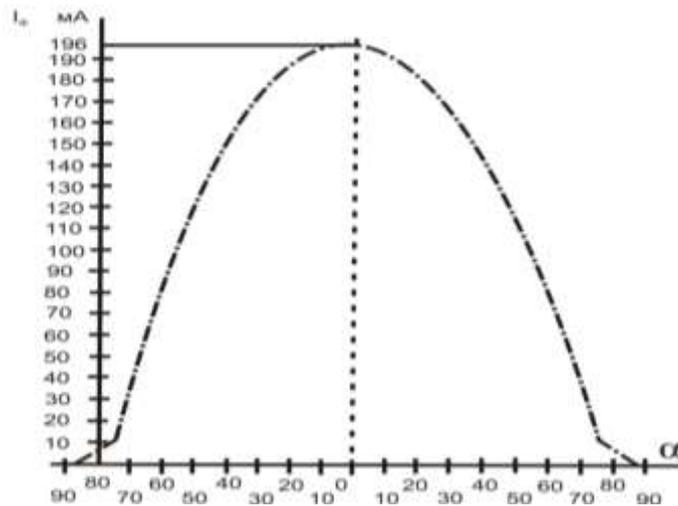


Рисунок 1.14 - Зависимость силы тока фотопреобразователя от угла падения излучения

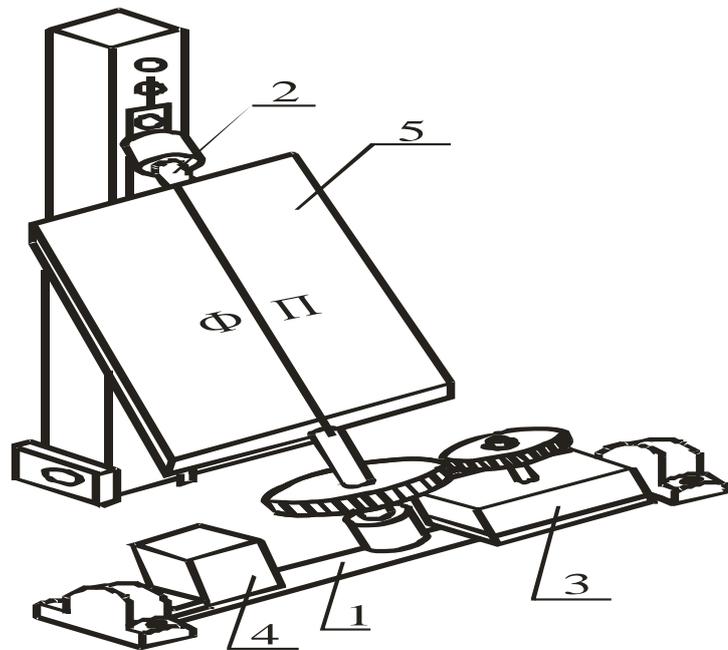


Рисунок 1.15 - Экваториальная ОПУ энергетической гелиоустановки с управлением по одной координате

1.6.3 Электроприводы, применяемые в солнечных фотоэлектрических станциях

Электроприводы слежения солнечных фотоэлектрических станций работают, как правило, по двум осям координат. Для ориентации СФЭС используют системы электроприводов следующих видов:

- шаговый электропривод в режиме программного управления от вычислительной машины или в режиме часового завода с управлением от задающего генератора импульсов (для экваториальных координатных осей);
- следящий шаговый электропривод в режиме автосопровождения с управлением от датчика рассогласования;
- следящий электропривод постоянного тока с управлением в режиме непрерывного слежения за солнцем.

В настоящее время можно предположить, что компьютерное управление будет вытесняться, уступая место управлению от датчиков рассогласования для всех типов энергетических гелиоустановок [48,49,50] обеспечивающих высокую точность, широкий угол захвата и высокую надежность,

До настоящего времени шаговый электропривод представлялся необоснованно сложным, дорогим и энергетически неэффективным. Кроме того, СФЭС вырабатывает постоянный ток, который затем, если это необходимо, может преобразовываться в переменный. На основании этого можно сделать вывод, что для осуществления процесса слежения за Солнцем СФЭС наибольшую целесообразность представляет электропривод постоянного тока с управлением от системы наведения с фотодатчиком [52].

В качестве силового преобразователя напряжения для питания двигателя постоянного тока в режиме непрерывного автосопровождения Солнца может быть использован тиристорный преобразователь, преобразователь на транзисторах, работающий в усилительном режиме и широтно-импульсный преобразователь на транзисторах [53].

Самым неэффективным с точки зрения экономии энергии является преобразователь на транзисторах, работающий в усилительном режиме. КПД такой схемы приблизительно определяется следующим образом

$$\eta_{\text{эфф}} \approx \frac{U_2}{U_1},$$

где U_1 – напряжение на выходе преобразователя, В;

U_2 – напряжение на входе преобразователя, В.

При коэффициенте запаса по скорости, равным 10, КПД в режиме слежения не будет превышать 10%, что очень неэкономично. Однако такой способ регулирования напряжения в электроприводе гелиоустановок на практике достаточно распространенный, что объясняется простотой реализации и надежностью. Для применения тиристорного преобразователя должна быть возможность подачи переменного тока на вход преобразователя. В случае, если гелиоустановка работает как автономный источник питания, вырабатывающий постоянный ток с последующим преобразованием его в переменный, то необходимо учитывать не только КПД тиристорного преобразователя, но и КПД инвертора. Кроме того, в гелиоустановках мощность используемых двигателей, как правило, не превышает 1кВт, а часто бывает даже менее 100 Вт. Необходимость использования сглаживающего реактора на выходе тиристорного преобразователя требует обратной связи по току и скорости с целью улучшения динамики системы. Таким образом, нельзя ограничиться одноконтурной системой управления, рассматриваемой ниже [54].

Наибольший интерес представляет широтно-импульсный преобразователь. Современные полупроводниковые приборы способны обеспечить частоту коммутации до 20 кГц и выше. Этого достаточно, чтобы при установленном сглаживающем реакторе, электрохимическая постоянная времени была больше в четыре раза. $\left(\frac{T_M}{T_{яц}} \gg 4 \right)$. Однако с

возрастанием частоты коммутации потери в транзисторных ключах и магнитопроводе двигателя [55].

Основным недостатком широтно-импульсного преобразователя является сложность и следовательно, сравнительная надежность.

Применение одноконтурной структуры системы управления СЭП достаточно для большинства типов гелиоустановок. Для достижения более точных показателей предлагается использовать отрицательную обратную связь по скорости. Также большое внимание уделяется способам компенсации люфта в механической части привода. При этом рассматриваются следующие способы компенсации: применение механического торсионного устройства, использование фрикционного тормоза на выходном валу, использование многодвигательных СЭП [56,57]. Все перечисленные способы ведут к дополнительным потерям мощности, усложнению системы электропривода и повышению ее стоимости. В энергетических гелиоустановках люфт, как правило, меньше допустимой ошибки слежения. Поэтому, если механический расчет показывает приемлемость возникающих в механической части ударных нагрузок, целесообразно вообще отказаться от всяких способов компенсации люфта [58].

Для СФЭС, целесообразно применять релейный следящий электропривод постоянного тока с управлением от системы наведения на солнце с фотодатчиком в режиме пошагового слежения за солнцем.

1.6.4 Развитие теории и практики электромеханических систем, используемых для электроприводов солнечных фотоэлектрических станций

Огромное множество функциональных задач, решаемых электромеханическими системами (ЭМС), предъявляют основные требования и стандарты к их техническим и другим показателям. Таким как, экономические, экологические, эргономические. В этом отношении имеет значение точность, быстродействие, диапазон допустимых изменений рабочих показателей, электромагнитная совместимость с другими компонентами электроэнергетических систем, энергетическая эффективность (энергосбережение) и т.д.

Все это приводит к необходимости создания сложных ЭМС, в состав которых, кроме основного системообразующего компонента – электромеханического преобразователя (ЭМП), – могут включаться разнообразные преобразователи электрической, механической и других видов энергии, устройства контроля, управления, защиты и пр. В качестве подтверждения можно привести ряд примеров подобных ЭМС [59].

Электроприводы – устройства, функциональное назначение которых состоит в преобразовании электрической энергии в механическую. Требования, предъявляемые к названным системам, (например, точность поддержания выходного напряжения и частоты переменного тока, являющиеся важными параметрами, или обеспечение заданного рабочего органа электропривода), приводят к появлению сложных ЭМС, включающих разнообразные элементы и использующих различные методы и способы управления, применение корректоров и регуляторов напряжения (РН), в

качестве которых в настоящее время используются полупроводниковые РН интегральной конструкции, специальных элементов защиты (предохранители, диоды защиты, реле, контакторы и т.п.), контактной или бесконтактной аппаратуры релейного действия, датчиков скорости, момента, положения, потока, оптимизаторов, счетных устройств и пр. [60,61].

Современные микроконтроллеры представляют собой однокристалльные микро-ЭВМ, цифровые сигнальные процессоры, адаптированные к задачам управления в реальном времени с целым рядом интегрированных устройств; аналогово-цифровые преобразователи (АЦП) для ввода сигналов аналоговых датчиков, формирователями выходных ШИМ-сигналов для прямого цифрового управления силовыми преобразователями, портами для сопряжения с системами управления более высокого уровня и т.д. [62].

Среди преимуществ микроконтроллеров следует назвать:

- гибкость, понимаемую как возможность оперативного изменения структуры, алгоритмов и параметров системы управления;
- возможность реализации наряду с традиционными алгоритмами управления, принятыми в аналоговых системах, более сложных алгоритмов, характеризующих адаптивные, самонастраивающиеся, взаимосвязанные и многоконтурные системы управления;
- оперативное тестирование и диагностику текущего состояния управляемой системы и ее элементов, способствующих раннему обнаружению неисправностей и предупреждению аварий;
- более высокую точность обработки информации, поскольку в цифровых системах отсутствуют источники погрешностей, характерные для аналоговых управляющих устройств;
- простота запоминания, хранения и визуализации параметров процессов управления, возможность оперативного взаимодействия с обслуживающим персоналом;
- большую надежность, меньшую массу, габариты и стоимость микроконтроллерных и компьютерных систем управления.

Наличие в составе микропроцессоров запоминающих устройств большого объема позволяет реализовать достаточно сложные алгоритмы обработки данных и сделать энергетические объекты информационно прозрачными. При этом даже при наличии широко известных методов прямого измерения, необходимых для управления величин (например, динамического момента [63]), становится возможным, имея небольшое число датчиков, и соответственно, каналов сбора первичной информации, определять необходимую дополнительную информацию с помощью моделей в реальном масштабе времени и повышать качество управления с помощью различных схем наблюдателей. Такая тенденция подкрепляется наличием недостатков преобладающего в настоящее время подхода прямого использования сигналов датчиков для решения задач регулирования электроприводом [64], а именно:

- завышенные требования к разрешающей способности первичных измерителей;
- завышенные требования к быстродействию цифровой системы управления.

В [22] рассматривается система автоматического регулирования частотно – регулируемого электропривода на основе ПЧ с ШИМ, где используется модель асинхронного двигателя, в которой через каждые 25 мкс осуществляется вычисление скорости АД (асинхронный двигатель) и частоты выходного тока автономного инвертора напряжения. Таким образом, модель осуществляет организацию обратных связей по регулируемым параметрам в системе автоматического регулирования.

В целом введение в состав технических систем информационных компонентов, позволяет перейти к созданию систем эффективного управления [65]. Этот класс систем характеризуется наличием в своем составе наряду с энергетическими компонентами, развитой информационной подсистемы. В которую входят, совокупность датчиков, преобразователей сигналов, в которых хранится модель поведения системы. Программы обработки приходящей информации и выработки управляющих сигналов.

Для большей эффективности, получаемой от применения современных микроконтроллерных средств, составляющих основу информационных подсистем, и их интеллектуализации, необходимо развитие системного подхода к проектированию и исследованию электромеханических систем и комплексов, то есть системы электрооборудования необходимо рассматривать как комплекс взаимодействующих составляющих: потребителей электроэнергии, преобразователей, устройств коммутации и защиты, силовой сети, первичных источников [67]. Это дает возможность анализировать сравнивать и синтезировать системы в целом, определять направления их развития. Новые системы следует создавать, рассматривая и принимая в расчет весь трактат преобразования энергии от первичного источника до каждого конкретного потребителя энергии независимо от его конструктивного и компоновочного положения в системе, учитывая переходные процессы в системе в целом, особенно там, где источники энергии обладают мощностью, соизмеримой с мощностью потребителей.

Возможность энергосбережения средствами электропривода на практике реализуется следующими путями. Первый путь – правильный выбор двигателей по мощности имеет важное значение для массовых электроприводов продолжительного режима работы. Второй путь – использование специальных энергосберегающих двигателей (также при условии правильности выбора по мощности), в которых за счет увеличения массы активных материалов (сталь, медь) повышены номинальные значения КПД и $\cos\varphi$. Этот путь особенно важен для приводов, работающих с постоянной нагрузкой. Третий путь – оптимизация электроприводов по критерию минимума потерь энергии (или максимума энергетической эффективности).

Проведенные за последние годы исследования показывают, что наряду с улучшением технологических характеристик механизмов, переход к регулируемому электроприводу может обеспечить в среднем снижение на 20-30% электроэнергии, потребляемой электродвигателями, что позволяет экономить более 10% производимой электроэнергии [67]. Дополнительные затраты связанные с применением регулируемого электропривода окупаются в течение одного года, до трех лет.

С учетом вышеприведенных экономических доводов эта задача сводится к оптимизации по энергетическим показателям регулируемых электроприводов, работающих в статических режимах с постоянной или медленной меняющейся нагрузкой, а также к выбору оптимальных (эффективных) режимов работы ЭМС по критериям энергетической эффективности или позиционирования. Это задачи об изменении (стабилизации) скорости вращения с минимизацией потерь (энергопотребления) и предельным быстродействием (фиксированным временем).

Поисковые системы экстремального управления обеспечивают нахождение экстремума некоторого энергетического показателя посредством пробных шагов, движения к экстремуму и последующую работу объекта в этой точке до очередного воздействия возмущающего фактора на объект. Одномерные системы экстремального регулирования, предназначенные для отыскания оптимального режима работы по одному каналу, рассматриваются в [57], где в соответствии с принципом, используемым для определения движения системы к экстремуму, предложена следующая классификация:

- системы с запоминанием экстремума, реагирующие на разность между наибольшим достигнутым в предыдущие моменты времени значением выхода и текущим значением;
- системы шагового типа, реагирующие на значение приращения выходной величины;
- системы, реагирующие на знак или производной dy/dx или dy/dt ;
- системы со вспомогательной модуляцией, которые определяют направление движения к экстремуму по сдвигу фазы между входными колебаниями объекта.

Преимущества поисковых систем экстремального управления – высокая точность поддержания экстремума при минимальном количестве датчиков, независимость от типа двигателя. Однако такие системы обладают рядом недостатков: сравнительно невысокое быстродействие, наличие дополнительных потерь, затрачиваемых на поиск экстремума, относительная сложность реализации. Поэтому электроприводы могут применяться в системах с медленно изменяющейся нагрузкой.

Под влиянием возрастающих требований к энергетическим характеристикам электроприводов и их влиянию на сеть развитие получают преобразователи, обеспечивающие экономичные способы управления электроприводами.

Современный электропривод, благодаря возможностям управления, все в большей степени позволяет повышать производительность и качество технологических процессов при эффективном расходовании энергии.

Конечная цель работы состоит в создании совокупности математических и компьютерных моделей динамических процессов, определяющих уровень функциональных показателей электромеханических систем, а также в применении этих моделей для поиска и исследования алгоритмов эффективного управления.

1.7 Выводы по разделу

В течение года основная солнечная энергия поступает в летние и весенне-осенние месяцы. Около 80% солнечной энергии приходится на апрель-октябрь и только 20% - на ноябрь-март. Краткий анализ свидетельствует о больших энергетических ресурсах Казахстана; о тех возможностях, которые могут быть использованы при решении практических задач развития ВИЭ, в частности, гелиотехники.

Проведенные литературно-патентные исследования подтверждают необходимость разработки и создания СЭП для СФЭС.

Подтверждается необходимость выполнения работы по поиску оптимального режима управления СЭП с целью экономии электрической энергии и реализации максимального КПД СФЭС.

Для оптимизации СФЭС наведения на Солнце представляется необходимым рассмотрение пошагового режима автосопровождения Солнца.

Преимущества поисковых систем управления – высокая точность поддержания экстремума при минимальном количестве датчиков независимо от типа двигателя.

Благодаря возможностям управления, следящий электропривод, позволяет повышать КПД СФЭС при рациональном расходовании энергии.

2. Выбор и обоснование режима слежения за Солнцем

2.1 Основные режимы работы солнечных фотоэлектрических станций

Нагрузку на электропривод СФЭС составляют силы трения в кинематической цепи и ветровая нагрузка. Мощность, поглощаемая силами трения в механических передачах может в несколько раз превышать мощность на выходе кинематической цепи. Ветровая же нагрузка имеет непостоянный, непрогнозируемый характер.

Основные режимы следящего электропривода СФЭС можно разделить на две категории – рабочие и вспомогательные. К рабочим относятся режимы слежения, реализуемые путем программного управления или автосопровождения. В программном управлении закон движения объекта слежения известен и рассчитывается заранее. В режиме слежения за солнцем, получение сигнала управления связано непосредственно с объектом слежения. К вспомогательным режимам относят «переброс» исполнительного вала, «поиск» и «захват» объекта слежения. Вспомогательные режимы используются при подготовке СФЭС к работе при проведении профилактического обслуживания, для разворота с запада на восток после захода Солнца, для захвата цели в начале дня или после выхода Солнца из-за горизонта (если используется режим автосопровождения).

Элементы электропривода СФЭС должны допускать эксплуатацию во всем диапазоне температур данного района и должны быть защищены от атмосферных осадков и попадания влаги.

2.2 Схема следящего электропривода солнечных фотоэлектрических станций

При решении вопросов о структуре электропривода необходимо учесть следующие требования: надежность; простота обслуживания; высокая степень автоматизации, предполагающая длительное время (месяцы) эксплуатацию СФЭС без вмешательства человека; обеспечение допустимых точностных показателей; ограничение ударных нагрузок в силовой части привода; минимальные капитальные вложения; энергосбережение; защита от ветровых нагрузок.

Основные особенности электроприводов СФЭС обусловлены малыми скоростями перемещения рабочего органа. Наибольшая скорость слежения за движением Солнца на широте 40° составляет $50^{\circ}/\text{час} = 2,4 \cdot 10^{-4}$ рад/с. Чтобы оценить мощность требуемого исполнительного двигателя, на практике можно пользоваться эмпирической зависимостью – 10 Вт мощности электродвигателя на 1000 Вт выходной электрической мощности СФЭС в режиме непрерывного слежения за Солнцем. Для реализации вспомогательных режимов такой мощности недостаточно. Тем не менее, даже

для достаточно больших СФЭС используются двигатели малой мощности, у которых, как правило, электромагнитная постоянная времени во много раз меньше электромеханической постоянной времени. Таким образом, двигатель представляет собой апериодическое звено второго порядка с существенным запасом по динамической устойчивости.

Следящим называется привод, предназначенный для осуществления с определенной степенью точности механических перемещений, задаваемых маломощным измерительным органом, который сам функции привода выполнять не может. Следящий привод представляет собой программный регулятор, обрабатывающий механические перемещения. Однако программа в большинстве случаев не является заранее predetermined. Поэтому, в отличие от регуляторов для следящего привода характерно не свободное движение, определяемое только параметрами системы регулирования, а вынужденное движение.

Следящий привод может быть двух типов: прерывистого действия (контактно-релейный) и непрерывного действия. Для СФЭС применяется первый тип, его мы будем рассматривать.

Перемещение рабочего органа рабочей машины в соответствии с поворотом задающей оси осуществляется посредством исполнительного двигателя ИД. Наличие изоляционного промежутка в следящем приводе обуславливает некоторую зону нечувствительности. Поэтому для повышения точности отработки заданного угла необходимо стремиться к уменьшению изоляционного промежутка. Здесь возможны колебания привода около положения равновесия, при некотором запасе кинетической энергии. Поэтому после отключения система мгновенно остановиться не может и продолжает двигаться в том же направлении. Система может прийти в состояние равновесия лишь после ряда колебаний.

Величина момента двигателя не зависит от угла рассогласования. При замыкании щетки с полукольцом якорь двигателя сразу же переключается на полное напряжение; момент двигателя оказывается весьма большим, и система приобретает значительное ускорение.

Следящий электропривод энергетической СФЭС достаточно выполнить одноконтурным с отрицательной обратной связью по положению.

Механическую часть СФЭС можно считать двухмассовой системой. Частота свободных колебаний оказывается невысокой и составляет 1...2 Гц [67]. Резонансные частоты, фазы и амплитуды колебаний, возникающие в механической части, мало зависят от параметров двигателя. Как правило, в энергетических гелиоустановках отсутствует необходимость в дополнительной коррекции по снижению колебательности. Вопрос о применении люфто-компенсирующих устройств в механической части привода решается по результатам расчета возмущающих воздействий.

Во всех режимах требуется одинаковый крутящий момент на выходном валу. Таким образом, регулирование скорости уменьшения магнитного потока нецелесообразно. Применение коробки скоростей также не оправдывает себя.

В результате возникает необходимость проектировать электропривод, сопоставляя номинальную скорость двигателя скорости перемещения установки во вспомогательных режимах; при этом предполагается, что рабочие режимы непрерывного слежения будут осуществляться при скоростях меньше номинальной. В связи с этим представляется более рациональным применение релейного электропривода, реализующего пошаговый режим слежения.

2.3 Особенности режимов работы солнечных фотоэлектрических станций и требования к их электроприводам

Для получения более полных и достоверных результатов исследования необходимо правильно выбрать и обосновать расчетный режим работы СЭП СФЭС, а также характер возмущающих воздействий, воздействующих на него.

Исследования СЭП СФЭС проводилось на основе методов комплексных планомерных экспериментов. В качестве объекта исследования использовалась расчетная модель обобщенного СЭП СФЭС. Структура расчетной модели получена в работе и в результате анализа и обобщения всех приемлемых для СФЭС структур СЭП [69].

Все режимы работы СЭП можно условно разделить на две категории: рабочие режимы и вспомогательные. К рабочим режимам относятся режимы слежения, реализуемые путем программного управления или автосопровождения.

В программном управлении закон движения объекта слежения известен и рассчитывается заранее. Следящий электропривод отработывает заданный закон движения исполнительного вала, который является входным сигналом системы. В режиме слежения закон движения объекта неизвестен. Получение сигнала управления связано непосредственно с объектом слежения.

В дальнейшем, режим программного управления рассматриваться не будет [70].

К вспомогательным режимам относятся «переброс» исполнительного вала, «поиск» и «захват» объекта слежения, в которых точность СЭП строго не регламентируется. Вспомогательные режимы используются при подготовке СФЭС к работе при проведении профилактического обслуживания, а также для обеспечения технологических операций (например, смена испытуемого образца в солнечных печах). В этих режимах кинематический люфт и возмущающие воздействия по нагрузке не оказывают существенного влияния на работу электропривода. Влияние люфта и нагрузки можно рассматривать только в отношении прочности механической части, энергетических показателей и устойчивости электропривода. Отмеченные вспомогательные режимы входят в автоматизированный цикл работы СФЭС, при котором действия оператора сведены к минимуму.

В данной работе за основу принят рабочий режим слежения СЭП, а именно автосопровождение Солнца, точность которого определяет качество главного технологического режима СФЭС. В связи с этим структура СЭП, ее линейность или нелинейность оценивается, в отличие от теории автоматического регулирования, с позиций рабочего режима СЭП. В терминологии теории автоматического регулирования линейность или нелинейность системы определяется в зависимости от отсутствия или присутствия в ее составе нелинейного элемента [71]. Однако сам факт присутствия нелинейного элемента в системе еще не определяет свойств системы в ее технологическом режиме. В зависимости от ряда условий и типа элемента его нелинейность может и не сказаться на рабочем режиме системы, которая при этом не будет подобна линейной системе [72].

В следящем электроприводе СФЭС основной нелинейностью является кинематический люфт. Если пренебречь другими нелинейностями, то под линейным будем подразумевать режим СЭП, когда крутящий момент непрерывно передается по кинематической цепи от двигателя к исполнительному валу либо в обратном направлении, т.е. в кинематической цепи имеется постоянно действующее механическое напряжение. Величина передаваемого через кинематическую цепь момента должна быть достаточна, чтобы в системе не возникали автоколебания. Минимальную величину ($M_{мин}$) можно определить, например, методом гармонической линеаризации. Отсутствие пересечения характеристики линейной части системы $W_l(j\omega)$ с обратной амплитудной характеристикой люфта $1/W_{нэ}(j\omega)$, которая зависит от величины момента нагрузки, свидетельствует об отсутствии нелинейных автоколебаний. В общем виде условие линейности СЭП СФЭС можно записать в следующем виде

$$|M_{к.ц}| = \left| M_{тр} \pm M_{ветр} \pm J_{и.в} \frac{d\omega_{и.в}}{dt} \right| \geq M_{мин} . \quad (2.1)$$

где $M_{к.ц}$ – крутящий момент, передаваемый по кинематической цепи, $Нм$;
 $M_{тр}$ – суммарный момент вязкого и сухого трения на исполнительном валу, $Нм$;
 $M_{ветр}$ – момент ветровой нагрузки на исполнительном валу, $Нм$;
 $J_{и.в}$ – момент инерции исполнительного механизма, $кгм^2$;
 $\omega_{и.в}$ – угловая скорость исполнительного вала, $рад/с$.

Основным источником механического напряжения в кинематической цепи СФЭС является суммарный момент трения на исполнительном валу. Это частично или полностью может компенсироваться постоянной составляющей момента ветровой нагрузки. В этом случае неравенство (2.1) выполняться не будет. Система электропривода будет работать в нелинейном режиме [72].

В неблагоприятных случаях, когда постоянная составляющая ветрового момента полностью компенсирует момент трения, «выбросы» ошибки будут

следовать с частотой ветровых флуктуаций. Величина среднеквадратичной ошибки возрастает в несколько раз по сравнению с линейной системой. Даже если момент трения скомпенсирован не полностью, частота повторения «выбросов»-ошибок может быть велика.

На рисунке 2.1 показан случай полной компенсации момента трения на исполнительном валу. При неполной компенсации момента меняется меньшее число колебаний за период наблюдения. Очевидно, что наиболее неблагоприятные условия для работы СЭП с кинематическим люфтом создаются при скомпенсированном моменте трения на исполнительном валу.

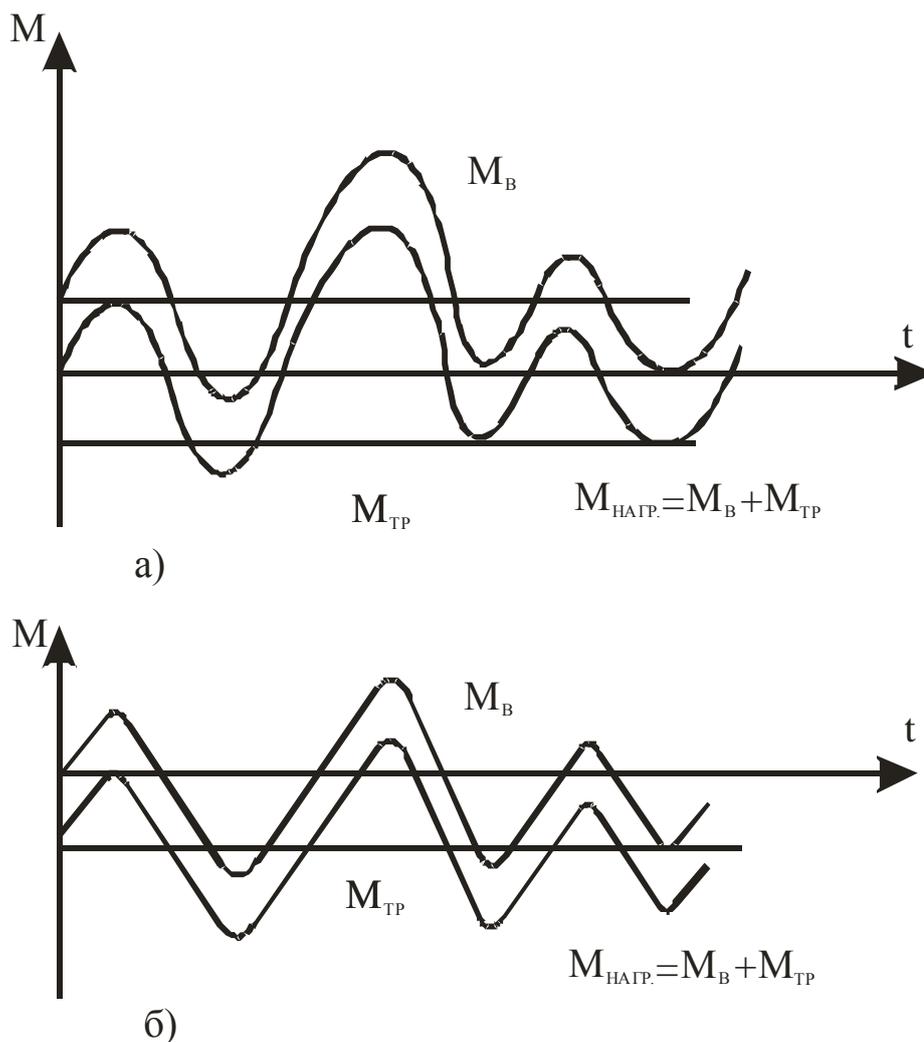


Рисунок 2.1 - Процессы изменения знака суммарного момента нагрузки на исполнительном валу при полной компенсации момента трения постоянной составляющей момента ветровой нагрузки (а) и неполной компенсации (б)

В случае, если суммарный момент нагрузки на исполнительном валу равен нулю, а ветровые флуктуации отсутствуют, основной проблемой в нелинейном СЭП являются автоколебания [73].

В настоящей главе будут рассмотрены вопросы точности нелинейных СЭП в условиях полной компенсации момента трения на исполнительном валу постоянной составляющей момента ветровой нагрузки при наличии ветровых флуктуаций. Подобные условия работы СЭП создаются при изменении силы и направления ветра либо при повороте исполнительного вала. Длительность сложившейся ситуации зависит от скорости вращения исполнительного вала, а также от соотношения моментов трения и ветровой нагрузки.

2.4 Обоснование основной структуры следящего электропривода солнечных фотоэлектрических станций

В общем случае структура СЭП многоконтурна, где под контуром понимается совокупность звеньев, охваченных обратной связью. Получившие широкое распространение системы электропривода с оптимизированными по методу подчиненного регулирования контурами тока и скорости находят применение и в следящих электроприводах, структуры которых дополняются контуром угла.

Класс рассматриваемых приводов характеризуется сравнительно малой мощностью – до 1 кВт. Такие приводы в большинстве случаев не нуждаются в токоограничении. Это объясняется повышенной перегрузочной способностью применяемых специальных двигателей малой мощности. Для самых маломощных приводов (менее 50-100 Вт) имеет место естественное токоограничение за счет достаточно большого сопротивления якорной цепи в системе «преобразователь-двигатель». Кроме того, броски тока в якорной цепи слабодинамичных СЭП можно ограничить действием регулятора положения в контуре угла [74]. Поэтому в структуре СЭП СФЭС нет необходимости предусматривать контур тока. Достаточно ограничиваться только контурами скорости и угла.

Контур скорости обеспечивает повышение стабильности движения установки в зоне низких скоростей, а также позволяет расширить полосу пропускания электропривода, что способствует повышению динамической точности СЭП. Окончательно необходимые динамические свойства и требуемые точностные показатели СЭП в целом придает регулятор положения в контуре угла.

В зависимости от установленной мощности СЭП меняется тип управляемого преобразователя напряжения. Наиболее целесообразными для СЭП СФЭС в отношении точности, простоты технической реализации и эксплуатации представляются транзисторные и тиристорные преобразователи. Тип и исполнение управляемого преобразователя напряжения во многом определяют структуру СЭП.

Принимая во внимание значительную жесткость конструкции исполнительного механизма СФЭС, делаем допущение, что вся упругая податливость системы обусловлена кинематической цепью, состоящей из

третьего порядка сделало бы его неустойчивым, а следовательно, неработоспособным.

Следящая система с астатизмом второго порядка ($v=2$) менее чувствительна к нелинейностям характеристик элементов, чем система с $v=3$, и обладает большими точностными возможностями, чем СЭП с астатизмом первого порядка. Поэтому за основу принята структура СЭП с астатизмом $v=2$ [80].

В схеме СЭП (рис 2.2) астатизм второго порядка реализуется посредством пропорционально-интегрально-дифференциального регулятора в контуре угла, передаточная функция которого имеет следующий вид

$$W_{pn}(P) = \frac{U_{pn}(P)}{U_{\delta}(P)} = \frac{(T_{k1}P + 1)(T_{k2} + 1)}{T_0 P}, \quad (2.2)$$

где $U_{pn}(P)$ - изображение Лапласа выходного напряжения регулятора положения;
 $U_{\delta}(P)$ – то же выходного напряжения измерительного устройства;
 T_0, T_{k1}, T_{k2} – постоянные времени регулятора положения.

Интегральная составляющая в (2.2) повышает астатизм СЭП до второго порядка, а основная дифференцирующая составляющая $T_{kj}P$ компенсирует ухудшение фазы от интегрирования, обеспечивая тем самым устойчивость в системе. Дополнительный пропорционально-дифференциальный оператор – $T_{k2}P + 1$ расширяет полосу пропускания и дополнительно увеличивает устойчивость СЭП [75].

Пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор положения можно рекомендовать для всех типов СФЭС, где требуется повышенная точность слежения. Определение параметров регулятора будет рассмотрено в работе ниже. Для обобщения возможных структур СЭП СФЭС следует обратить внимание на передаточную функцию системы преобразователь-двигатель, т.к. именно эта часть схемы СЭП будет в дальнейшем видоизменяться. Передаточная функция системы преобразователь-двигатель, при допущении что постоянная времени преобразователя имеет малую величину ($T_{\Pi} \cong 0.001$), описывается следующей передаточной функцией

$$W_{nd}(P) = \frac{\omega_{\delta\delta}(P)}{U_{pn}(P)} = \frac{K_c}{T_{M1}P(T_{Я}P + 1) + 1}, \quad (2.3)$$

где $K_c = K_n K_{\delta}$ - коэффициент передачи контура скорости, $1/BC$;
 K_n – коэффициент передачи управляемого преобразователя напряжения;
 K_{δ} - коэффициент передачи двигателя $1/BC$;
 T_{M1} – электромеханическая постоянная времени двигателя, с;

T_J – электромагнитная постоянная времени якорной цепи двигателя.

Отсутствие коэффициентов перед постоянными T_{M1} и T_J в знаменателе выражения (2.3) говорит о том, что в подобной простейшей схеме без обратных связей и дополнительных регулирующих звеньев затруднительно менять нужным образом соотношение между этими постоянными, особенно, если это связано с их уменьшением.

Область применения одноконтурных структур в СЭП СФЭС широка. В такой структуре технически довольно просто реализуется точность слежения, достаточная для большинства технологических процессов осуществляемых с помощью СФЭС [11,12].

2.5 Оценка экономии энергозатрат в электроприводе слежения солнечной фотоэлектрической станции

При переходе от непрерывного движения к пошаговому режиму автосопровождения Солнца, экономию энергии в электроприводе можно оценивать на основании коэффициента эффективности, представляющего отношение потерь в приводе при непрерывном слежении к потерям при шаговом слежении [76]

$$K_{\text{эфф}} = \frac{\Delta P_{\text{СП}} \cdot t_c}{\Delta W_{\text{ш}} \cdot N_{\text{ш}}} \quad (2.4)$$

где $\Delta P_{\text{СП}}$ – общие потери мощности в двигателе и силовой электрической части при непрерывном слежении, Вт;

$\Delta W_{\text{ш}}$ – потери энергии в двигателе при отработке одного шага, Дж;

t_c – время непрерывного слежения, с;

$N_{\text{ш}}$ – число шагов за время слежения.

Потери $\Delta P_{\text{СП}}$ будем определять для электропривода с преобразователем напряжения на транзисторах, работающих в усилительном режиме. Такой электропривод примем за базовый вариант. Отметим, что механическая часть при переходе от непрерывного к шаговому режиму не изменилась. Это возможно благодаря тому, что непрерывное слежение осуществляется при скорости двигателя значительно меньше номинальной. Более высокие скорости резервируются для режима «переброса», когда установка после захода Солнца совершает поворот с запада на восток, и для режима «захвата цели». Потери в приводе представим как сумму постоянных и переменных потерь в двигателе, а также потерь в силовом регуляторе напряжения

$$\Delta P_{\text{СП}} = \Delta P_{\text{СТ}} + \Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{доб}} + \Delta P_{\text{Я}} + \Delta P_{\text{ш}} + \Delta P_{\text{СП}} + \Delta P_{\text{СР}}, \quad (2.5)$$

где $\Delta P_{ст}$ и $\Delta P_{мех}$ – потери в стали и механические потери в двигателе при скорости, соответствующей скорости непрерывного слежения, Вт;
 $\Delta P_{доб}$ и $\Delta P_{ст}$ – добавочные потери и потери в обмотке возбуждения, Вт;
 $\Delta P_{я}$ – потери в обмотке якоря, Вт;
 $\Delta P_{щ}$ – потери мощности на щеточных контактах в двигателе, Вт;
 $\Delta P_{ср}$ – потери мощности в силовом регуляторе напряжения, Вт.

Считаем, что магнитный поток в двигателе постоянен и равен номинальному, потери в стали и механические потери в двигателе представим в следующем виде [77]

$$\Delta P_{ст} = \Delta P_{ст.ном} \cdot \left[\frac{\omega_c \cdot i}{\omega_{ном,дв}} \right]^{1.3},$$

$$\Delta P_{мех} = \Delta P_{мех.ном} \cdot \left[\frac{\omega_c \cdot i}{\omega_{ном,дв}} \right]^{1.3}, \quad (2.6)$$

где ω_c – скорость исполнительного вала в процессе непрерывного слежения, рад/с;
 i – передаточное отношение кинематической цепи;
 $\omega_{ном,дв}$ – номинальная скорость двигателя, рад/с.

Переменные потери в двигателе определяются уравнениями

$$\Delta P_{я} = I_{ст}^2 \cdot R_{ном},$$

$$\Delta P_{щ} = 2U_{щ} \cdot I_{ст}, \quad (2.7)$$

где $I_{ст}$ – статический ток якоря двигателя, А;
 $U_{щ}$ – падение напряжения на щеточном контакте, Вт;
 $R_{н}$ – сопротивление якоря, Ом.

Потери мощности в силовом регуляторе представим выражением

$$\Delta P_{ст} = \Delta U_{ср} \cdot I_{ст}, \quad (2.8)$$

где $U_{ср}$ – падение напряжения в силовом регуляторе напряжения, В.

Основную нагрузку на двигатель составляют силы сухого и вязкого трения в кинематической цепи. Доля ветровой нагрузки невысока. Учитывая, что статический ток $I_{ст}$ и напряжение U_c – могут отличаться от естественно номинального тока $I_{н}$ и номинального напряжения $U_{н}$ двигателя, определим падения напряжения на силовом регуляторе из условий

$$U_c = E_{дв} + I_{ст} \cdot R_{н} + \Delta U_{ср},$$

$$U_H = E_{двН} + I_H \cdot R_H, \quad (2.9)$$

где $E_{дв}$ и $E_{двН}$ - ЭДС двигателя в рабочем режиме непрерывного слежения и в номинальном режиме соответственно, В.

$$\begin{aligned} E_{дв} &= \kappa \Phi \cdot i \omega_c, \\ E_{двН} &= \kappa \Phi \omega_c, \end{aligned} \quad (2.10)$$

где κ – конструктивный коэффициент двигателя;
 Φ – магнитный поток в двигателе, Вб.

Из выражения (2.9) и (2.10) падение напряжения на силовом регуляторе определится так

$$\Delta U_{CP} = \kappa \Phi \omega_H \cdot \left[1 - \frac{\omega_c \cdot i}{\omega_{НОМ,ДВ}} \right] + (I_H + I_{CT}) R_H + (U_C - U_H). \quad (2.11)$$

Длительность непрерывного слежения определится так

$$t_c = \frac{\theta_3}{\omega_c}. \quad (2.12)$$

где θ_3 – результирующий угол поворота за весь сеанс слежения.

Потери энергии в двигателе и силовой электрической части при обработке одного шага определим следующим образом

$$\begin{aligned} \Delta W_{Ш} &= \int_0^{t_1} \left[\Delta P_{CT,НОМ} \left[\frac{\omega \cdot i}{\omega_{НОМ,ДВ}} \right]^{1,3} + \Delta P_{МЕХ,ИКМ} \cdot \left[\frac{\omega \cdot i}{\omega_{НОМ,ДВ}} \right] \right] dt + \\ &+ \int_0^{t_1} (I^2 R_H + (2U_{Щ} + U_{CP}^{ПК}) I + \Delta P_H + \Delta P_{ДОП}) dt + \Delta W_n^{III}, \end{aligned} \quad (2.13)$$

где t_1 – длительность работы двигателя в течение шага, с;
 ΔU_{CT}^{III} - падение напряжения на силовом ключе в открытом состоянии, В;
 W_{CT}^{III} - потери энергии при переходном процессе тока возбуждения, Дж.

Используемый двигатель слежения может быть с независимой обмоткой возбуждения или с возбуждением от постоянных магнитов.

Предполагается, что обмотка возбуждения в перерывах между шагами отключается, и момент ее включения опережает момент подачи напряжения

на якорь двигателя на некоторое время t_0 . Потери в системе возбуждения за это время достаточно оценить приближенно:

$$\Delta W_n^{\text{III}} = \int_0^{t_0} I_H R_H dt = I_{\text{HMT}}^2 R_H \int_0^{t_0} \left[1 - e^{-\frac{t}{T_M}} \right] dt \approx I_{\text{HMT}}^2 R_H (t_0 - 1.5T) = \Delta P_n (t_0 - 1.5T_B) \quad (2.14)$$

при $t_0 > 3T_B$.

Если система возбуждения двигателя выполнена на основе постоянных магнитов, то во всех расчетах необходимо принять $\Delta P_B = 0$.

В выражении (2.13) скорость исполнительного вала ω и якоря I являются функцией от времени

$$\omega = \omega_{\text{III}} \left[1 - e^{-\frac{t}{T_M}} \right], \quad (2.15)$$

$$I = I_{C2} + (I_{K3} - I_{CT}) e^{-\frac{t}{T_M}}. \quad (2.16)$$

В выражениях (2.15) и (2.16) не учтена электромагнитная постоянная времени якорной цепи. Допущения определяются тем, что для двигателей малой мощности выполняется условие $T_M \gg T_{\text{яц}}$. Зависимость скорости, угла поворота и тока якоря двигателя от времени представлены на рисунке 2.3

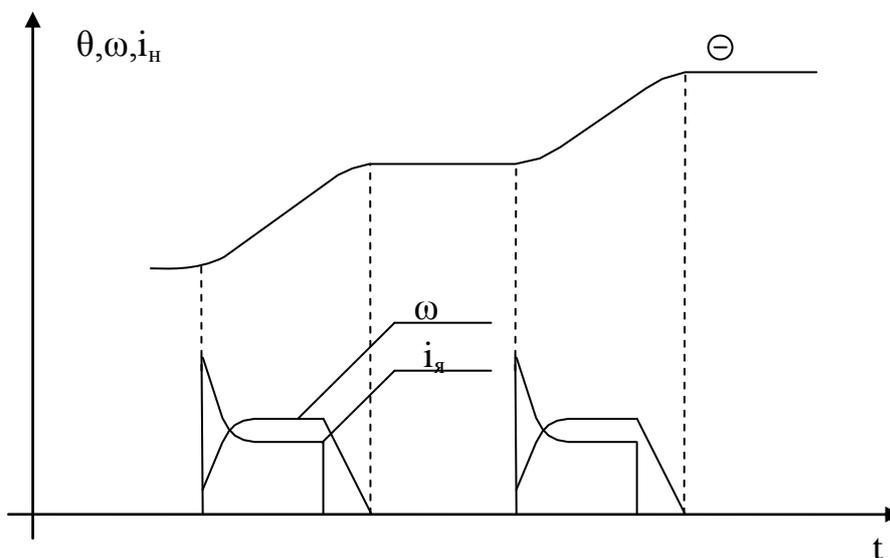


Рисунок 2.3 – Зависимость тока двигателя ($i_{\text{я}}$) скорости (ω) и угла поворота (Θ) от времени при пошаговом режиме автосопровождения Солнца

В течение переходного периода ток якоря двигателя существенно превышает номинальный. В результате реакции якоря происходит снижение магнитного потока двигателя. Однако длительность интервала времени, когда

наблюдаются наиболее высокие значения тока якоря, намного меньше длительности переходного процесса в целом. Кроме того, при проектировании двигателей малой мощности принимают повышенные меры для снижения реакции якоря. В связи с этим для оценки мощности в выражении (2.13) принято, что магнитный поток в двигателе постоянен и равен номинальному.

Интеграл в выражении (2.13) определится следующим образом

$$\begin{aligned}
& \int_0^{t_0} \left[\Delta P_{CT.HOM} \left[\frac{\omega \cdot i}{\omega_{НОМ.ДВ}} \right]^{1.3} + \Delta P_{МЕХ.КМ} \left[\frac{\omega \cdot i}{\omega_{YJV/LD}} \right] - I^2 R_H + (2U_{Щ} + U_{CP}^{HOM}) \cdot I + \Delta P_B + \Delta P_{ДОБ} \right] dt = \\
& = \Delta P_{CT.HOM} \left[\frac{\omega \cdot i}{\omega_{НОМ.ДВ}} \right]^{1.3} \cdot \int_0^{t_0} \left[1 - e^{-\frac{t}{T_1}} \right]^{1.3} dt + \Delta P_{МЕХ.НОМ} \frac{\omega_C \cdot i}{\omega_{НОМ.ДВ}} \int_0^{t_1} \left[1 - e^{-\frac{t}{T_M}} \right] dt + \\
& + R_H \int_0^{t_1} \left(I_{C2} + (I_{K3} - I_{C2}) \cdot e^{-\frac{t}{T_M}} \right)^2 dt + (2U_{Щ} + \Delta U_{CP}) \cdot \int_0^{t_1} \left[I_{C2} - (I_{K3} - I_{C2}) \cdot e^{-\frac{t}{T_M}} \right] dt + \Delta P_B t_1 + \Delta P_{ДОБ} t_1.
\end{aligned} \quad (2.17)$$

Интегрирование (2.17) осуществляем с допущением, что степень 1.3 подынтегральной функции $\left[1 - e^{-\frac{t}{T_1}} \right]^{1.3}$, заменяется на единицу. Интегрирование (2.17) приводит к следующему выражению

$$\begin{aligned}
\Delta W_{Щ} &= \Delta P_{CT.HOM} \left[\frac{\omega_C \cdot i}{\omega_{НОМ.ДВ}} \right]^{1.3} \cdot \left[t + T_M \cdot e^{-\frac{t}{T_M}} \right]_0^{t_1} + \Delta P_{МЕХ.НОМ} \frac{\omega_C \cdot i}{\omega_{НОМ.ДВ}} \left[t + T_M e^{-\frac{t}{T_M}} \right]_0^{t_1} + \\
&+ R_H \left[I_{C2}^2 + 2I_{C2}(I_{K3} - I_{C2}) \left[-T_M e^{-\frac{t}{T_M}} \right] \right]_0^{t_1} + (2U_{Щ} + \Delta U_{CT}) \left[I_{CT} t + (I_{K3} - I_{C2}) \left[T_M e^{-\frac{t}{T_M}} \right] \right]_0^{t_1} + \\
&+ \Delta P_B t_1 + \Delta P_{ДОБ} + \Delta P_H (t_B - 1.5T_B) = \\
&= \left(\left[\frac{\omega_{Щ} \cdot i}{\omega_{НОМ.ДВ}} \right] \Delta P_{МЕХ/НОМ} + \left[\frac{\omega \cdot i}{\omega_{НОМ.ДВ}} \right]^{1.3} \Delta P_{CT/НОМ} + \Delta P_{ДОБ} + \Delta P_H \right) \cdot t_1 + \\
&+ (I_{C2}^2 R_H + (2U_{Щ} + U_{CP}^{CT}) \cdot t_1) + T_M \left[\frac{\omega_{Щ} \cdot i}{\omega_{НОМ.ДВ}} \right] (\Delta P_{CT.HOM} + \Delta P_{МЕХ.НОМ}) \cdot \left[e^{-\frac{t_1}{T_M}} - 1 \right] - \\
&T_M (I_{K3} - I_{C2}) (2U_{Щ} + U_{CP}^{CT} + 2I_{C2} R_{Я}) \cdot \left[e^{-\frac{t_1}{T_M}} - 1 \right] + \\
&+ \left[(I_K - I_{C2})^2 \left[-\frac{T_M}{2} \right] \cdot R_{Я} \left[e^{-\frac{2t_1}{T_M}} - 1 \right] + \Delta P_B (t_0 - 1.5T_B) \right].
\end{aligned}$$

Полученное выражение можно упростить, если учесть, что при установившейся скорости $\omega_{Щ}$ исполнительного вала в течение шага, вал двигателя вращается со скоростью номинальной или близкой к номинальной.

Возможное отклонение установившейся скорости вала двигателя от номинальной учтем коэффициентом

$$K_{OT} = \frac{\omega_{\text{ш}} \cdot i}{\omega_{\text{НОМ.ДВ}}} . \quad (2.18)$$

При этом число шагов за сеанс слежения определится выражением

$$N_{\text{ш}} = \frac{\theta_1}{\theta_{\text{ш}}} , \quad (2.19)$$

где $\theta_{\text{ш}}$ – величина шага (1.7). Запишем выражение в следующем виде

$$K_{\text{эфф}} = \frac{\theta_{\text{ш}}}{\omega_C} \cdot \frac{A \left[\frac{\omega_C}{\omega_{\text{ш}}} \right] + D}{\Delta P_{\text{уст}} \cdot K_1 \cdot t_1 + K_1 e^{-\frac{t_1}{T_M}} + K_2 e^{-\frac{2t_1}{T_M}} + K_3} , \quad (2.20)$$

где $A \left[\frac{\omega_C}{\omega_{\text{ш}}} \right]$, полином от $\frac{\omega_C}{\omega_{\text{ш}}}$.

$$A \left[\frac{\omega_C}{\omega_{\text{ш}}} \right] = K_{OT} \Delta P_{\text{мех.ном}} \cdot \left[\frac{\omega_C}{\omega_{\text{ш}}} \right] + K_{OT}^{1,3} \Delta P_{\text{ст.ном}} \cdot \left[\frac{\omega_C}{\omega_{\text{ш}}} \right]^{1,3} + K \Phi \omega_H \left[1 - \frac{\omega_C}{\omega_{\text{ш}}} \cdot K_{OT} \right] ,$$

где D – параметр, не зависящий от скорости вращения вала двигателя.

$$D = \Delta P_{\text{доб}} + \Delta P_{\text{я}} + I_{C1}^2 R_{\text{я}} + 2U_{\text{ш}} I_{C1} + (I_H + I_{C1}) I_{C1} R_{\text{я}} + (U_C - U_H) I_{C1} ,$$

где $\Delta P_{\text{уст}}$ – потери в течение шага в установившемся режиме, Вт.

$$\Delta P_{\text{уст}} = K_{OT} \Delta P_{\text{мех.ном}} + K_{OT}^{1,3} \Delta P_{\text{доб}} + \Delta P_{\text{я}} + I_{C2}^2 R_{\text{я}} + (2U_{\text{ш}} + U_{\text{ср}}^{\text{от}}) I_{C2} ,$$

где K_1, K_2, K_3 – коэффициенты,

$$K_1 = T_M K_{OT} (\Delta P_{\text{ст.ном}} + \Delta P_{\text{мех.ном}}) - T_M (I_{K3} - I_{C2}) (2U_{\text{ш}} + U_{\text{ср}}^{\text{ном}} + 2I_{C2} R_H) ,$$

$$K_2 = (I_{K1} - I_{C2})^2 \left[-\frac{T_M}{2} \right] \cdot R_{\text{я}}$$

$$K_3 = -K_1 - K_2 + \Delta P_H (t_0 - 1.5T_0) , \quad \text{или}$$

$$K_3 = T_M \cdot \left[\frac{1}{2} (I_{K3} - I_{C2})^2 \cdot R_{Я} + (I_{K1} - I_{K2}) \cdot (2U_{Ш} + U_{CP}^{НОМ} + 2I_{C2}R_{Я}) - K_{OT} (\Delta P_{СТ.НОМ} + \Delta P_{Мех.НОМ}) \right] + \Delta P_B (t_0 - 1.5T_B). \quad (2.21)$$

Выражение (2.21) хорошо поддается анализу для определения влияния на коэффициент K_3 параметров двигателя.

Величина шага $\theta_{Ш}$ представляет собой сумму перемещений при работающем двигателе и торможении

$$\Theta_{Ш} = \theta_1 + \theta_2. \quad (2.22)$$

Торможение происходит при разомкнутой цепи якоря, за счет сил трения. Основное уравнение механического движения для этого случая запишется в следующем виде

$$-M_i = J' \frac{d\omega_{ДВ}}{dt}, \quad (2.23)$$

где M_i – момент сопротивления на валу двигателя, н·м;

J' - момент инерции привода, приведенный к валу двигателя, кг·м²;

$\omega_{ДВ}$ – скорость двигателя в начале торможения, рад/с.

Из уравнения (2.23) определяем величину $\omega_{ДВ}$

$$\omega_{ДВ} = \omega_{нач} i - \frac{M_c}{J'} t, \quad (2.24)$$

где $\omega_{нач}$ – скорость двигателя в начале торможения, рад/с.

$$\omega_{НАЧ} = \omega_{Ш} i \left[1 - e^{-\frac{t_1}{T_M}} \right]. \quad (2.25)$$

Угол поворота рабочего органа за время торможения t_τ до полного останова.

$$\theta_2 = \frac{1}{i} \int_0^{t_\tau} \left(\omega_{нач} - \frac{M_c}{J'} t \right) dt = \frac{1}{i} \left[\omega_{нач} t - \frac{M_c}{2J'} t^2 \right]_0^{t_\tau} = \frac{1}{i} \omega_{нач} t_\tau - \frac{M_c}{2iJ'} t_\tau^2. \quad (2.26)$$

Время торможения определим из уравнения (2.23)

$$0 = \omega_{нач} - \frac{M_c}{J'} t_\tau, \quad (2.27)$$

$$t_\tau = \omega_{нач} \frac{J'}{M_c}.$$

Таким образом выводим θ_2 из выражений (2.25), (2.26), (2.27)

$$\theta_2 = \frac{J' \cdot i}{2M_c} \omega_{Ш}^2 \left[1 - e^{-\frac{t_1}{T_M}} \right]^2. \quad (2.28)$$

Угол поворота рабочего органа за время работы двигателя определяется так

$$\theta_1 = \omega_u \int_0^{t_1} \left[1 - e^{-\frac{t}{T_M}} \right] dt = \omega_{ш} \left[t + T_M e^{-\frac{t}{T_M}} \right]_0^{t_1} = \omega_o \left[t_1 + T_M e^{-\frac{t_1}{T_M}} - T_M \right] . \quad (2.29)$$

Окончательно получаем величину шага следующим образом

$$\theta_{ш} = \omega_u t_1 + \frac{\omega_{ш}^2 J' \cdot i}{2M_c} \left[1 - e^{-\frac{t_1}{T_M}} \right]^2 + \omega_u T_M e^{-\frac{e_1}{T_M}} - T_M \omega_u . \quad (2.30)$$

Если принять, что $t_1 > (3...4)T_M$, то величину шага можно определять по выражением

$$\theta_{ш} = \omega_{ш} (t_1 - T_M) . \quad (2.31)$$

Выражение для коэффициента эффективности можно упростить

$$K_{эфф} = \frac{\omega_u}{\omega_c} \cdot \frac{A \left[\frac{\omega_c}{\omega_u} \right] + D}{\Delta P_{уст} + B \frac{\omega_u}{\theta_{ш}}} , \quad (2.32)$$

где B – параметр, отражающий потери энергии в переходном процессе

$$B = K_3 + T_M \Delta P_{уст} .$$

Если система возбуждения двигателя выполнена на постоянных магнитах, то параметр B определится так

$$B = T_M \cdot \left[\frac{1}{2} (I_{кз} - I_{C2})^2 \cdot R_{я} + (I_{кз} - I_{C2}) \cdot (2U_{щ} + U_{ср}^{от} + 2I_{C2} R_{я}) - K_{ом} (\Delta P_{ст.ном} + \Delta P_{Мех.ном}) + \Delta P_{уст} \right] . \quad (2.33)$$

На рисунке 2.4 представлены зависимости $K_{эфф}$ от $\theta_{ш}$, построенные по выражению (2.32), при использовании двигателя постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов МЭ215. Номинальная мощность двигателя 50Вт. Электромеханическая постоянная времени привода принята 0.1с, электромагнитная постоянная времени принята равной нулю. Рисунок 2.8 отражает зависимость $K_{эфф}$ от θ_3 , при постоянной скорости шага $\omega_{ш} = 4,3 \cdot 10^{-3}$ рад/с и разных отношениях $\omega_{ш} / \omega_c$.

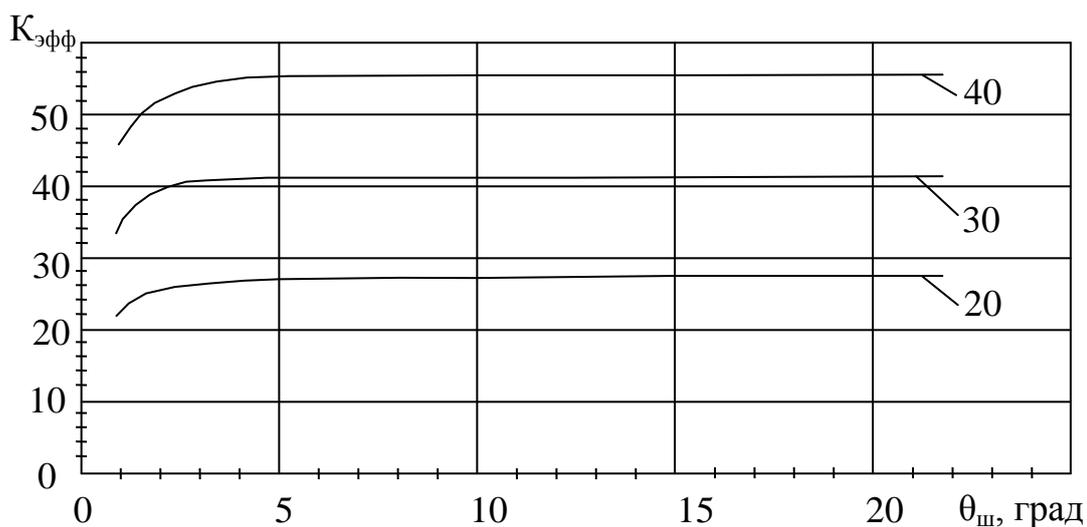


Рисунок 2.4 - Зависимость $K_{эфф}$ и $\theta_{ш}$ при неизменной скорости шага $\omega_{ш} = 4,3 \cdot 10^{-3}$ рад/с и разных отношениях $\omega_{ш} / \omega_c$

По графику видно, что в рассматриваемом варианте коэффициент эффективности высокий и остается высоким даже при достаточно малых величинах шага порядка $0,5^{\circ}$.

При мощности двигателя слежения 50 Вт экономия потерь в результате перехода от непрерывного к пошаговому режиму автосопровождения Солнца может быть сравнимой с номинальной мощностью двигателя и достигать до 50% энергии, потребляемой электроприводом от сети.

Релейный электропривод постоянного тока, реализующий пошаговый режим автосопровождения Солнца энергетически более эффективен, чем электропривод на базе преобразователя с широтно-импульсной модуляцией. По сравнению с базовым вариантом электропривода при использовании релейного электропривода энергия экономится в преобразователе и в якорной цепи двигателя, а при использовании широтно-импульсной модуляции – только в преобразователе.

Далее выводим обобщенную функцию эффективности пошагового режима. Определение целесообразности перехода от непрерывного к пошаговому режиму по условию энергосбережения должна определяться на основе сравнения энергии, теряемой в фотопреобразователе ΔW_{ϕ} за весь сеанс слежения, и энергии, сэкономленной в электроприводе $\Delta W_{оп}$ в результате такого перехода. При этом корректно поставить задачу определения оптимальной величины шага $\theta_{ш}$.

$$f(\theta_{ш}) = \Delta W_{оп} - \Delta W_{\phi}. \quad (2.34)$$

Решение этой задачи сводится к нахождению наибольшего значения функции, в некоторых ограниченных пределах значений $\theta_{ш}$. Минимальные значения могут быть ограничены опасностью существенного снижения ресурса надежности системы вследствие частых включений двигателя, а

максимальные значения – целесообразностью применения системы наведения как таковой. Отметим, что необходимым условием целесообразности пошагового режима является наличие положительных значений функции (2.11) в указанных пределах $\theta_{ш}$.

Экономии энергии по сравнению с базовым электроприводом за весь период слежения определим так

$$\Delta W_{эн} = \Delta P_{CT} t_c \left(1 - \frac{1}{K_{эфф}}\right). \quad (2.35)$$

Коэффициент $K_{эфф}$ целесообразно определять по выражению (2.32).

Величину $\Delta W_{ф} = N_{ш} \cdot \Delta W_{ш}$ определим с использованием выражений (2.13) и (2.37). В итоге энергия, теряемая фотопреобразователем за весь сеанс слежения, в результате перехода от непрерывного к пошаговому режиму слежения определится так

$$\Delta W_{ф} = \Delta P_{CT} t_c \left(1 - \frac{I}{K_{эфф}}\right).$$

Величину $\Delta W_{ф} = N_{ш} \cdot \Delta W_{ш}$ определим с использованием выражений (2.12). В результате энергия теряемая в фотопреобразователе за весь сеанс слежения, в результате перехода от непрерывного к пошаговому режиму слежения определится так

$$\Delta W_{ф} = \frac{P_{ш} \cdot \omega_{ш} \cdot \theta_3}{(\omega_{ш} - \omega_c) \cdot \omega_c \cdot \omega_{ш}} (\alpha_1 - \sin \alpha_1 - \alpha_2 + \sin \alpha_2). \quad (2.36)$$

Рассмотрим две функции $f(\theta_{ш})$.

Если $\alpha_1 = -\alpha_2 = \frac{\theta_{ш}}{2}$, то

$$f_1(\theta_{ш}) = \Delta P_{CT} t_c \left[1 - \frac{\omega_c}{\omega_{ш}} \cdot \frac{\Delta P + B \frac{\omega_{ш}}{\theta_{ш}}}{A + D} \right] - \frac{P_{ш}}{\omega_c} \cdot \frac{\theta_{ш}^2}{24} \theta_3,$$

или после преобразований

$$f_1(\theta_{ш}) = \theta_3 \left[\frac{\Delta P_{CT}}{\omega_c} - \frac{\Delta P_{уст} + B \frac{\omega_{ш}}{\theta_{ш}}}{\omega_{ш}} - \frac{P_{ш}}{\omega_c} \cdot \frac{\theta_{ш}^2}{24} \right]. \quad (2.37)$$

Если $\alpha_1 = 0$ и $\alpha_2 = -\theta_{ш}$

или $\alpha_1 = \theta_{ш}$ и $\alpha_2 = 0$, то

$$f_2(\theta_{ш}) = \Delta P_{CT} t_C \left[1 - \frac{\omega_C}{\omega_{ш}} \cdot \frac{\Delta P + B \frac{\omega_{ш}}{\theta_{ш}}}{A + D} \right] - \frac{P_{ш}}{\omega_C} \cdot \frac{\theta_u^2}{24} \theta_3,$$

или после преобразований

$$f_2(\theta_{ш}) = \theta_3 \left[\frac{\Delta P_{CT}}{\omega_C} - \frac{\Delta P + B \frac{\omega_{ш}}{\theta_{ш}}}{A + D} - \frac{P_{ш}}{\omega_C} \cdot \frac{\theta_u^2}{6} \right]. \quad (2.38)$$

Выражения (2.13) и (2.32) получены в результате ряда упрощений. Очевидно, что принятые приближения ограничивают рассматриваемые в (2.36) и (2.37) значения $\theta_{ш}$ некоторыми пределами, которые можно приблизительно оценить снизу порядка $0,1^0$, сверху – около 30^0 . В использовании более точных формул необходимости нет, т.к. данные пределы вполне соответствуют уже оговоренному кругу ограничений.

Определим экстремумы функции $f_1(\theta_{ш})$

$$\frac{\partial f_1}{\partial \theta_{ш}} = \frac{B \cdot \theta_3}{\theta_{ш1}^2} - \frac{P_{ш}}{\omega_C} \cdot \frac{\theta_{ш1} \cdot \theta_3}{12},$$

$$\frac{\partial f_1}{\partial \theta_u} = 0.$$

Отсюда следует

$$\theta_{ш1} = \sqrt[3]{\frac{12 \cdot B \omega_C}{P_{ш}}}. \quad (2.39)$$

Определим экстремумы функции $f_2(\theta_{ш})$

$$\frac{\partial f_2}{\partial \theta_{ш}} = \frac{B \cdot \theta_3}{\theta_{ш2}^2} - \frac{P_{ш}}{\omega_C} \cdot \frac{\theta_{ш2} \cdot \theta_3}{3},$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial \theta_u} = 0.$$

Отсюда следует

$$\theta_{ш2} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot B \omega_C}{P_{ш}}}. \quad (2.40)$$

Выражения (2.38) и (2.39) поддаются простому качественному анализу. Оптимальный шаг увеличивается с возрастанием скорости движения Солнца и

возрастанием потерь энергии в переходных процессах в электроприводе. С возрастанием установленной мощности фотоприемника оптимальный шаг уменьшается. Данные утверждения представляются вполне очевидными.

Выражения (2.38) и (2.39) можно обобщить

$$\theta_{\text{опт}} = \sqrt[3]{\frac{K_{\text{ш}} \cdot B \omega_c}{P_{\text{ш}}}}. \quad (2.41)$$

где $K_{\text{ш}}$ коэффициент принимает значения в зависимости от соотношения углов α_1 и α_2 .

$$K_{\text{ш}} = \frac{3 \cdot (\alpha_1 / \alpha_2 - 1)^3}{(\alpha_1 / \alpha_2)^3 - 1}$$

или

$$K_{\text{ш}} = \frac{3 \cdot (1 - \alpha_2 / \alpha_1)^3}{1 - (\alpha_2 / \alpha_1)^3}. \quad (2.42)$$

При постановке реальных значений при использовании в качестве исполнительного двигателя постоянного тока МЭ215 для фотопреобразователя с выходной мощностью 1000 Вт получаются следующие результаты

$$\theta_{\text{ш1}} = 0,0192 \text{ рад} = 1,1^{\circ},$$

$$\theta_{\text{ш2}} = 0,012 \text{ рад} = 0,7^{\circ}.$$

На практике точность расчетов по формулам (2.38) и (2.39) не может быть высокой, в связи с этим целесообразно рассмотреть вопрос о влиянии величины шага от оптимального значения на изменение значений функции $f(\theta_{\text{ш}})$. Анализ показывает, что при изменении величины шага в пределах от $0,7^{\circ}$ и 3° , отношение для выбранного варианта меняется в пределах 2%.

$$\frac{f_2}{\Delta P_{\text{ст}} \cdot t_c}.$$

Очевидно, что в практических целях в рассматриваемом варианте шаг целесообразно выбрать из отрезка $[0,7^{\circ}; 3^{\circ}]$, отдавая при этом предпочтение значениям, близким к 3° . В соответствии с требованием сбережения ресурса надежности системы, значения величин шага меньше оптимального значения использовать не следует.

На рисунке 2.5 для разработанного электропривода представлена диаграмма обобщенной функции f в зависимости от величины шага $\theta_{\text{ш}}$, представлена в относительных единицах: $f^*(\theta_{\text{ш}}^*) = f(\theta_{\text{ш}})/f(\theta_{\text{опт}})$,

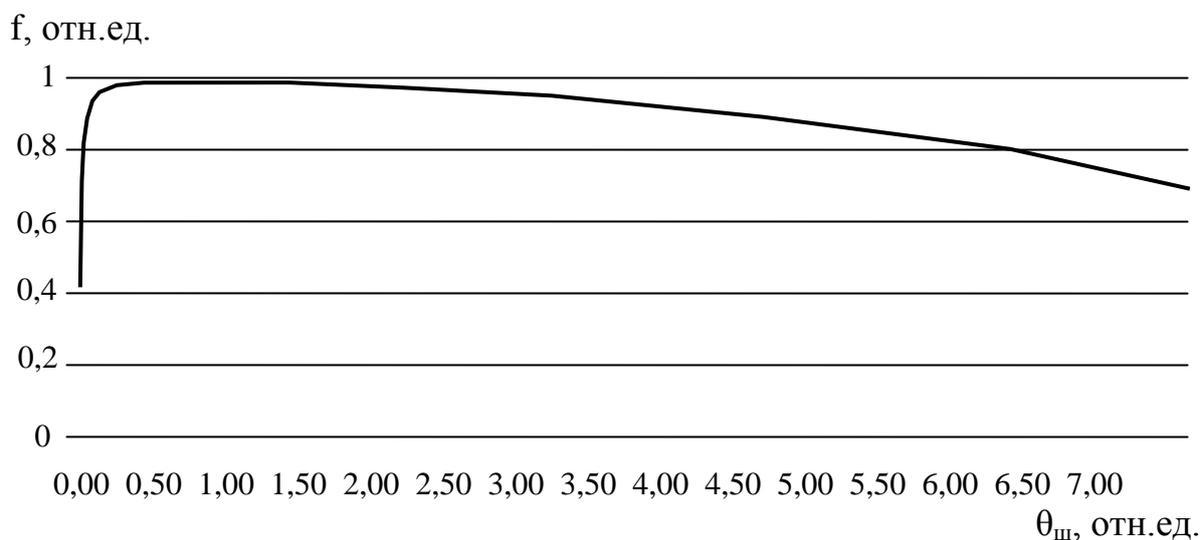


Рисунок 2.5 - Диаграмма зависимости обобщенной функции эффективности пошагового режима от величины шага при выполнении условия минимума потерь в фотоприемнике (в относительных единицах) $\theta_{ш}^* = \theta_{ш}/\theta_{\text{опт}}$

В заключение отметим, что если по результатам расчета величины оптимального шага принимают очень малые значения, то необходимо рассмотреть целесообразность перехода к режиму непрерывного автосопровождения Солнца. Если же величины оптимального шага принимают большие значения (20° и выше), то необходимо рассмотреть целесообразность перехода к неподвижному варианту исполнения гелиоустановки.

2.7 Выводы по разделу

Исследованы особенности и требования к режимам работы электроприводов СФЭС. Основные режимы следящего электропривода СФЭС рабочие и вспомогательные. К рабочим относятся режимы слежения, К вспомогательным режимам относят «переброс» исполнительного вала, «поиск» и «захват» объекта слежения. Элементы электропривода СФЭС должны допускать эксплуатацию во всем диапазоне температур, данного района и должны быть защищены от атмосферных осадков и попадания влаги.

Исследованы основные режимы работы солнечных фотоэлектрических станций, а именно рабочий режим. В случае, если суммарный момент нагрузки на исполнительном валу равен нулю, а ветровые флуктуации отсутствуют, то основной проблемой СЭП являются автоколебания.

Исследована оценка экономии энергии в электроприводе слежения солнечной фотоэлектрической станции. Наиболее оптимальным является пошаговый режим слежения за Солнцем, кроме этого привод достаточно выполнять одноконтурным, с отрицательной обратной связью по положению.

3 Определение мощности двигателя следящего электропривода солнечной фотоэлектрической станции

3.1 Исследование факторов, влияющих на требуемую мощность двигателя следящего электропривода

Требуемую мощность двигателя слежения можно рассчитать по формуле

$$P_{сл} = K_з \frac{(M_{ветр} + M_{тр} + M_{дисб})\omega_{и.вал}}{\eta_{кц}}, \quad (3.1)$$

где $M_{ветр}$ – расчетное значение момента сил вращения фотоприемника, обусловленного действием ветра Н;
 $M_{тр}$ – момент трения в опорах фотоприемника, Н;
 $M_{дисб}$ – момент сил вращения фотоприемника, обусловленный дисбалансом моментов вращения, определяемых весом фотоприемника и уравнивающего груза, Н;
 $\omega_{и.вал}$ – максимальная требуемая скорость исполнительного вала, рад/с;
 $\eta_{кц}$ – КПД кинематической цепи;
 $K_з$ – коэффициент запаса по мощности двигателя.

Момент вращения $M_{ветр}$ определяется на основании опытных данных по аналогии с подобными установками. [78] Определение аналитической зависимости, отражающей влияние реальных факторов на $M_{ветр}$ – одна из задач, имеющих важное практическое значение при расчете мощности двигателя слежения и расчетах надежности конструкции. Момент трения в опорах фактически представляет собой момент трения в подшипниках, на которых крепится несущий вал фотоприемника. $M_{тр}$ зависит от радиального результирующего усилия, действующего на подшипник. $M_{дисб}$ определяется на основе опытных данных по аналогии с подобными установками либо для фотоэлектрических гелиоустановок без концентрации излучения с экваториальной системой координат $M_{дисб}$ можно предварительно оценить по формуле

$$M_{дисб} = 0,01 \cdot l \cdot (F_{ветр} + m_{ф}g), \quad (3.2)$$

где $m_{ф}$ – суммарная масса фотоприемника, кг;
 l – длина фотоприемника по оси, перпендикулярной основной оси вращения и лежащей в плоскости фотоприемника, м;
 $F_{ветр}$ – сила давления ветра на фотоприемник, н;
 g – ускорение свободного падения $g = 9,8 \text{ м/с}^2$.

Максимальная требуемая скорость исполнительного вала $\omega_{и.вал}$, как правило соответствует скорости исполнительного вала в режиме «перехода» и определяется так

$$\omega_{и.вал} = \frac{\theta_m}{t_n}, \quad (3.3)$$

где t_n – требуемая длительность «перехода», с;
 θ_m – ширина зоны слежения, рад.

КПД кинематической цепи определяется как произведение КПД всех звеньев кинематической цепи

$$\eta_{кц} = \Pi \cdot \eta_i. \quad (3.4)$$

Как правило, кинематическая цепь системы наведения гелиоустановок строится на базе червячных передач с высокими передаточными отношениями, что и определяет низкий КПД $\eta_{кц}$.

3.2 Анализ внешних возмущающих воздействий на следящий электропривод

Расчет ветровой нагрузки на каждую конкретную установку представляет собой сложную задачу, так как требуется учитывать не только метеорологические особенности района, где эксплуатируется установка, но также особенности конкретной местности. А также влияние расположенных по соседству зданий и сооружений, искусственных и естественных препятствий, влияние элементов конструкции самой установки и т.п. на распределение ветрового потока.

Дополнительную нагрузку на СЭП системы наведения ветер создает двумя способами

- а) создавая вращающий момент плоскости фотоприемника;
- б) создавая дополнительное давление на фотоприемник, тем самым повышая силу трения в опорах.

В связи с этим ставится задача обобщения различных вариантов по ряду условий и последующего упрощенного расчета максимальной ветровой нагрузки для наиболее неблагоприятного варианта нагружения в рамках, ограниченных выбранными условиями. Такой подход позволяет существенно упростить расчет ветровых нагрузок и произвести его в общем виде, не вдаваясь в конкретные особенности расположения и конструкции каждой установки [79].

Действие ветра на здания и сооружения регламентируются соответствующим стандартом СНиП 2.01.07-85 «Нагрузки и воздействия» [80]. Ветровую нагрузку, действующую на фотоприемник, представляющего собой плоскую прямоугольную пластину, можно представить как совокупность следующих величин:

- давления W_c действующего на внешнюю (верхнюю) поверхность фотоприемника;
- сил трения W_f направленных по касательной к внешней поверхности фотоприемника;
- давления W_i действующего на внутреннюю (нижнюю) поверхность фотоприемника.

Нормативное значение средней составляющей ветрового давления определяется по формуле

$$W_{cp} = W_0 \cdot k \cdot C, \quad (3.5)$$

где W_0 – нормативное значение ветрового давления;

k – коэффициент, учитывающий изменение ветрового давления по высоте;

C – аэродинамический коэффициент.

Нормативное значение ветрового давления определяется на основе данных метеостанций о скоростях ветра. При этом давление W_0 в паскалях определяется по формуле

$$W_0 = 0,61 \cdot V_0^2. \quad (3.6)$$

где V_0 – скорость ветра на уровне 10 м над поверхностью земли для типа местности А.

Нормативное значение ветрового давления также можно определить по таблице 3.1 в соответствии с районированием территории страны по уровням ветрового давления. Коэффициент k определяется по таблице 3.2 в зависимости от высоты над поверхностью земли и типа местности. К типу А относят открытые местности (степи, моря, озера, пустыни, и т.п.); к типу Б – города с окраинами, лесные массивы и т.п. местности, равномерно покрытые препятствиями высотой 10 м; к типу В - городские районы с застройкой зданиями высотой более 25 м.

Т а б л и ц а 3.1- Районирование территории страны по уровням ветрового давления

Районы (по СНиП 2.01.07-85)	1а	1	2	3	4	5	6	7
Скоростной напор, кПа	0,1	0,23	0,30	0,38	0,48	0,6	0,73	0,85

Аэродинамический коэффициент определяется в зависимости от типа и формы конструкции.

Т а б л и ц а 3.2 – Определение коэффициент k , в зависимости от типа местности

Тип местности	Высота, м.											
	≤ 5	10	20	40	60	100	150	200	250	300	350	≥ 480
А	0,75	1	1,25	1,5	1,7	2	2,25	2,45	2,65	2,75	2,75	2,75
Б	0,5	0,65	0,85	1,1	1,3	1,6	1,9	2,1	2,3	2,5	2,75	2,75
В	0,4	0,4	0,55	0,8	1	1,25	1,55	1,8	2	2,2	2,35	2,75

3.3 Исследование возмущающих воздействий ветра, действующего на плоский фотоприемник солнечной фотоэлектрической станции

Воздействие ветровых сил на плоский прямоугольный фотоприемник показано на рисунке 3.1. Ось вращения расположена горизонтально. При другом расположении оси вращающий момент от ветровой нагрузки не превышает рассчитанного при горизонтальном расположении. Ветровая проницаемость плоскости между землей и осью вращения в зависимости от особенностей конструкции установки, может быть различной [81].

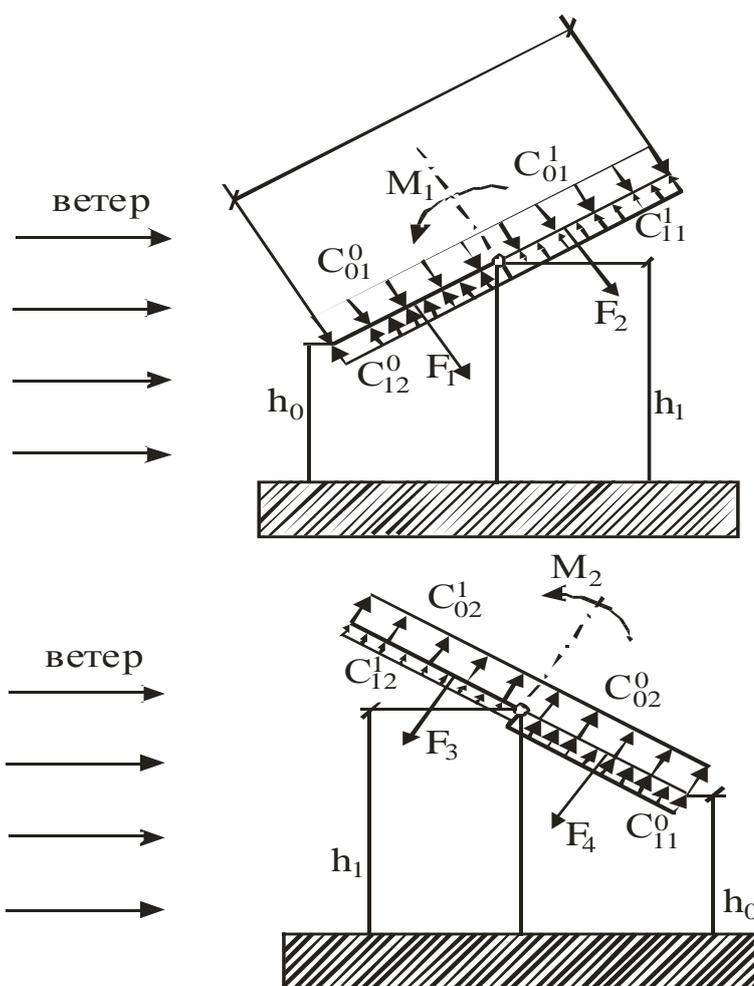


Рисунок 3.1 - Действие ветровых сил на плоский фотоприемник

Наибольший дисбаланс ветровых сил, действующих на фотоприемник, достигается, когда ветровая проницаемость плоскости между землей и осью вращения мала; при этом получается наибольший вращающий момент. Поэтому расчет ветровых сил будем вести для рассмотренного случая.

Моменты вращения вычисляются по формуле

$$\begin{aligned} M_1 &= (F_1 - F_2) \frac{l}{4}, \\ M_2 &= (F_3 - F_4) \frac{l}{4}. \end{aligned} \quad (3.7)$$

где l – длина фотоприемника, м;

F_1, F_2, F_3, F_4 – силы ветровой нагрузки, действующие на фотоприемник.

Каждая из сил $F_1 \dots F_4$, представляет собой алгебраическую сумму сил ветра, действующих на верхнюю и нижнюю поверхности фотоприемника

$$F = F_c - F_i, \quad (3.8)$$

где F_c – сила ветра, действующая на верхнюю поверхность;

F_i – сила ветра, действующая на нижнюю поверхность фотоприемника.

Тогда выражения для сил $F_1 \dots F_4$ можно записать в таком виде

$$\begin{aligned} F_1 &= W_0 k (C_{e1}^0 - C_{12}) \frac{S}{2}, \\ F_2 &= W_0 k (C_{e1}^1 - C_{11}^1) \frac{S}{2}, \\ F_3 &= W_0 k (C_{e2}^1 - C_{12}) \frac{S}{2}, \\ F_4 &= W_0 k (C_{r2}^0 - C_n^0) \frac{S}{2} \end{aligned} \quad (3.9)$$

где S – площадь плоскости фотоприемника.

C_n^0, C_{11}^1, C_{12} – аэродинамические коэффициенты для нижней поверхности фотоприемника;

$C_{e1}^0, C_{e2}^1, C_{r2}^0, C_{r2}^1$ – аэродинамические коэффициенты для нижней поверхности фотоприемника.

В соответствии со СНиП 2.01.07-85 принимается $C_{12} = 0,8$; а для C_{e1}^1, C_{r2}^1 высота h отождествляется с высотой h_1 .

Т а б л и ц а 3.3 – Аэродинамические коэффициенты С

Коэффициент	β , град	h/l_n			
		0	0,5	1,0	≥ 2
C_{e1}	0	0	-0,6	-0,7	-0,8
	20	0,2	-0,4	-0,7	-0,8
	40	0,4	0,3	-0,2	-0,4
	60	0,8	0,8	0,8	0,8
C_{e2}	≤ 60	-0,4	-0,4	-0,5	-0,8

Если при расчете получаются отрицательные значения сил или моментов, это свидетельствует о том, что найденные силы или моменты направлены противоположно выбранным направлениям на рисунке 3.1

Введем обозначения

$$\begin{aligned}
 C_{F1} &= C_{r1}^0 - C_{12} \\
 C_{F2} &= C_{r1}^1 - C_n^1 \\
 C_{F3} &= C_{e2}^1 - C_{12} \\
 C_{F4} &= C_{r2}^1 - C_{11}^0 \\
 C_{M1} &= C_{F1} - C_{F2} \\
 C_{M2} &= C_{F3} - C_{F4}
 \end{aligned}
 \tag{3.10}$$

Исследуем зависимость аэродинамических коэффициентов C_{M1} , и C_{M2} в зависимости от угла β при постоянных соотношениях h_1/l . Для этого необходимо учесть, что длина фотоприемника и ее проекция на горизонтальную плоскость связаны следующим соотношением

$$l_n = l \cdot \cos \beta, \tag{3.11}$$

соответственно

$$\frac{h_1}{l} = \frac{h_1}{l_n} \cos \beta. \tag{3.12}$$

Также учтем

$$\frac{h_0}{l} = \left(\frac{h_1}{l} - \frac{1}{2} \sin \beta \right) / \cos \beta. \tag{3.13}$$

На рисунке 3.2 и 3.3, полученные в результате интерполяции значений в таблице 3.3 с учетом выражений (3.10), (3.12), (3.13), графики функций $C_{F1} = f\left(\frac{h}{l_n}\right)$ и $C_{F2} = f\left(\frac{h}{l_n}\right)$, при постоянных углах β , на которые нанесены

изолинии постоянных отношений h/l соответствующих значениям 0,5; 0,75; 1,0; 1,25.

На рисунке 3.2 и 3.3 определим максимально возможный (по модулю) коэффициент C_{M2} при $h_0/l_n \leq 0,4$; $C_{F4} = -0,9$ с учетом выражений (3.10)

$$C_{M2} = -1,6 - (0,9) = -0,7$$

На рисунке 3.4 представлены зависимости коэффициента C_m , который представляет собой обобщение коэффициентов C_{M1} и C_{M2} . При этом углы β для коэффициентов C_{M1} считаются положительными, а для C_{M2} - отрицательными.

Полученные характеристики не распространяются в области, где β близок к $\pm 90^\circ$.

В области этих значений β возрастает роль не учитываемых факторов.

СНиП 2.01.07-85 рекомендует для отдельно стоящих плоских сплошных конструкций, вертикальных и отклоняющихся от вертикали не более чем на 15° для наветренной стороны, принимать $C = 0,8$, для подветренной $C = -0,6$.

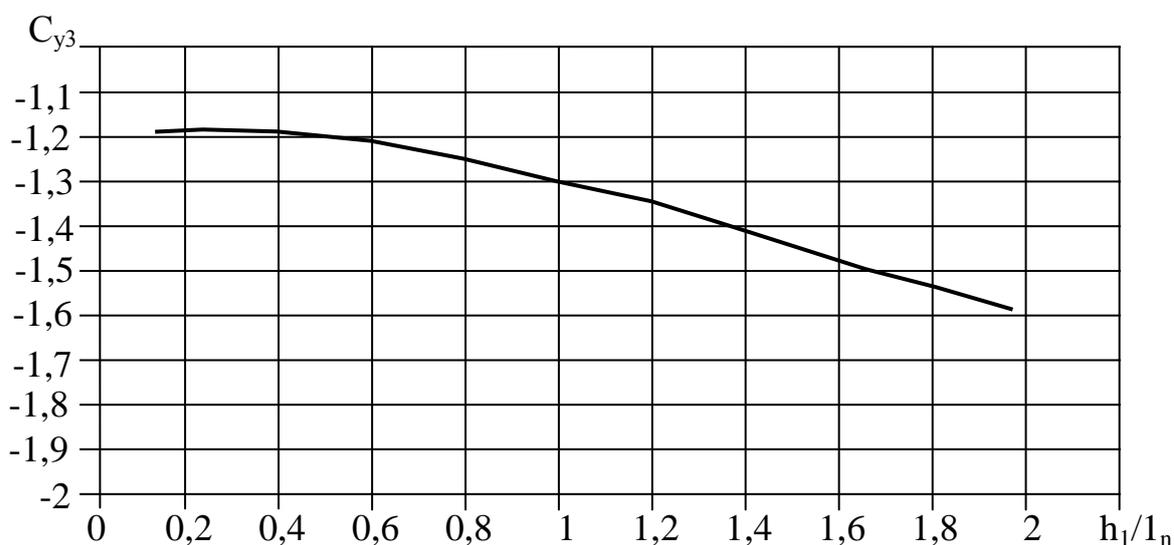


Рисунок 3.2 - Зависимость аэродинамического коэффициента C_{y3} от отношения h_1/l_n при разных углах β

Рассматривая наиболее неблагоприятный по вращающему моменту вариант нагрузки при β близких к $\pm 90^\circ$ можно принять $C_{F1} = 0$, $C_{F4} = 0$, $C_{F3} = -1,4$; $C_{F2} = -1,4$. Отсюда получаем максимально возможные (по модулю) коэффициенты близких к $\pm 90^\circ$

$$C_{M1} = -1,4,$$

$$C_{M2} = -1,4.$$

Окончательно для определения максимального вращающего момента, действующего на фотоприемник, в результате действия ветра принимаем

$$C_{M0}=1,4.$$

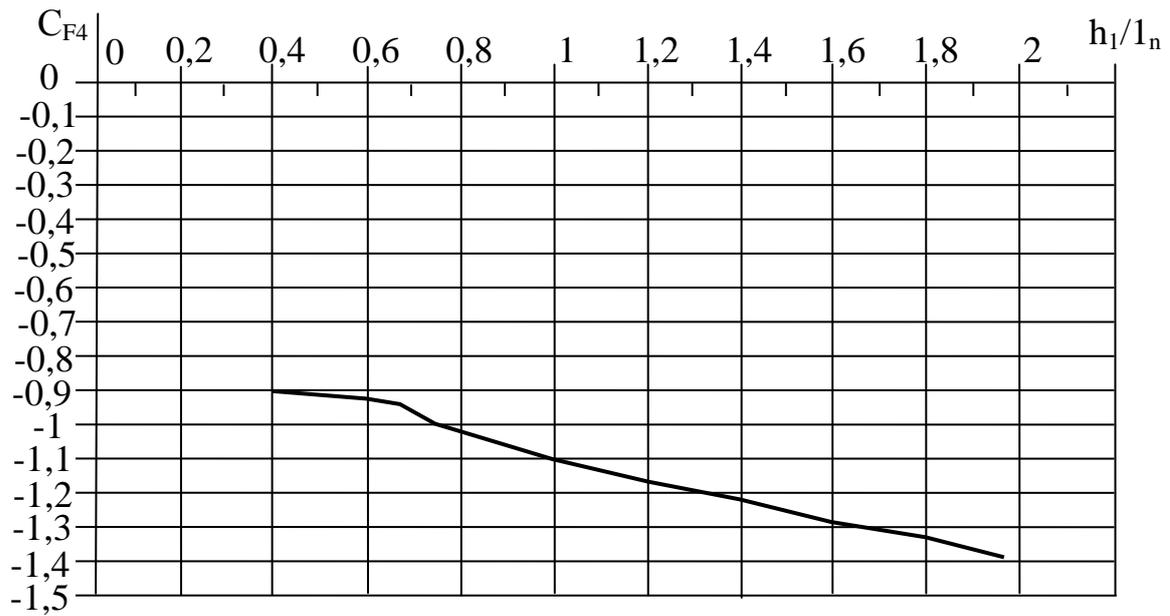


Рисунок 3.3 - Зависимость аэродинамического коэффициента C_{F4} от отношения h_0/l_n при разных углах β

Знак «-» опущен, т.к. при расчете требуемой мощности двигателя слежения не имеет физического смысла.

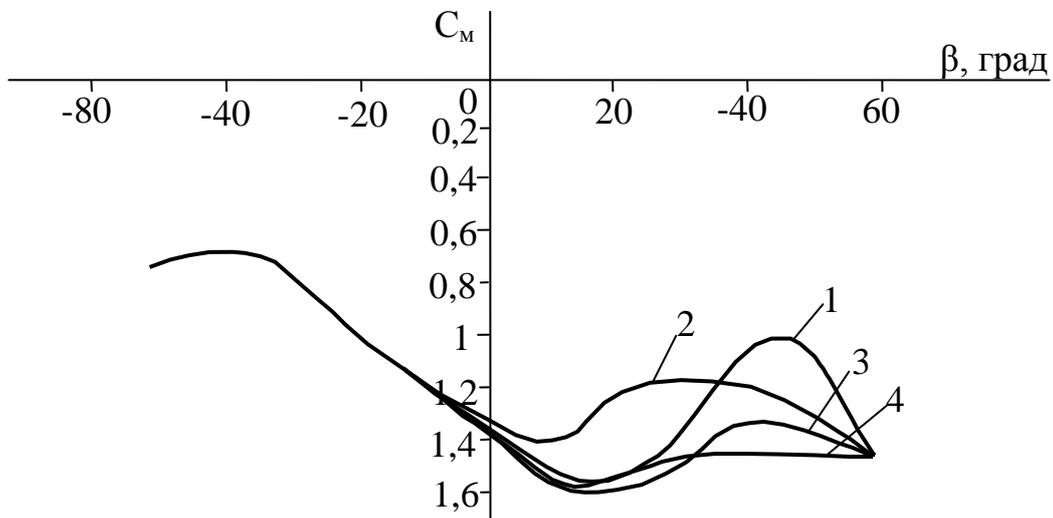


Рисунок 3.4 - Зависимость аэродинамического коэффициента C_M от угла β при разных отношениях h/l_0

На графике рисунка 3.4 максимальным по модулю значением также является $C_M=-1,4$.

$$1 - h/l_0 = 0,75$$

$$3 - h/l_0 = 1$$

$$2 - h/l_0 = 0,5$$

$$4 - h/l_0 = 1,25$$

Коэффициент запаса по силе ветра рекомендуется принимать $Y_F=1,4$. В соответствии с этим коэффициент запаса по вращающему моменту примем

$$Y_M=Y_F=1,4.$$

Таким образом, при расчете мощности двигателя слежения вращающий момент ветровой нагрузки, действующий на плоский прямоугольный фотоприемник, можно определить по формуле

$$M_{\text{вemp}} = \frac{1}{8} Y_M C_{M0} Sk W_0. \quad (3.14)$$

С учетом найденного значения C_{M0} и принятого значения Y_M , $M_{\text{ветр}}$ можно определять упрощенно

$$M_{\text{вemp}} = \frac{1}{4} Sk W_0. \quad (3.15)$$

3.4 Расчет момента трения в опорах солнечной фотоэлектрической станции

Момент трения в опорах зависит от результирующей силы, действующей радиально на ось вращения, которая в свою очередь зависит от массы фотоприемника и балансирующего груза. Силы ветра, а также от угла между вектором силы ветрового давления и силы тяжести γ . Принимая $\gamma=0$ (в этом случае достигается максимальная результирующая сила), момент трения в опорах запишется в следующем виде

$$M_{\text{тр}} = (F_{\text{напр}} + mg) \cdot f \frac{d}{2}, \quad (3.16)$$

где m – суммарная масса фотоприемника и балансирующего груза, кг;
 f – эквивалентный коэффициент трения в подшипниках;
 d – диаметр подшипников, м.

Определим максимальное значение средней составляющей силы давления ветра на плоский фотоприемник

$$F_{\text{напр}} = Y_n (C_e - C_i) Sk W_0, \quad (3.17)$$

где C_e – аэродинамический коэффициент для внешней (верхней) поверхности фотоприемника;

C_i – аэродинамический коэффициент для внутренней (нижней) поверхности фотоприемника.

Для расчета $F_{\text{ветр}}$ выберем максимальные по модулю аэродинамические коэффициенты, характерные для плоских сплошных конструкций

$$\begin{aligned} C_e &= 0,8, \\ C_i &= -0,6. \end{aligned}$$

С учетом принятых значений аэродинамических коэффициентов и рекомендуемого коэффициента запаса $F_{\text{ветр}}$ определим приближенно по формуле

$$F_{\text{ветр}} = 2SkW_0 . \quad (3.18)$$

Анализ показывает, что для практических расчетов в выражении (3.1) можно пренебречь моментом дисбаланса, так как расчетное значение ветрового момента, как правило, превышает не менее чем на порядок остальные составляющие момента сопротивления на выходном валу.

3.5 Исследование характера упругих колебаний в электроприводе солнечных фотоэлектрических станций

Основу кинематической цепи, как правило, составляет червячная передача, которая также выполняет функции вентиля, обеспечивая однонаправленный поток энергии от двигателя к исполнительному валу. Силы трения в кинематической цепи являются основной нагрузкой на двигатель.

Структурная схема электропривода для исследования колебаний представлена на рисунке 2.2. Обратная связь по положению в данном случае не учтена, так как предполагается, что величина шага значительно больше, чем амплитуда колебаний фотоприемника. Механическую часть привода с достаточной точностью можно считать двухмассовой [82] с частотой свободных колебаний

$$\Omega_{CB} = \sqrt{\frac{c'(J_1 + J'_2)}{J_1 - J'_2}} . \quad (3.19)$$

где J_1 – момент инерции масс, жестко связанных с валом двигателя, приведенный к валу двигателю;

J'_2 – момент инерции масс, жестко связанных с исполнительным валом, приведенный к валу двигателя.

Кинематическая цепь обладает высоким передаточным отношением – порядка $10^5 - 10^6$, $J_1 \gg J'_2$, вследствие чего выражение (3.19) можно упростить

$$\Omega_{CB} = \sqrt{\frac{c'}{J'_2}}. \quad (3.20)$$

Таким образом, частоты, фазы и амплитуды свободных колебаний двухмассовой системы слабо зависят от параметров двигателя. Величины частот свободных колебаний невелики и достигают 1-2 Гц.

Как показали исследования гелиоустановки, 80% мощности двигателя тратится на преодоления силы трения [83]. Вследствие высокой парусности фотоприемника определенную нагрузку на двигатель составляет ветровая нагрузка, которая к тому же является весьма трудно прогнозируемым возмущающим фактором.

С определенной долей приближения зависимость сил от момента на выходе кинематической цепи можно представить в таком виде

$$M_{тр} = M_0 + k_{тр}M_{вых},$$

где M_0 – момент трения холостого хода;
 $k_{тр}$ – коэффициент пропорциональности;
 $M_{вых}$ – нагрузка на выходе кинематической цепи.

При пуске двигателя колебания исполнительного вала и связанного с ним фотоприемника незначительны вследствие малости сообщаемой им энергии, и быстро гасятся, а колебания скорости вала двигателя вообще могут практически отсутствовать. Причиной последнего является также то, что для используемых электроприводов характерно соотношение $T_m \gg T_v$.

Иначе дело обстоит, когда колебания вызваны ударной ветровой нагрузкой, которая способна сообщить колебательным движениям фотоприемника достаточно большую энергию. В процессе совершения колебаний эта энергия не расходуется в кинематической цепи, - этому препятствует «механический вентиль» (самотормозящая кинематическая передача), - и в данном случае основной диссипативной силой выступает аэродинамическая сила, действующая на фотоприемник, которая при отсутствии ветровой нагрузки в каждый момент времени определится как

$$M_{mp}^A = k_A \cdot \omega_2^2 \cdot sign(\omega_2), \quad (3.21)$$

где ω_2 – мгновенное значение угловой скорости фотоприемника;
 k_A – коэффициент пропорциональности, характеризующий аэродинамические свойства фотоприемника.

Если пренебречь всеми остальными диссипативными силами, то на интервале времени, когда установка не совершает шага (времени ожидания), колебания можно описать интегрально-дифференциальным уравнением

$$c \int \omega_2 dt - k_A \omega_2^2 \text{sign}(\omega_2) - M_B^\phi = J_2 \frac{d\omega_2}{dt}, \quad (3.22)$$

где M_B^ϕ - момент нагрузки на фотоприемник, обусловленный действием ветра.

На рисунке 3.5 представлены формы кривой $\omega_2 = f(t)$, построенные по выражению (3.22) с помощью компьютера в программе «Matlab» при скачкообразном изменении момента ветровой нагрузки для разных установок, отличающихся значением коэффициента k_A ($k_{A3} > k_{A2} > k_{A1}$). На рисунке 3.8 представлены формы кривой $\omega_2 = f(t)$, при разных значениях ударной ветровой нагрузки M_B^ϕ ($M_{B1}^\phi > M_{B2}^\phi > M_{B3}^\phi$). По рисункам видно, что диссипативная аэродинамическая сила существенно влияет на колебания, пока их амплитуды не снизятся до некоторых, как правило, достаточно малых значений. И затем уступают свою ведущую роль силам трения в коренном зацеплении и опорах исполнительного вала.

Выражение (3.22) не учитывает всей сложности аэродинамического взаимодействия фотоприемника с ветровым потоком, и больший интерес представляет уточненное интегрально-дифференциальное уравнение колебаний

$$c \int \omega_2 dt - \frac{1}{2} k_A (\omega_B - \omega_2)^2 \text{sign}(\omega_2 - \omega_B) - \frac{1}{2} k_A (\omega_B + \omega_2)^2 \text{sign}(\omega_2 + \omega_B) - M_B^\phi = J_2 \frac{d\omega_2}{dt}, \quad (3.23)$$

где ω_B – эквивалентная угловая скорость ветра.

Величина ω_B находится в пропорциональной зависимости от скорости ветрового потока, причем коэффициент пропорциональности зависит от конкретного типоразмера фотоприемника. Отметим, что момент M_B^ϕ фактически пропорционален скорости ветрового потока во второй степени. При $\omega_B > \omega_2$ на всем интервале времени, выражение (3.23) перейдет в

$$c \int \omega_2 dt - 2k_A \omega_B \cdot \omega_2 - M_B^\phi = J_2 \frac{d\omega_2}{dt}. \quad (3.24)$$

Динамический момент будет равен

$$J \frac{d\omega_2}{dt} = c \int \omega dt - k_A \omega_2^2 \text{sign}(\omega_2) - M_H^\phi. \quad (3.25)$$

Производная по углу поворота равна

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega.$$

Его вторая производная имеет вид

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{c}{J} \int \frac{d\theta}{dt} dt - \frac{k_A}{J} \left(\frac{d\theta}{dt}\right)^2 \text{sign}\left(\frac{d\theta}{dt}\right) - \frac{M_H^\varphi}{J} \quad (3.26)$$

или

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{c}{J} \theta - \frac{k_A}{J} \left(\frac{d\theta}{dt}\right)^2 \text{sign}\left(\frac{d\theta}{dt} + \frac{M_H^\varphi}{J}\right).$$

Уравнение 3.26 запишем как систему уравнений

$$\begin{aligned} \frac{d\theta}{dt} &= y, \\ \frac{dy}{dt} &= \frac{c}{J} \theta - \frac{k_A}{J} y^2 \text{sign}(y) - \frac{M_H^\varphi}{J}. \end{aligned} \quad (3.27)$$

После замены переменных систему уравнений (3.27) можно записать в следующем виде

$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= x_2, \\ \frac{dx_2}{dt} &= -\left(\frac{a}{y}\right)x_1 - \frac{k_A}{y} x_2^2 \text{sign}(x_2) + \frac{M_H^\varphi}{y}. \end{aligned}$$

где $x_1 = \theta$, $x_2 = y$.

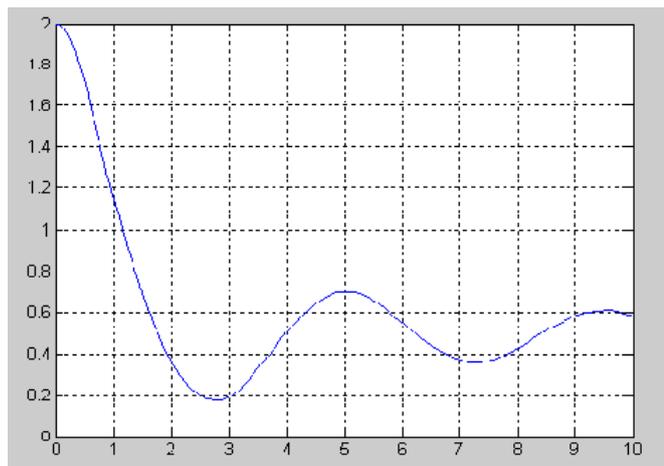


Рисунок 3.5 Колебания скорости исполнительного вала при разных коэффициентах k_A

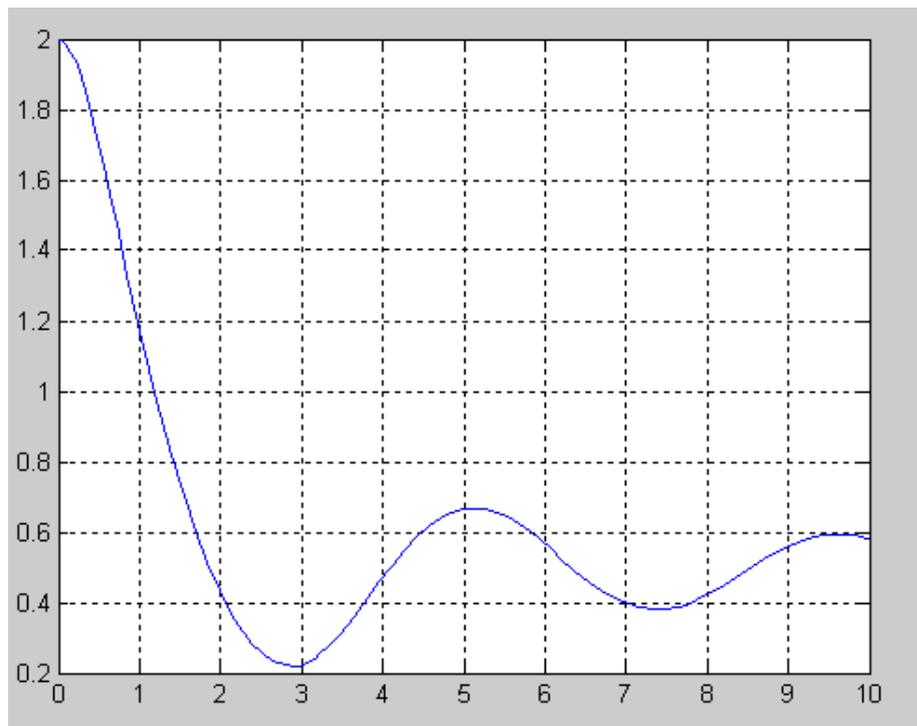


Рисунок 3.6 Колебания скорости исполнительного вала при разных коэффициентах k_A

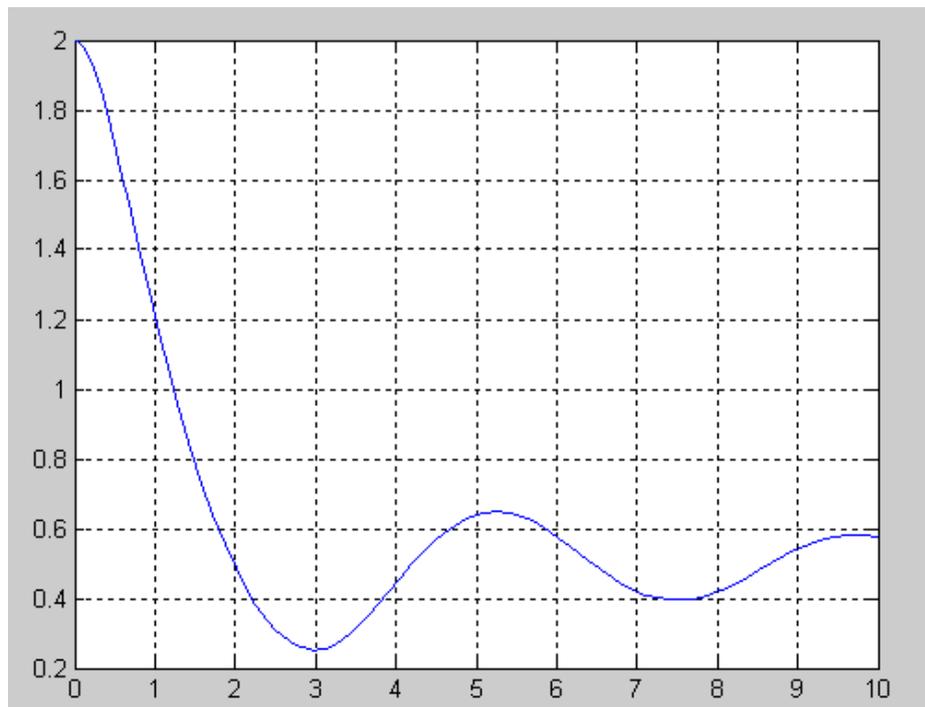


Рисунок 3.7 Колебания скорости исполнительного вала при разных коэффициентах k_A

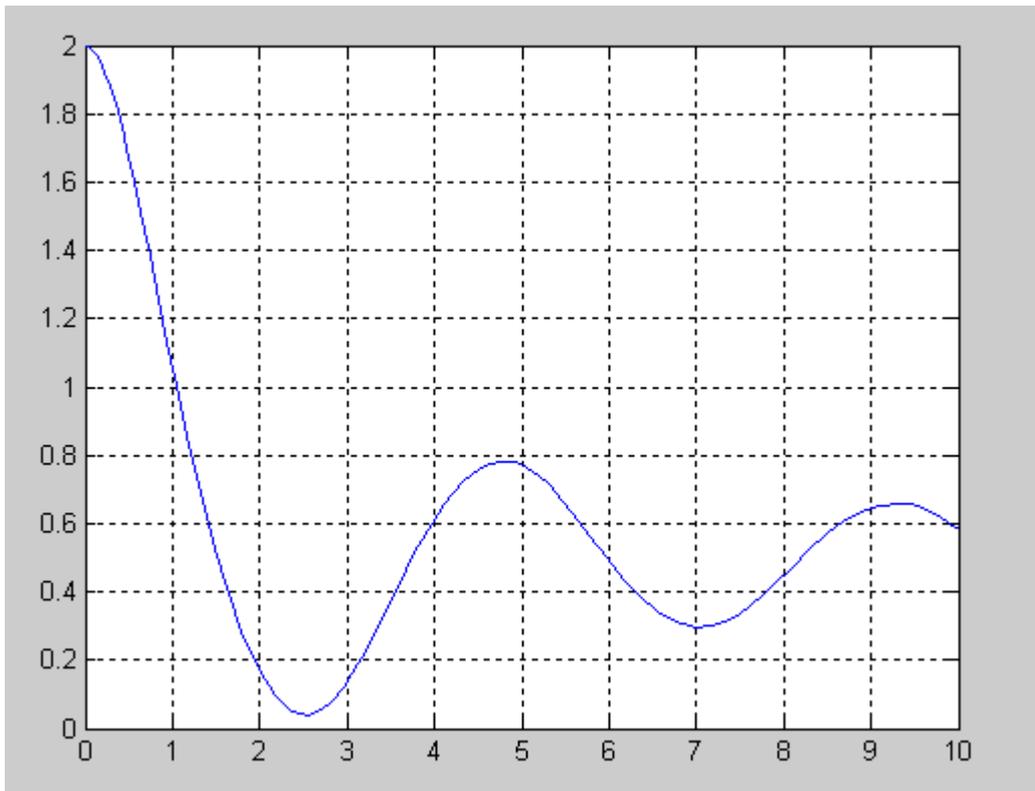


Рисунок 3.8 Колебания скорости исполнительного вала при различных возмущающих воздействиях M_{ij} нагрузки

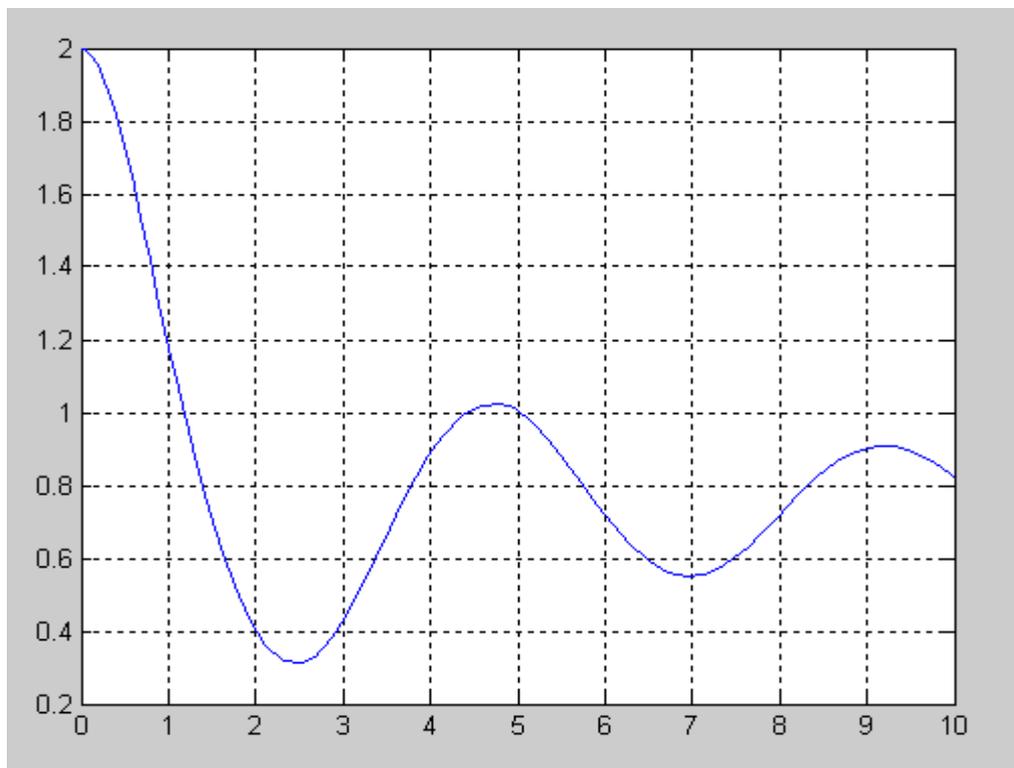


Рисунок 3.9 Колебания скорости исполнительного вала при различных возмущающих воздействиях M_{ij} нагрузки

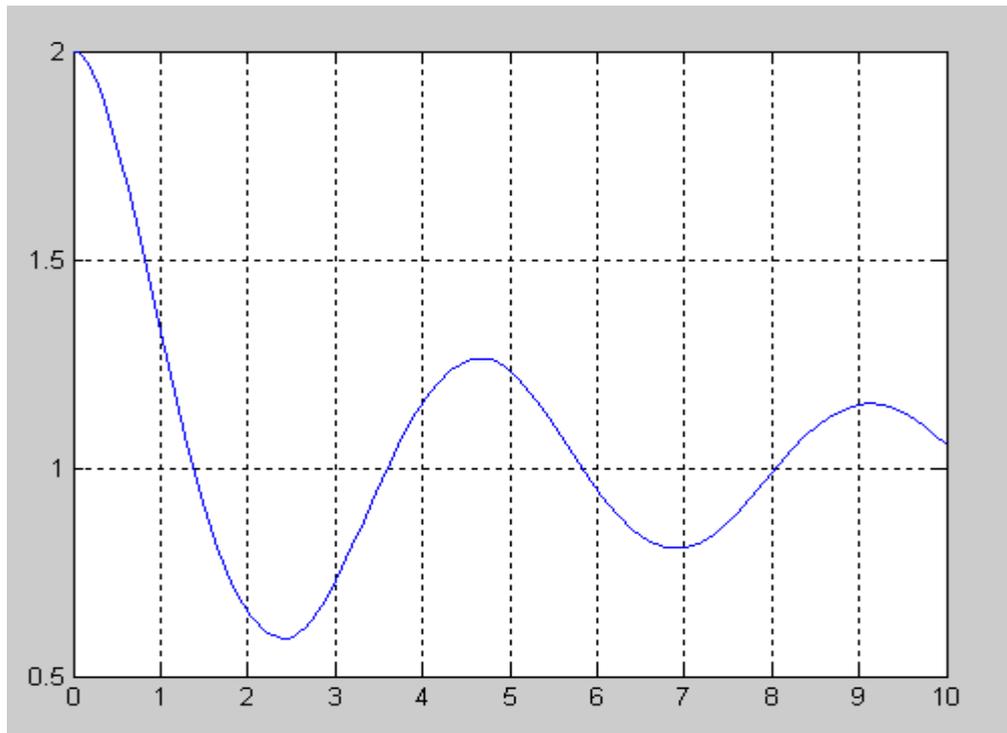


Рисунок 3.10 Колебания скорости исполнительного вала при различных возмущающих воздействиях M_{ij} нагрузки

На рисунках 3.5 - 3.10 показаны переходные процессы частоты вращения исполнительного вала при различных коэффициентах $k_{A1} = 1,25$; $k_{A2} = 0,85$; $k_{A3} = 0,55$. выбранные из таблицы 3.2. и при различных возмущающих воздействиях.

Как видно из указанных рисунков(3.5-3.10) амплитуда колебаний убывает по экспоненциальному закону.

3.6 Исследования перераспределения мощности в следящем электроприводе вследствие внешних возмущающих воздействий

Когда в фотоприемнике возникают колебания, вызванные ударной ветровой волной, и это происходит в течение совершения установкой перемещения (шага), то на двигатель оказывает действие момент сопротивления, который, при пренебрежении переходными процессами, вызванными инерционностью двигателя, будет описываться функцией

$$M[t] = \begin{cases} M_{12}[t] \cdot (\kappa_{TP} + 1) + M_0 & \text{при } M_{12}[t] \geq 0 \\ M_0 & \text{при } M_{12}[t] < 0 \\ M_{KT} & \text{при } M_{12}[t] \cdot (\kappa_{TP} + 1) + M_0 \geq M_{K3} \end{cases} \quad (3.28)$$

Для дальнейших рассуждений удобно ввести функцию

$$M_{\varepsilon}[t] = \frac{M_c[t] - M_B(k_{TP} + 1) - M_c}{k_{TP} + 1}, \quad (3.29)$$

где M_B – момент усредненной ветровой нагрузки, действующий на фотоприемник, приведенный к валу двигателя.

Рассмотрим случай, когда в любой момент времени выполняется условие

$$\begin{cases} M_{12}[t] \geq 0 \\ M_{12}(k_{TP} + 1) + M_0 < M_{\kappa} \end{cases}. \quad (3.30)$$

Очевидно, что момент $M_d[t]$ в этом случае определится достаточно просто

$$M_d[t] = M_{12} - M_B.$$

Функция $M_B[t]$, которая, по сути, представляет дополнительную нагрузку на двигатель, на любом интервале времени может быть разложена в ряд Фурье. Выберем интервал времени T_0 от момента возникновения колебаний до их полного гашения. На этом интервале разложение функции $M_d[t]$ представим в виде

$$M_d[t] = M_{d0} + \sum_{i=1}^m M_{dni} \sin(\Omega_i t + \varphi_i),$$

где M_{d0} – постоянная составляющая функции $M_d[t]$;
 Ω_i , M_{dni} , φ_i – частоты, амплитуды и фазы гармонических составляющих функции $M_d[t]$ на интервале T_0 .

Интервал T_0 в данном случае представляет собой время усреднения потерь мощности, и его целесообразно выбирать значительно меньше, чем постоянная нагрева двигателя, но не менее чем на порядок больше электромеханической постоянной.

Для упрощения математических выкладок будем в дальнейшем считать $M_{d0} = 0$. В этом случае выполняется условие

$$\frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} M_{d0}[t] dt = 0.$$

Отметим, что реально отсутствие постоянной составляющей M_{d0} маловероятно, однако анализ этой составляющей на перераспределение потока

мощности не представляет сложности, и в общем случае $M_{д0}$ можно рассматривать как «добавку» к моменту $M_{в}$.

Ток в якорной цепи можно представить в таком виде

$$I[t] = I_{п} + I_{д}[t] ,$$

где $I_{п}$ – ток обусловленный постоянными составляющими момента сопротивления;

$I_{д}[t]$ – ток, обусловленный переменным моментом сопротивления $M_{д}[t] \cdot (k_{TP} + 1)$.

В связи с тем, что периоды упругих механических колебаний существенно больше электромеханической и электромагнитной постоянной времени, инерцией двигателя целесообразно пренебречь. В этом случае можно записать уравнение

$$I_{\partial}[t] = \frac{1}{k_{M}\Phi} M_{\partial}[t] \cdot (k_{TP} + 1) . \quad (3.31)$$

Очевидно, что ток $I_{д}[t]$ также можно разложить в ряд Фурье на интервале T_0 , причем вследствие сделанных допущений можно считать, что для амплитуд первых, наиболее значимых гармоник тока выполняется равенство [84]

$$I_{рнм} = \frac{M_{рнм}}{k_{M}\Phi} (k_{TP} + 1) . \quad (3.32)$$

Мощность, потребляемая от сети, определится так

$$P_1 = \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} U_c \cdot I[t] dt = \frac{U_c}{T_0} \int_0^{T_0} I_n dt + \frac{U_c}{T_0} \int_0^{T_0} I_{\partial}[t] dt = \frac{U_c}{T_0} \int_0^{T_0} I_n dt = U_c \cdot I_n , \quad (3.33)$$

где U_c – напряжение сети.

Таким образом, момент $M_{д}[t] = 0$ не оказывает влияния на мощность, потребляемую двигателем от сети. Но при этом возникают дополнительные потери мощности в якорной цепи, которые определяются так

$$\Delta P_{яц}^{фоз} = \frac{R_{яц}}{T_0} \int_0^{T_0} I_{я}^2[t] dt = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m I_{\partial}^2 R_{яц} = \frac{1}{(k_{M}\Phi)^2} (k_{TP} + 1)^2 R_{яц} \sum_0^{T_0} \frac{M_{\partial вц}}{2} . \quad (3.34)$$

Определим мощность на валу двигателя P_2 считая, что для момента вращения двигателя $M_{дв}$, вследствие сделанных допущений, в каждый момент времени выполняется равенство $M_{дв}[t] = M_c[t]$.

$$P_2 = \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} M_{\partial\partial}[t] \cdot \omega_t[t] dt = \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} M_c[t] \frac{M_{\kappa\kappa} - M_c[t]}{|\beta|} dt = \frac{1}{T_0 \cdot |\beta|} \int_0^{T_0} (M_c[t] \cdot M_{\kappa\kappa} - M_c^2[t]) dt,$$

где β – жесткость механической характеристики двигателя;
 ω_t – угловая скорость вала двигателя.

На выходе двигателя мощность снижается на величину

$$\Delta P_2 = \frac{(k_{TP} + 1)^2}{|\beta| \cdot T_0} \int_0^{T_0} M_{\partial\partial}^2[t] dt = \frac{(k_{TP} + 1)^2}{|\beta|} \sum_{i=1}^m \frac{M_{\partial\partial}^2}{2}. \quad (3.35)$$

Если учесть, что влияние $M_d[t]$ на потери в стали и механические потери в двигателе не существенны, то очевидно приближенное равенство

$$\Delta P_{яц}^{\partial\partial} [t] = -M_{TP} [t] \cdot \omega_t [t],$$

где M_{TP} – момент трения в механической части привода, приведенной к валу двигателя.

Знак «-» в данном случае указывает на то, что мощность двигателя расходуется в кинематической цепи в процессе совершения работы. Пренебрегая инерцией двигателя, можно записать

$$\Delta P_{мех} [t] = -M_{TP} [t] \frac{M_{\kappa\kappa} - M_c [t]}{|\beta|},$$

$$M_{TP} [t] = M_0 + M_d [t] \cdot k_{TP} + M_B k_{TP}.$$

Средние потери в механической части привода на интервале T_0

$$\Delta P_{мех}^{cp} = \frac{-1}{|\beta| \cdot T_0} \int_0^{T_0} \Delta P_{мех} [t] dt = \frac{-1}{|\beta| \cdot T_0} \int_0^{T_0} (M_{\kappa\kappa} M_0 + M_{\kappa\kappa} M_d [t] \cdot k_{TP} + M_{\kappa\kappa} M_B k_{TP} - 2M_d [t] \cdot k_{TP} \times$$

$$\times (k_{TP} + 1) - M_B M_0 (2k_{TP} + 1) - M_d [t] \cdot M_0 (2k_{TP} + 1) - M_B^2 \cdot k_{TP} (k_{TP} + 1) - M_0^2) dt.$$

Анализ выражения показывает, что при принятом допущении $M_{д0} = 0$ колебания приводят к некоторой экономии потерь мощности в механической части привода. Эта экономия определится так

$$\Delta P_{мех}^{\partial\partial} = \frac{k_{TP} (k_{TP} + 1)}{|\beta| \cdot T_0} \int_0^{T_0} M_d^2 [t] dt,$$

или

$$\Delta P_{\text{мех}}^{\text{доп}} = \frac{k_{\text{ТР}}(k_{\text{ТР}} + 1)}{|\beta|} \sum_{i=1}^m \frac{M_{\text{дейст}}^2}{2}. \quad (3.36)$$

Факт экономии мощности в механической части привода вследствие колебаний фотоприемника имеет достаточно простое физическое объяснение. На интервале времени, когда скорость колебаний фотоприемника по знаку совпадает со скоростью полезного перемещения – шага, момент $M_{\text{д}}$ частично компенсирует противодействие ветра, скорость двигателя увеличивается, а момент трения снижается. На этом интервале времени величина полезного перемещения составит $\Delta\alpha_1 > \Delta\alpha_2$. Таким образом, при пониженном трении совершается большее перемещение, и в целом работа сил трения при совершении полезного перемещения на величину $\Delta\alpha_1 + \Delta\alpha_2$ оказывается меньше, чем в режиме отсутствия колебаний.

На рисунке 3.11 сплошной линией показано распределение потоков мощностей в приводе при отсутствии механических колебаний – сплошной линией, а изменения, вносимые колебаниями – пунктирной линией.

Коротко остановимся на случаях, когда в процессе колебаний возникают интервалы времени, на которых выполняются условия

$$M_{12}[t] < 0, \quad (3.37)$$

или

$$M_{12}(k_{\text{ТР}} + 1) + M_0 \geq M_{\text{кз}}. \quad (3.38)$$

Колебания скорости двигателя в случае выполнения условия (3.37) представлены на рисунке 3.11, а условия (3.38) – на рисунке 3.12.

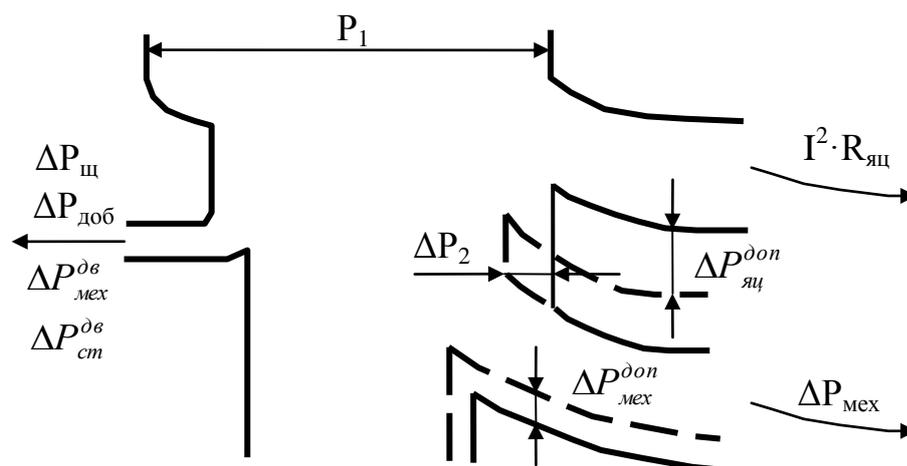


Рисунок 3.11 – Распределение потоков мощностей в электроприводе

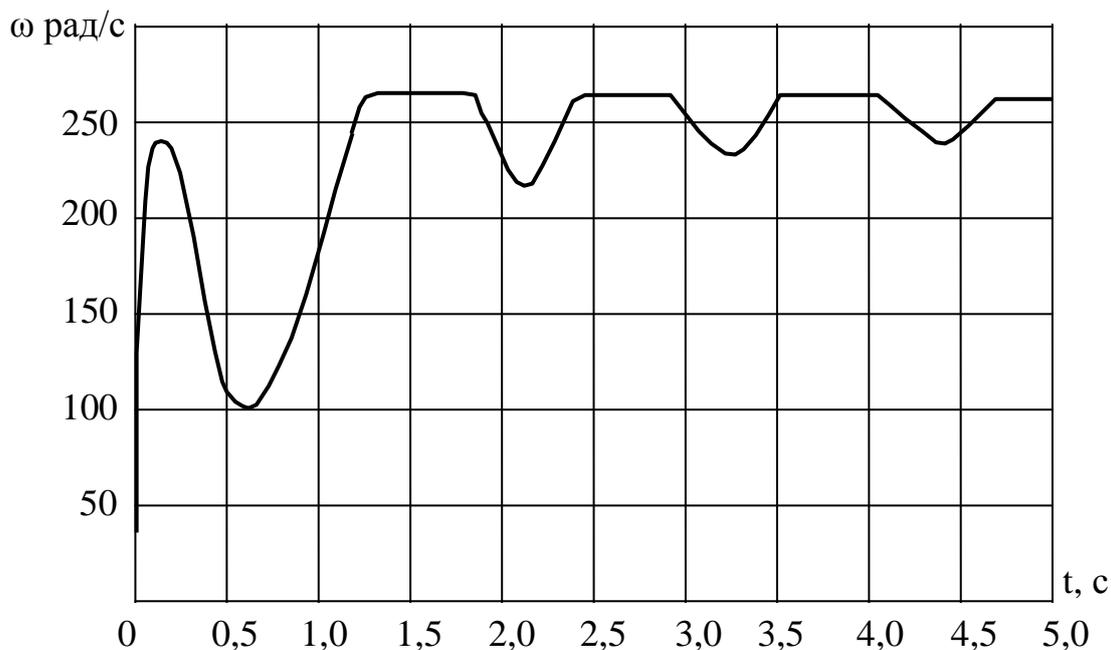


Рисунок 3.12 – Колебания скорости вала двигателя при возникновении интервалов времени с отрицательным моментом упругой связи M_{12}

Гармонические составляющие $M_d[t]$ приводят к перераспределению потока мощности в электроприводе, при этом появляется дополнительная постоянная составляющая $M_{d0} \neq 0$, которая вносит определенные коррективы. Постоянная составляющая M_{d0} для условия (3.38) имеет положительный знак, а для условия (3.37) – отрицательный.

И это приводит к главным отличиям в перераспределении потока мощности:

- в первом случае двигатель вследствие упругих механических колебаний потребляет от сети дополнительную мощность, соответствующую

$$\Delta P_1 = U_c \frac{M_{d0}}{k_m \Phi} ; \quad (3.39)$$

- во втором случае наблюдается обратное – потребление двигателем мощности от сети снижается (по сравнению с мощностью, потребляемой в отсутствие колебаний, но при такой же ветровой нагрузке) на величину ΔP_1 , определяемую выражением (3.39).

Нужно отметить, что момент короткого замыкания существенно превышает номинальный момент двигателя, и, если вследствие механических колебаний и высокой ветровой нагрузки двигатель входит в режим короткого замыкания, то, очевидно, это может привести к отказу работоспособности системы.

Кроме того, в результате появления постоянной составляющей $M_{до}$, несколько изменяются значения потерь мощности в двигателе и механической части привода.

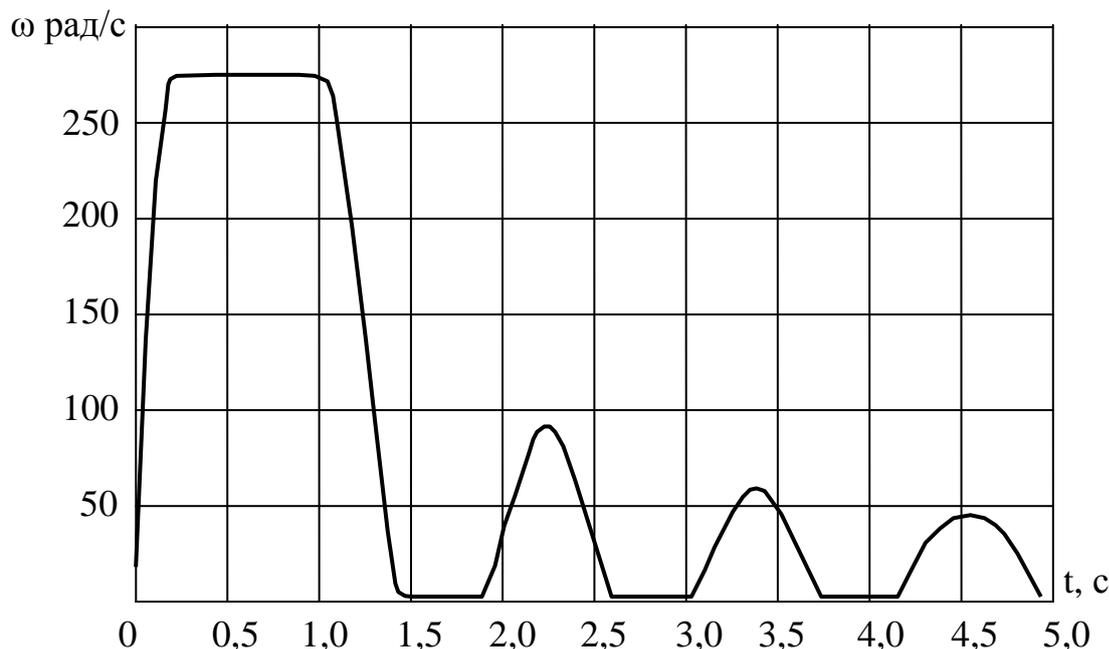


Рисунок 3.13 - Колебания скорости вала двигателя при возникновении интервалов времени, когда сумма момента упругой связи M_{12} и сил трения в кинематической цепи больше момента короткого замыкания двигателя

Момент ветровой нагрузки M_v принят не изменяющимся с течением времени. Но фактически ветровой поток очень динамичная система. Ветер совершает флюктуации с разными частотами и амплитудами. В этом случае M_v можно считать средним значением ветровой нагрузки, а переменную составляющую интерпретировать как «добавку» к моменту $M_d[t]$.

Форма кривой $M_d[t]$ в процессе рассуждений не оговаривалась, поэтому колебания ветрового момента качественно не вносят ошибки в полученные результаты. Но, строго говоря, такие механические колебания, возникающие в системе называть только упругими нельзя.

Одним из принятых допущений являлось пренебрежение инерционностью двигателя. В общем случае учет инерции двигателя требует более сложных математических выкладок, однако математический анализ показывает, что сделанное допущение не приводит к качественной ошибке в полученных результатах, а при значениях T_m характерных для привода гелиоустановок, — не приводит и к сколько-нибудь значительной количественной ошибке.

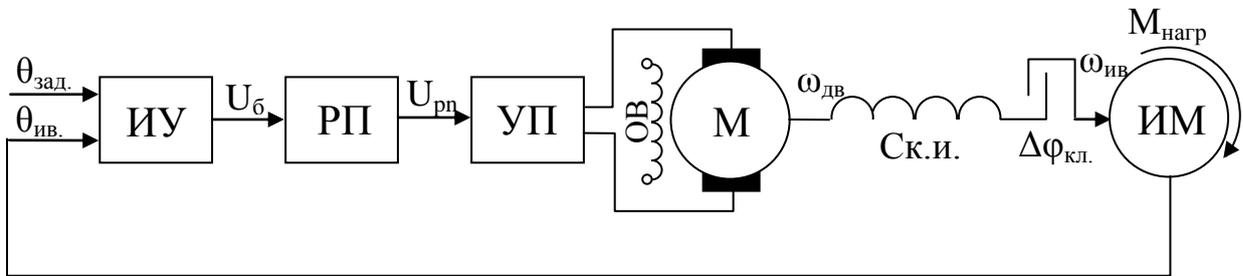
В целом, механические колебания приводят к значительной дополнительной потере мощности в двигателе, которая при неблагоприятном стечении обстоятельств может достигать порядка 20% - 30% номинальных потерь в двигателе.

При расчетах мощности двигателя по приведенным в настоящей главе формулам целесообразно учитывать это коэффициентом запаса $K_3 = 1,05 \dots 1,3$.

3.7 Математические модели следящего электропривода солнечной фотоэлектрической станции

3.7.1 Математическая модель одноконтурного следящего электропривода солнечной фотоэлектрической станции

Основные возмущающие воздействия на привод гелиоустановки были рассмотрены в работах ученых Овсянникова Е.М, и Сорокина Г.А.[12,20]. Но они в своих трудах не рассматривали вопрос точности, быстродействия отработки выходной координаты электропривода, а также влияние изменения параметров на переходные процессы этого электропривода(рис. 3.14).



ИУ – измерительное устройство; РП – регулятор положения; УП – управляемый преобразователь напряжения; М- двигатель постоянного тока с независимой обмоткой возбуждения; ИМ – исполнительный механизм.

Рисунок 3.14 – Функциональная электромеханическая схема одноконтурной СЭП СФЭС

Функциональную схему (рисунок 3.14), представим линеаризованной структурной схемой (рисунок 3.15), так как кинематическая цепь СЭП СФЭС является нелинейным звеном с зоной нечувствительности (рисунок 2.2).

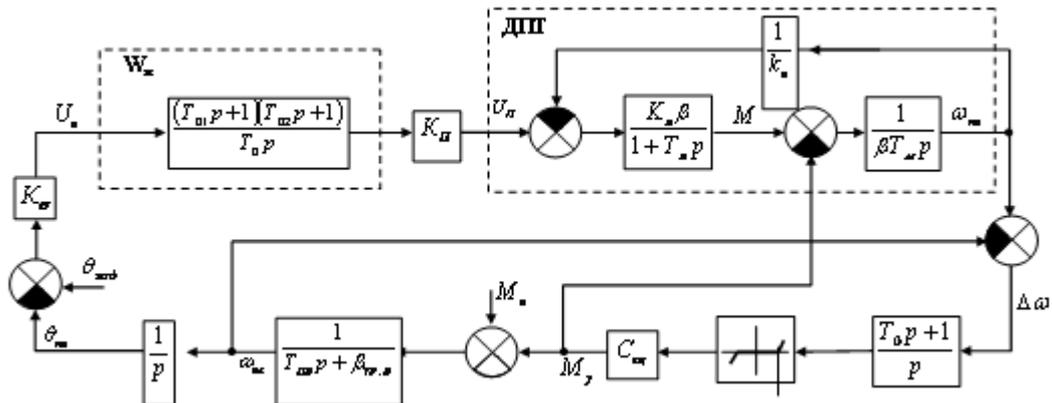


Рисунок 3.15 – Структурная схема СЭП СФЭС

На основе передаточных функций структурной схемы (рисунок 3.15) можно записать в приращениях следующие дифференциальные уравнения.

Технические и расчетные параметры использовались для двигателя постоянного тока МЭ215.

Для двигателя постоянного тока с независимым возбуждением (согласно передаточным функциям) представим двумя дифференциальными уравнениями с общеизвестными принятыми допущениями [74]

$$J \frac{d\Delta\omega_{дв}}{dt} = k_M \Delta I - \Delta M_y, \quad (3.40)$$

где $\Delta\omega_{дв}$ – скорость вращения якоря;
 ΔI – ток якоря;
 ΔM_y – приращение момента нагрузки;
 J – момент инерции;
 k_M – коэффициент пропорциональности между моментом двигателя и током якоря, и уравнением э. д. с в цепи якоря.

$$T_{я} \frac{d\Delta I}{dt} = k_{я} (\Delta U_{II} - c\Delta\omega) - I, \quad (3.41)$$

где ΔU – приращение напряжения на выходе преобразователя;
 $T_{я}$ – электромагнитная постоянная якоря ;
 $k_{я}$ – коэффициент ($k_{я} = 1/r_{я}$); $r_{я}$ – сопротивление якорной цепи двигателя;
 c – коэффициент пропорциональности между э. д. с. и ω .
 Дифференциальное уравнение преобразователя напряжения будет иметь вид

$$T_0 \frac{d\Delta U_{II}}{dt} = K_{II} K_6 \Delta\Theta_{зад} - K_{II} K_6 T_{01} \Delta\omega_M - K_{II} K_6 \Delta\Theta_{ив}, \quad (3.42)$$

где K_{II} – коэффициент передачи преобразователя;
 K_6 – коэффициент усиления;
 T_{01} – постоянная времени корректирующего звена;
 $\Theta_{зад}$ – заданный угол поворота СЭП гелиоустановки;
 $\Theta_{ив}$ – угол исполнительного вала.

В свою очередь производную угла ($\Theta_{ив}$) исполнительного вала можно представить уравнением

$$\frac{d\Delta\Theta_{IB}}{dt} = \Delta\omega_{IB} , \quad (3.43)$$

где $\Delta\omega_{IB}$ – приращение угловой скорости исполнительного вала.
Дифференциальное уравнение для ω_{IB} запишется в таком виде

$$T_{IB} \frac{d\Delta\omega_{IB}}{dt} + \beta_{TP.B} \Delta\omega_{IB} = \Delta M_Y + \Delta M_B , \quad (3.44)$$

где ΔM_Y - приращение момента угла поворота;
 ΔM_B – приращение момента поворота вала;
 $\beta_{TP.B}$ – коэффициент трения вала;
 T_{IB} – постоянная времени.

Дифференциальное уравнение момента ΔM_Y с учетом гармонической линеаризации для исполнительного звена с зоной нечувствительности [68,75] и с учетом коэффициента $C_{K.Ц}$ будет иметь вид

$$\frac{d\Delta M_Y}{dt} = C_{K.Ц} \cdot q(a) \left(T_0 \frac{d\Delta\omega_{DB}}{dt} + \Delta\omega_{DB} \right) - \left(T_0 \frac{d\Delta\omega_M}{dt} + \Delta\omega_{DB} \right) , \quad (3.45)$$

где $C_{K.Ц}$ – коэффициент упругости.

$$q(a) = k - \frac{2k}{\pi} \left(\arcsin\left(\frac{b}{a}\right) + \frac{b}{a} \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}} \right) .$$

Таким образом, система линеаризованных дифференциальных уравнений, описывающая динамику процессов СЭП гелиоустановки, будет иметь вид[85]

$$\begin{aligned} \frac{d\Delta\omega_{DB}}{dt} &= \frac{1}{J} \Delta M - \frac{1}{J} \Delta M_Y , \\ \frac{d\Delta I_{Я}}{dt} &= \frac{k_{Я}}{T_{Я}} \Delta U_{\Pi} - \frac{k_{Я} k_{\epsilon}}{T_{Я}} \Delta\omega - \frac{1}{T_{Я}} \Delta I_{Я} , \\ \frac{d\Delta U_{\Pi}}{dt} &= \frac{K_{\Pi} K_{\delta}}{T_0} \Delta\Theta_{зад} - \frac{T_{01} K_{\Pi} K_{\delta}}{T_0} \Delta\omega_{иг} - \frac{K_{\Pi} K_{\delta}}{T_0} \Delta\Theta_{IB} , \\ \frac{d\Theta_{IB}}{dt} &= \Delta\omega_{IB} , \\ \frac{d\Delta\omega_{IB}}{dt} &= \frac{1}{T_{IB}} (\Delta M_Y + \Delta M_B) - \frac{\beta_{TP.B}}{T_{IB}} \Delta\omega_{IB} , \end{aligned} \quad (3.46)$$

$$\frac{d\Delta M_y}{dt} = C_{к.ц} \cdot q(a) \left((T_0 \frac{d\Delta\omega_{DB}}{dt} + \Delta\omega_{DB}) - ((T_0 \frac{d\Delta\omega_M}{dt} + \Delta\omega_{DB})) \right).$$

На основе системы уравнений (3.46) и построена модель. Структурная схема модели в том виде, в котором она представляется в программе MATLAB, изображена на рисунке 3.16. [102]

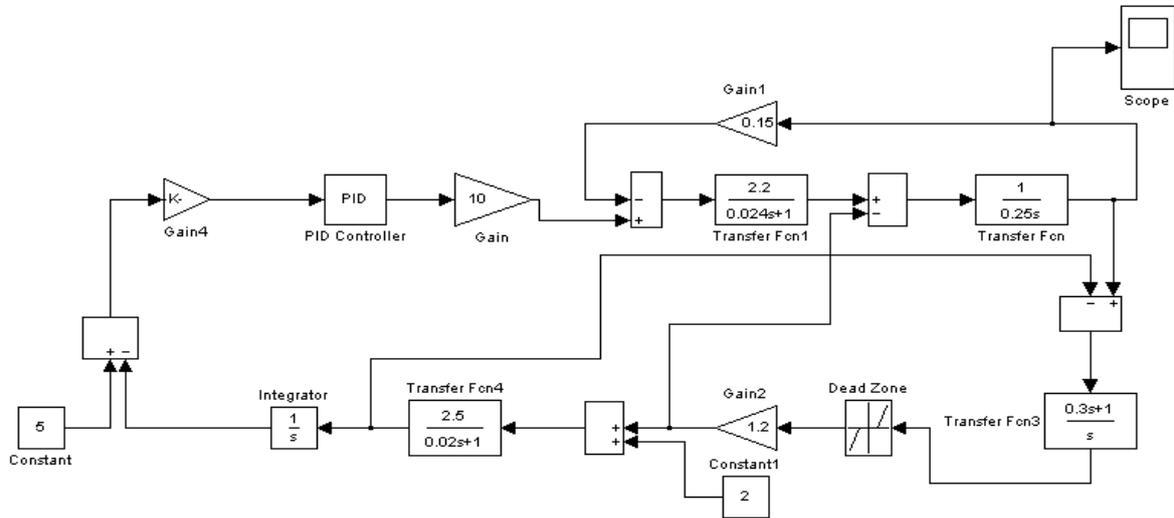


Рисунок 3.16 – Структурная схема модели СЭП СФЭС в MATLAB

Осциллограмма $\Theta(t)$ полученная в результате моделирования представлена на рисунке 3.17.

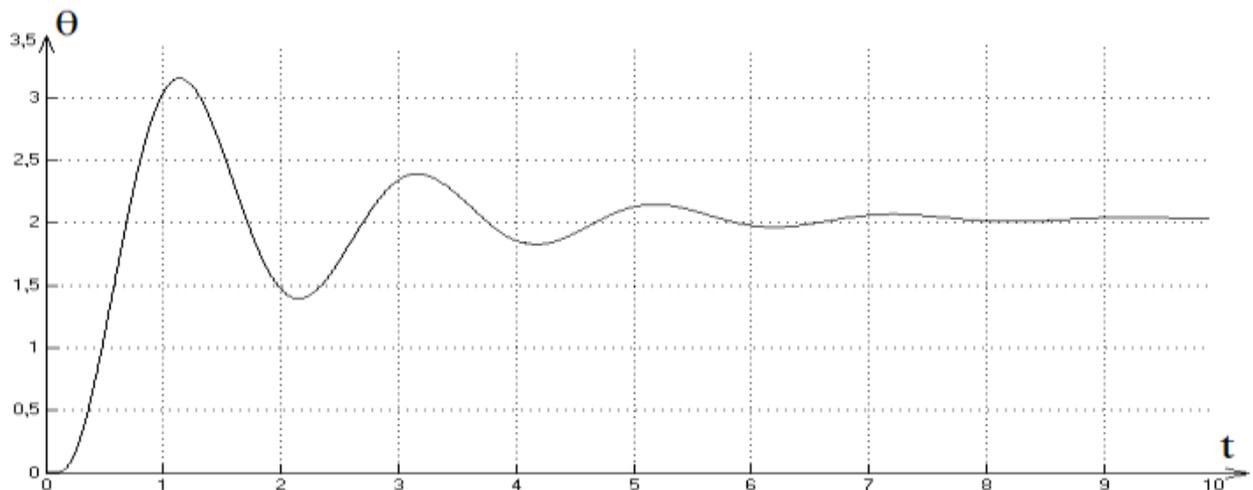


Рисунок 3.17 – Переходной процесс угла поворота задающей и отрабатывающей оси исполнительного вала

Как видно из рисунка 3.17 величина перерегулирования составляет 60%, время регулирования составляет 6с, и число колебаний равно 3, что не удовлетворяет нашим требованиям точности и быстродействия.

3.7.2 Математическая модель двухконтурного следящего электропривода солнечной фотоэлектрической станции

Для достижения более высоких показателей качества переходных процессов СЭП можно ввести обратную связь по скорости. Опирируя коэффициентом обратной связи по скорости, коэффициентом передачи регулятора скорости, постоянными времени регулятора скорости, можно увеличить жесткость механической характеристики привода, уменьшить суммарную электромеханическую постоянную времени системы, скомпенсировать инерционность управляемого преобразователя напряжения и т.д [75].

Согласно представленной схеме (рисунок 3.16) математическую модель двухконтурного СЭП СФЭС рассмотрим на основе математической модели одноконтурной схемы (рисунок 3.15)[87]. Дифференциальные уравнения двигателя постоянного тока с независимым возбуждением остаются такими же, как уравнения (3.40) и (3.41).

Уравнения управляемого преобразователя напряжения и регулятора скорости, считая при этом, что управляемый преобразователь напряжения безынерционен и регулятор скорости представляет собой пропорциональное звено, будут иметь вид

$$\Delta U_{УП} = k_{П} \Delta U_{РС}, \quad (3.52)$$

$$\Delta U_{РС} = \Delta U_{РП} - k_{ОС} \Delta \omega_{ДВ}. \quad (3.53)$$

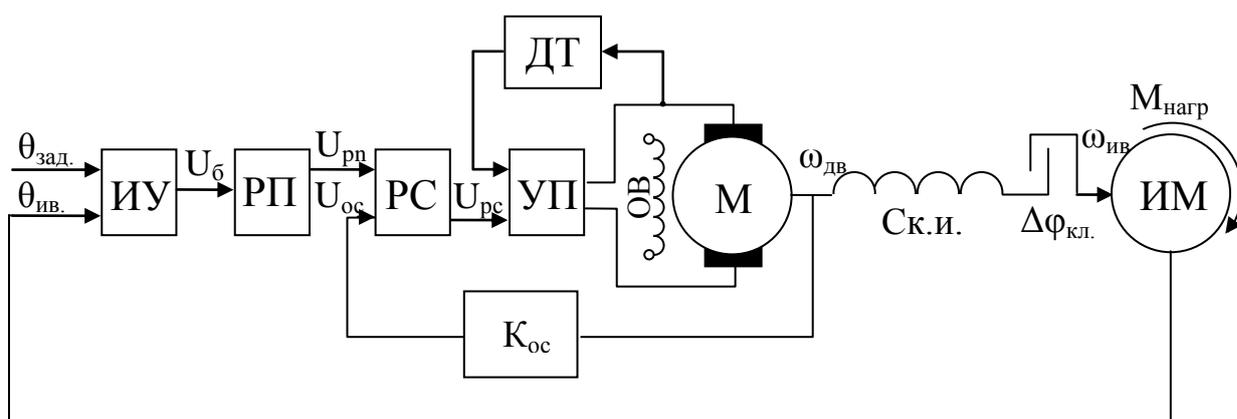


Рисунок 3.18 -Электромеханическая схема двухконтурного СЭП СФЭС

где $k_{П}$ - коэффициент передачи управляемого преобразователя,
 $k_{ОС}$ - коэффициент обратной связи,
 $\Delta U_{РС}$ - приращение напряжения регулятора скорости,
 $\Delta U_{РП}$ - приращение напряжения регулятора положения,

РС – регулятор скорости.

Дифференциальное уравнение, описывающее динамику звена РП, можно представить в следующем виде

$$T_0 \frac{d\Delta U_{PII}}{dt} = (T_{K1} + 1)U_B = k_B(T_{K1} + 1)(\Theta_{3AD} - \Theta_{IB}) \quad (3.54)$$

или так

$$\frac{d\Theta_{IB}}{dt} = \Delta\omega_{IB}.$$

Уравнение (3.54) можно записать в следующем виде

$$T_0 \frac{d\Delta U_{PII}}{dt} = -k_B T_{K1} \Delta\omega_{IB} + k_B \Theta_{3AD} - k_B \Theta_{IB} \quad (3.55)$$

В этом случае математическая модель двухконтурного СЭП СФЭС будет иметь вид[88]

$$\frac{d\Delta\omega_{DB}}{dt} = \frac{1}{J} \Delta M - \frac{1}{J} \Delta M_V,$$

$$\frac{d\Delta I_{Я}}{dt} = \frac{k_{Я}}{T_{Я}} \Delta U_{II} - \frac{k_{Я} k_e}{T_{Я}} \Delta\omega - \frac{1}{T_{Я}} \Delta I_{Я},$$

$$\Delta U_{VII} = k_{II} (\Delta U_{PII} - k_{OC} \Delta\omega_{DB}),$$

$$T_0 \frac{d\Delta U_{PII}}{dt} = k_B \Theta_{3AD} - k_B T_{K1} \Delta\omega_{IB} - k_B \Theta_{IB}, \quad (3.56)$$

$$\frac{d\Theta_{IB}}{dt} = \Delta\omega_{IB},$$

$$\frac{d\Delta\omega_{IB}}{dt} = \frac{1}{T_{IB}} (\Delta M_V + \Delta M_B) - \frac{\beta_{TP.B}}{T_{IB}} \Delta\omega_{IB},$$

$$\frac{d\Delta M_V}{dt} = C_{K.II} \cdot q(a) \left((T_0 \frac{d\Delta\omega_{DB}}{dt} + \Delta\omega_{DB}) - (T_0 \frac{d\Delta\omega_M}{dt} + \Delta\omega_{DB}) \right).$$

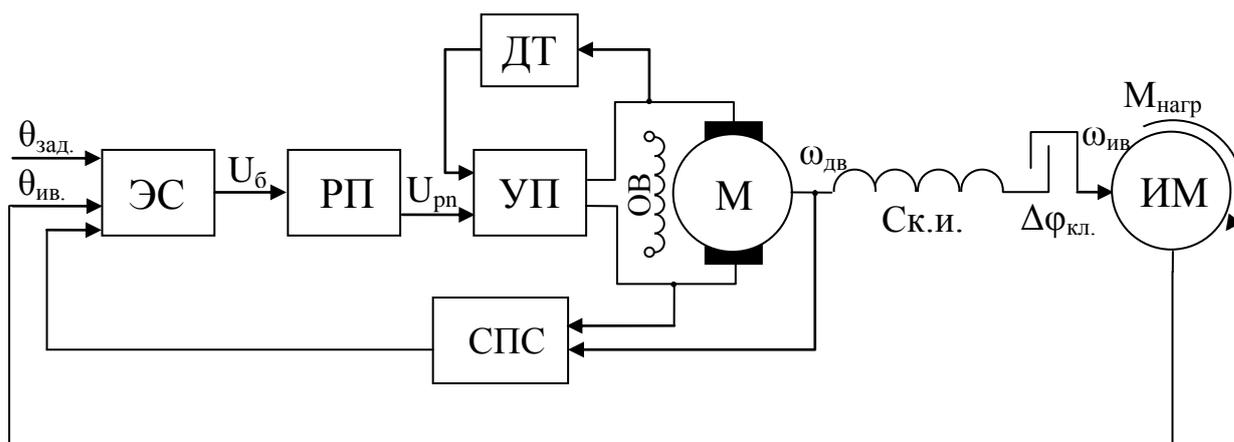
На основе системы уравнений (3.56) построена модель двухконтурной СЭП СФЭС. Структурная схема модели в том виде, в котором она представляется в программе MATLAB, изображена на рисунке 3.19.

3.8 Разработка системы управления с переменной структурой следящего электропривода солнечной фотоэлектрической станции

Как видно из графиков переходных процессов углов поворота задающей и обрабатывающей оси одноконтурной и двухконтурной СЭП СФЭС величина перерегулирования, число колебаний и время регулирования не отвечают требованиям качества переходных процессов предъявляемых требованиям СЭП СФЭС.

Кроме этого следует отметить, что в этой СЭП СФЭС системе не учитывается уменьшения чувствительности системы управления к изменению её параметров с целью стабилизации системы [89]. В связи с этим на основе одноконтурного СЭП гелиоустановки была разработана система с переменной структурой [90], которая дает возможность повысить качество переходных процессов и уменьшения чувствительности системы к изменению ее параметров. Прежде чем рассматривать структурную схему СЭП гелиоустановки с переменной структурой, рассмотрим функциональную схему рисунок 3.21.

Электромеханическая схема одноконтурной СЭП СФЭС, с СПС показана на рисунке 3.21



ЭС – элемент сравнения; РП – регулятор положения; УП – управляемый преобразователь напряжения; СПС – система с переменной структурой (микропроцессор); М – двигатель постоянного тока с независимой обмоткой возбуждения; ИМ – исполнительный механизм; ДТ – датчик тока обратной связи

Рисунок 3.21-Электромеханическая схема одноконтурной СЭП СФЭС с СПС

Следует отметить, что в функциональной схеме СЭП СФЭС в СПС используется релейный элемент и элемент сравнения сигналов по току и частоты вращения угловой скорости.

Структурная схема СЭП СФЭС с СПС ее модели в MATLAB показана рисунке 3.22.

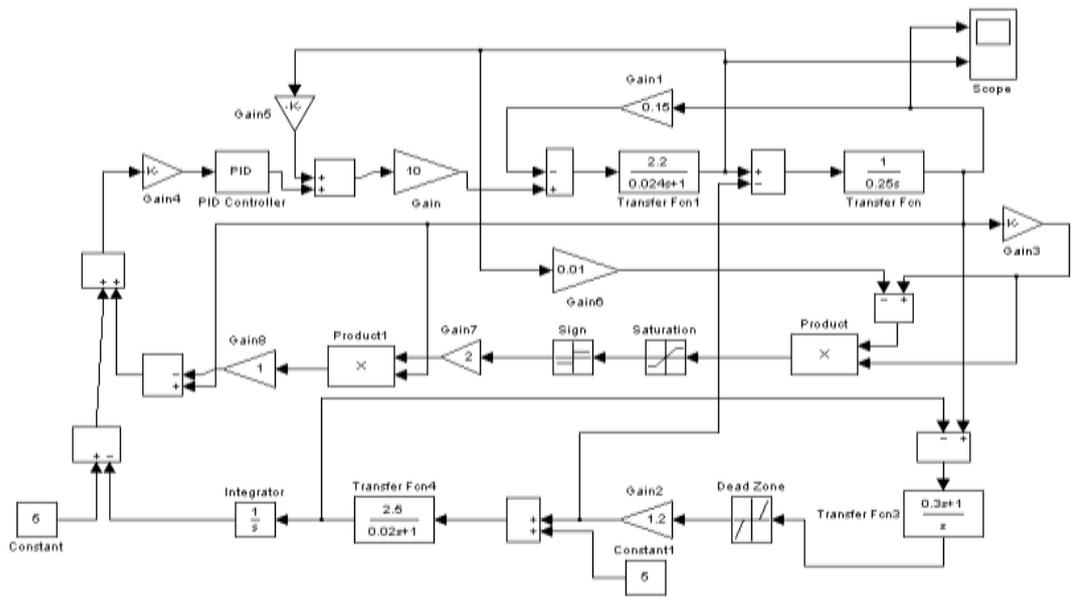


Рисунок 3.22 - Структурная схема модели СЭП СФЭС с СПС на ЭВМ

Структурная схема СПС на рисунке 3.22 представлена передаточными функциями двигателя, редуктора и звеном PID (пропорционально-интегрально-дифференцирующее звено), двумя блоками перемножения и тремя нелинейностями. СПС работает по следующему принципу; в какой-то момент времени по очереди включаются звенья обратной связи, и поэтому уменьшается время переходных процессов, величина перерегулирования и число колебаний.

В результате моделирования получен переходной процесс угла поворота между задающей и обрабатывающей оси модели СЭП СФЭС с СПС.

Как видим из рисунка 3.23 величина перерегулирования равняется нулю, число колебаний равно нулю, время регулирования 4с. Сравнивая полученную кривую переходного процесса (рис.3.23), с кривой переходного процесса рис. 3.17 и 3.20 отметим, что качественные характеристики переходного процесса на рис. 3.23 намного лучше, чем на указанных рисунках. Следует отметить, что полученная кривая переходного процесса рис. 3.23 совпадает с экспериментальным в пределах 5%.

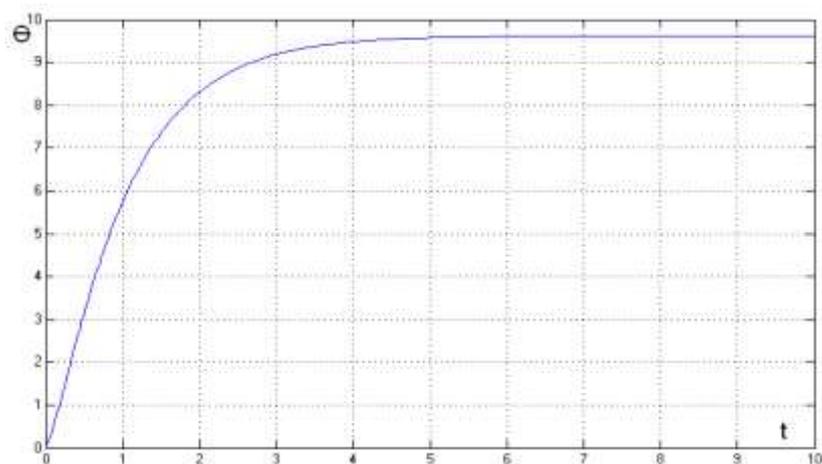


Рисунок 3.23 – Кривая переходного процесса угла поворота задающей и отработывающей оси СЭП СФЭС с СПС полученная в результате моделирования в MATLAB

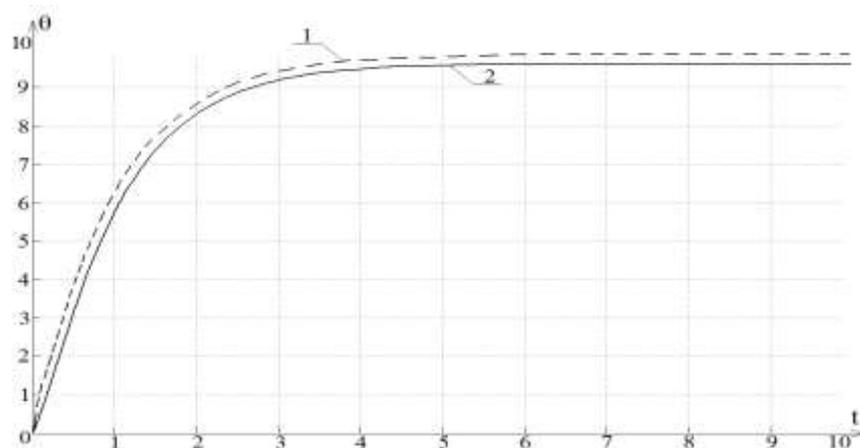


Рисунок 3.24 – Кривая переходного процесса 1- экспериментальная, 2 - кривая, полученная в модели.

В результате использования СПС, мы получили возможность обеспечить минимальное влияние возмущающих воздействий на СЭП СФЭС, повысить качество и уменьшению чувствительности к изменению ее параметров[94].

В результате меньше тратится энергии на компенсацию возмущающих воздействий, то есть работа привода становится энергосберегающей.

Структурная схема одноконтурного СЭП СФЭС с СПС, представлена на рисунке 3.25.

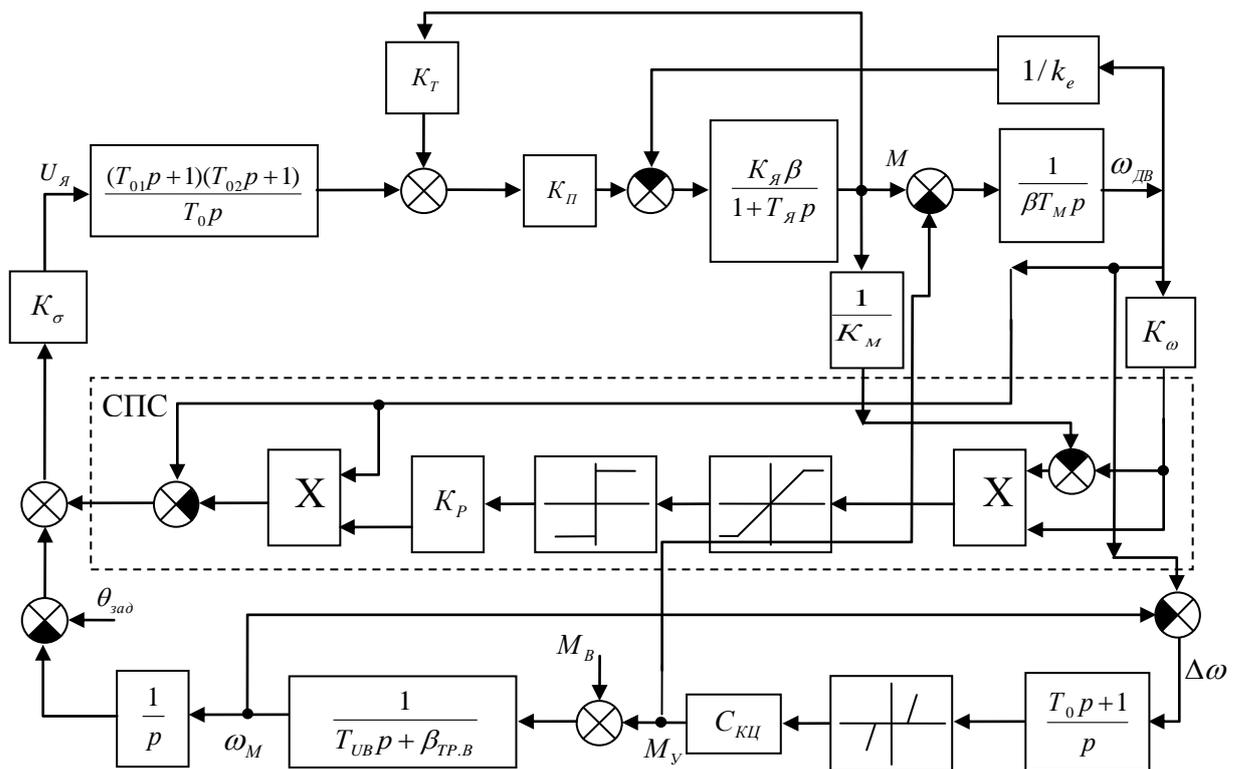


Рисунок 3.25 - Структурная схема одноконтурного СЭП СФЭС с СПС

3.9 Выводы по разделу

Произведен обзор имеющихся следящих систем СЭП СФЭС.

Разработаны математические модели для одноконтурной и двухконтурной СЭП СФЭС.

Разработана система с переменной структурой СЭП, которая повышает качественные характеристики переходных процессов СЭП и приводит к уменьшению чувствительности системы управления к изменению её параметров.

Система с переменной структурой обеспечивает высокое быстродействие в обработке заданного угла поворота СЭП СФЭС. В результате меньше тратится энергии на компенсацию возмущающих воздействий, и режим работы привода становится энергосберегающим.

Полученные моделированные и экспериментальные кривые переходного процесса угла поворота задающей и обрабатываемой оси СЭП СФЭС с СПС.

4 Оборудование и методика исследования разработанного следящего электропривода солнечной фотоэлектрической станции

4.1 Оборудование разработанной солнечной фотоэлектрической станции и основные его характеристики

4.1.1 Устройство и принцип действия солнечной фотоэлектрической станции

Общий вид системы показан на рисунке 4.1. Система состоит из собственной солнечной фотопанели, контроллера заряда и разряда АКБ, из аккумуляторных батарей, инвертора и потребителей энергии.

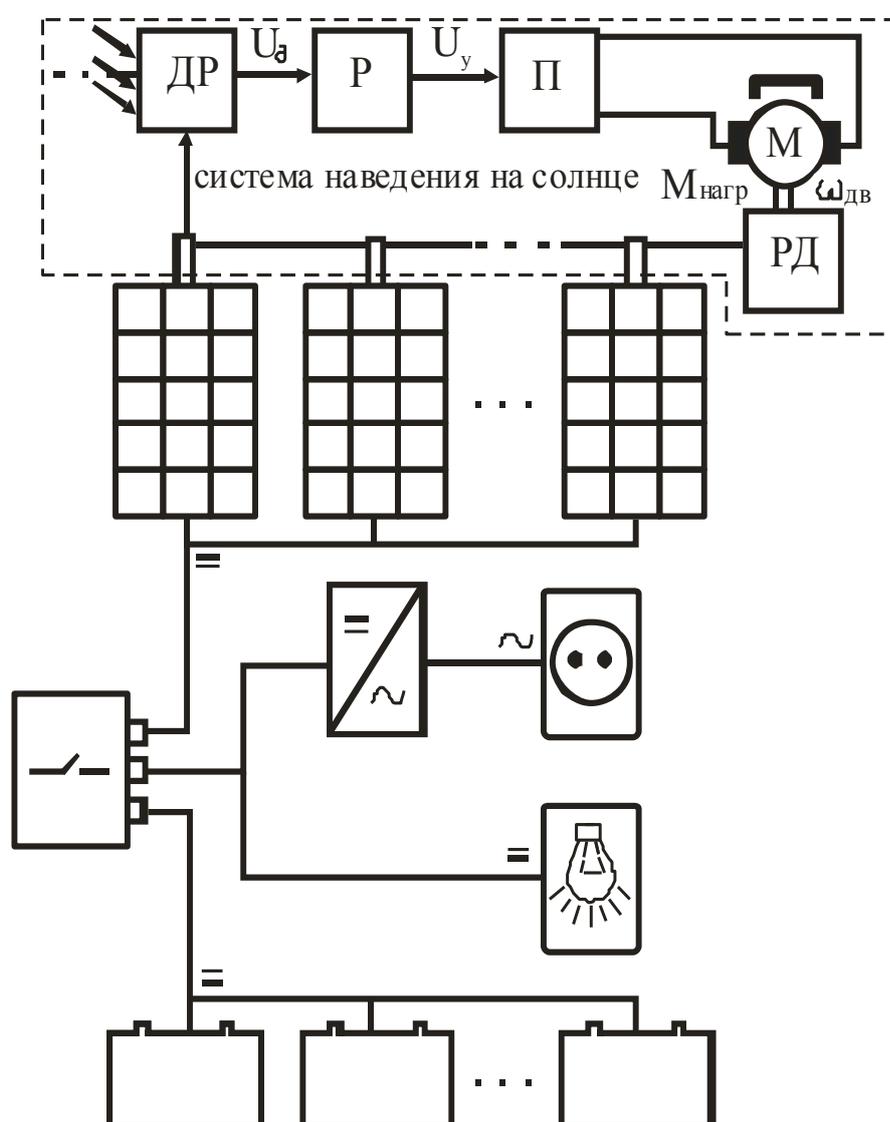


Рисунок 4.1 - Функциональная схема разработанной СФЭС с системой наведения на Солнце

4.1.2 Солнечные батареи, используемые в гелиоустановках

Фотоэлектрические модули имеют хорошие технико-эксплуатационные показатели (мощность от 50-100Вт; 150-160 Вт.)

Солнечный модуль выполнен в виде панели, заключенной в каркас из алюминиевого профиля. Панель представляет собой фотоэлектрический генератор, состоящий из стеклянной плиты, с тыльной стороны которой между двумя слоями герметизирующей (ламинирующей) пленки размещены солнечные элементы, электрически соединенные между собой металлическими шинами. Нижний слой герметизирующей пленки защищен от внешних воздействий слоем защитной пленки. К внутренней стороне корпуса модуля прикреплен блок терминалов, под крышкой которого размещены электрические контакты, предназначенные для подключения модуля [94].

В настоящее время выпускаются также солнечные батареи с обычным стеклом мощностью от 5 до 125 Вт.

В нашей работе мы рассматриваем СФЭС мощностью до 1 кВт.

Были подобраны имеющиеся на нашем рынке солнечные панели фирмы «Evergreen Solar» производительностью 125 Вт, потребовалось 6 модулей [95,96].

Вес 1 модуля 18,2 кг.

Площадь $S = 1,5$ м.

Общая площадь панелей $S_{об} = 9$ м².

Габариты 1,570x0,951 м.

Общий вес модулей $18,2 \times 6 = 109,2$ кг.

Вес конструкции = 12 кг.

Вес рамы 26 кг.

Итого общий вес $109,2 + 12 + 26 = 147,2$ кг.

4.1.3 Аккумуляторы, используемые в солнечной фотоэлектрической станции

В современных системах автономного электроснабжения применяются в основном кислотные необслуживаемые аккумуляторы с длительным сроком службы. Также применяются гелиевые аккумуляторы, но они дороже. Применение аккумуляторов автомобильного типа не оправдано из-за короткого срока службы, сульфитации при недостаточном заряде и расслоении электролита при хроническом недозаряде. Возможно применение автомобильного типа аккумуляторов только в условиях очень низких температур, при избытке солнечных батарей (чтобы обеспечить максимум заряда), при этом надо обратить внимание на конструкцию аккумуляторов: сплав свинца, олова и кальция должен быть, и на положительном и на отрицательном электроде, кроме этого, аккумулятор должен быть необслуживаемым и желательно герметичным.

В настоящее время эксплуатационные характеристики СФЭС определяются, прежде всего, параметрами электрохимического источника энергии (аккумуляторной батареей). Мощность источника энергии определяет его динамические характеристики (время зарядки и разрядки), а также ресурс работы и надежность (ресурс СФЭС в целом.)

В качестве примера для выбора химического источника энергии приводятся параметры:

- энергоемкость, E , Вт/ч - ~ 1000 ;
- максимальная мощность, P_{pic} , 1Вт, и время t ее реализации - 22500, не более 16 с;
- длительно реализуемая мощность, P_{cnt} , Вт - 5700;
- масса аккумуляторной батареи, кг, не более $-100 \pm 10\%$;
- габаритные размеры, не более, $дм^3$ - 96;
- температурный диапазон, $^{\circ}C$, - $-40 - +50$.

Проведем сравнение основных параметров свинцово-кальциевой, никель-кадмиевой, никель-металлогидридной и литий-ионной электрохимической систем.

По результатам сравнения параметров выбирается тип аккумуляторов для СФЭС. Для наглядного представления характеристики источников тока представлены в виде графика[99].

На рисунке 4.2 показаны разрядные характеристики единичных аккумуляторов CaPb, NiMh, Li-ионной электрохимических систем при постоянном токе разряда величиной 1С и температуре $+20^{\circ}C$.

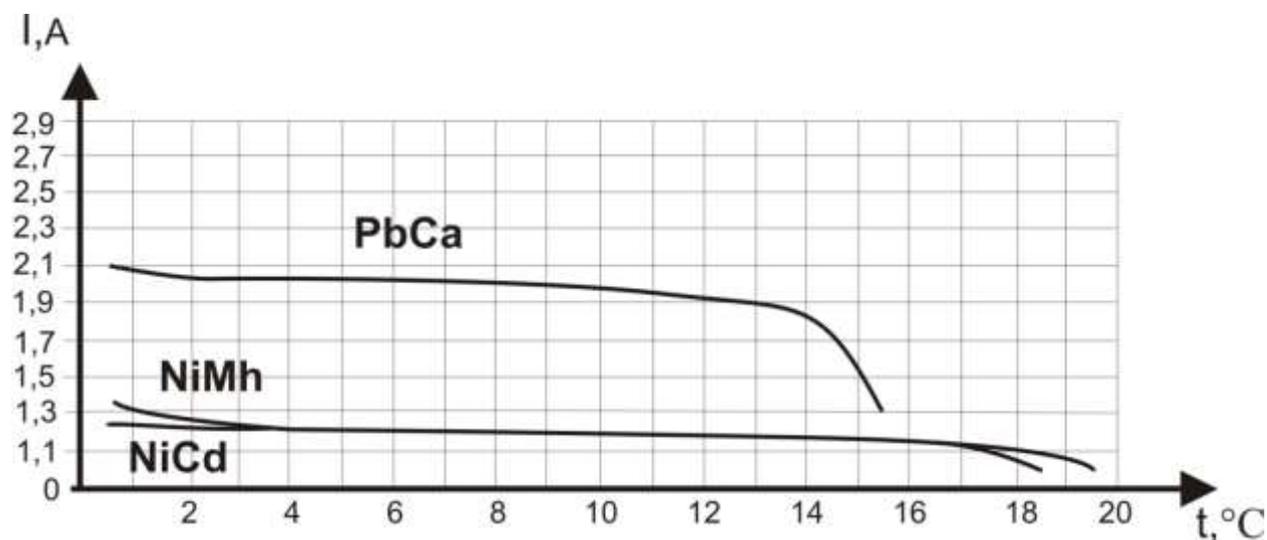


Рисунок 4.2 – Разрядные кривые электрохимических систем

Конечные разрядные напряжения для PbCa, NiCd, NiMh, Li-ионной электрохимических систем- 1,3В, 1,0В, 3,0В соответственно. Как видно на рисунке 4.2, наибольшее количество своей энергии аккумулятор отдает на линейном участке разрядной кривой. Средняя энергия, отданная

аккумуляторами при разряде на линейном участке кривой, рассчитывается по формуле

$$E_{cp} = U_{cp} \cdot I_p \cdot t_{cp} \quad (4.1)$$

где E_{cp} – средняя энергия, отданная аккумулятором на линейном участке кривой;

U_{cp} – среднее разрядное напряжение, I_p – разрядный ток равный 1с., t_{cp} – время.

Рассчитанная по формуле (4.1) разрядная энергия, Вт·ч

PbCa-1,17·1С,

NiCd-0,89·1С,

NiMh-0,93·1С,

Li-bju-2,74·1С.

где 1С-разрядный ток аккумулятора.

При выборе источника тока следует рассматривать экономическую составляющую, которая, как правило, выражается стоимостью единицы энергии (Вт/ч) электрохимического источника тока. На рисунке 4.3 представлена гистограмма энергостойкости различных систем накопителей, включая цилиндрическое и призматическое исполнение Li-ионного аккумулятора.

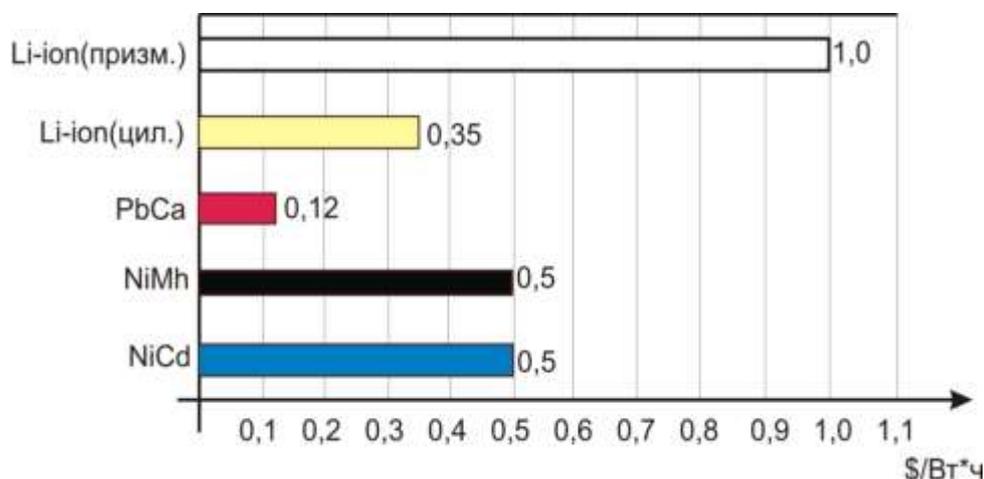


Рисунок 4.3 - Стоимость единицы энергии у аккумуляторов различных систем

Стоимость единицы энергии у свинцово-кальциевого аккумулятора составляет 0,12\$/Вт/ч.

Li-ионный аккумулятор в призматическом исполнении является наиболее дорогим из представленных систем, стоимость единицы энергии 1\$/Вт/ч, Li-ионные аккумуляторы в цилиндрическом исполнении 0,35\$/Вт/ч обходятся дешевле призматических в ~2,86, в ~1,43 раза дешевле NiCd и NiMh, и в 2,92

раза дороже свинцово–кислотных. Но, несмотря на преимущество цилиндрических Li-ионных аккумуляторов по стоимости их удельные энергетические характеристики более низкие по сравнению с аккумуляторами призматической конструкции, к тому же их объединение в батарею весьма неудобно.

Номинальная энергия аккумуляторной батареи вычисляется по формуле:

$$E_H = U_{Hббa} \cdot I_H \cdot t = U_{Hбaт} \cdot C_H , \quad (4.2)$$

где U_H - номинальное напряжение батареи, I_H - номинальный ток батареи, C_H - номинальная емкость аккумулятора.

Количество последовательно соединенных аккумуляторов в батарею

$$N_{ак} = \frac{U_{нбaт}}{U_n} , \quad (4.3)$$

где U_n - номинальное напряжение аккумулятора батареи.

Так как максимальная мощность P_{pic} и длительно реализуемая мощность P_{cid} известны, рассчитывается ток потребления от аккумуляторной батареи в данных режимах ее эксплуатации.

В режиме длительно реализуемой мощности ток потребления от аккумуляторной батареи составляет

$$I_{cnn} = \frac{P_{cnt}}{U_{нбaт}} = \frac{5700}{162} = 35,18A = 0,38C .$$

В режиме максимальной мощности

$$I_{pic} = \frac{P_{pic}}{U_{нбaт}} = \frac{22500}{162} = 138,89A = 1,5C .$$

Как видно из технического задания на аккумуляторную батарею, ее параметры удовлетворяют режимам работы СФЭС.

Повышенная температура аккумулятора (перегрев) может вызвать необратимые процессы внутри аккумулятора. Так, разогретый электролит начинает вступать в реакцию с активными материалами, что способствует дополнительному разогреву, увеличивается скорость реакции окисления положительного электрода.

После проведенного сравнительного анализа характеристик видно, что очевидные преимущества практически по всем основным параметрам имеют

PbCa аккумуляторы, а накопитель энергии, построенный на базе этих аккумуляторов, соответствует требованиям технического задания на накопитель энергии СФЭС. Кроме этого данный тип аккумуляторов производится в Казахстане, в г. Талдыкургане.

4.1.4 Система контроля и управления солнечной фотоэлектрической станции

Для построения системы контроля и управления аккумуляторной батареей необходимо определить ее общую структуру и принципы взаимодействия иерархических уровней между собой. Требуется решить вопросы, связанные с выбором сигналов управления, необходимостью организации системы обратных связей, взаимодействием между несколькими подлежащими управлению переменными состояниями [62].

Система контроля и управления должна иметь модульную структуру. Каждый модуль обеспечивает выполнение определенного набора функций. Если полученных данных не достаточно для принятия решения, модуль инициирует обращение к другим модулям за дополнительной информацией.

Под дополнительной информацией понимаются константы, переменные, массивы данных, функции, флаги состояний (если происходит обращение к модулю логического уровня) и сигналы (если обращение происходит к модулю физического уровня) (рисунок 4.4).

Модули логического уровня это программно реализуемые алгоритмы, модули физического уровня - реальные устройства (датчики напряжения, тока, температуры, исполнительные механизмы и т.д.). Взаимодействие модулей всех иерархических уровней между собой по заранее определенному алгоритму образует систему контроля и управления батареей химических аккумуляторов.

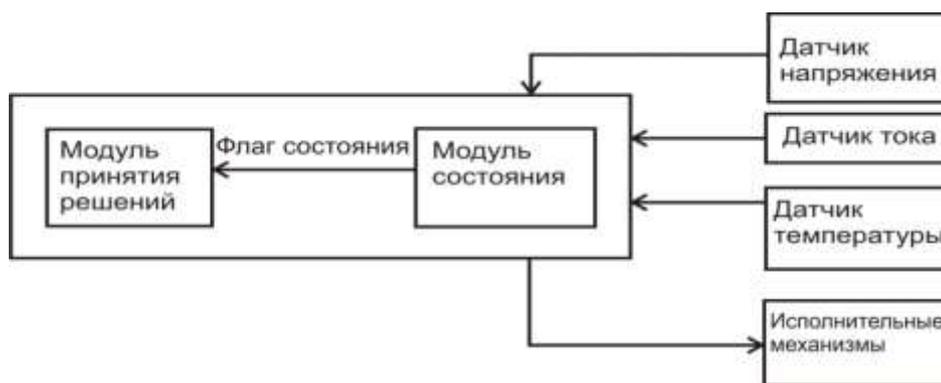


Рисунок 4.4 - Общий вид системы контроля и управления аккумуляторной батареей

Система контроля и управления должна обеспечивать контроль и управление режимом защиты аккумуляторной батареи.

1. Защита от недопустимых перегрузок.

В этом случае система защиты должна осуществить регулирование таким образом, чтобы обеспечить режим работы управляемого объекта в пределах допустимой эксплуатационной характеристики.

2. Защита с подачей принудительного сигнала.

Здесь при приближении к пороговому значению эксплуатационной характеристики объекта управления система предусматривает генерацию предупредительного сообщения.

3. Защита с отключением.

Защита с отключением должна предусматривать незамедлительную реакцию и обеспечение изоляции объекта управления от внешних воздействий вызывающих его эксплуатацию за допустимыми пределами.

Модули защиты системы контроля и управления СФЭС должны работать с высокой степенью надежности. Проект защиты должен учитывать последствия, к которым может привести та или иная неисправность или перегрузка системы. Для типичных неисправностей необходимо устанавливать последовательность отключения, оптимальную для всей установки.

В исследуемой СФЭС используется контроллер типа ПК-02, технические характеристики которого приведены ниже.

Технические характеристики:

- основной параметр, определяющий свойства контроллера - ток, максимальный ток заряда для контроллера заряда и максимальный ток нагрузки для контроллера разряда;

- контроллеры выпускаются на разные входные и выходные напряжения, обычно на 12, 24, 36, 48, 96, 192, 288 В;

- температурный диапазон работы контроллеров разных моделей лежит в пределах: - 700/+700 С;

- некоторые контроллеры имеют функцию эквализации, для применения с автомобильными аккумуляторами, эта функция включается периодически и повышает зарядное напряжение до 15 В, что приводит к появлению пузырьков газа, аккумулятор "кипит", таким образом перемешивается электролит. Эту функцию категорически запрещается использовать с аккумуляторами собранными по технологиям GEL и AGM.

Программируемый контроллер является специализированным микроЭВМ и предназначен для выдачи исполнительным устройствам команд, которые вырабатываются на основании комбинации входных сигналов. Управляющая программа контроллера составляется в соответствии с условиями процесса и задачами управления. Программа заносится в постоянное запоминающее устройство контроллера. ПК-02 выполняет следующие операции:

- логические сложения (дизъюнкция) и умножения (конъюнкция);
- безусловный и условный (по условию) переходы;
- временная задержка;
- занесение в память промежуточного состояния устройства.

Технические характеристики ПК-02

Напряжение питанияПеременное однофазное
220 В +20%
- 40%

Применение микро-ЭВМ для управления технологическими объектами, в первую очередь автоматизированными приводами, к которым предъявляются высокие требования по точности, быстродействию и другими динамическими показателями. Позволяет на базе одних и тех же технических средств решать широкий круг задач: построение систем управления с «жесткой» и перепрограммируемой логикой, конструирование самонастраивающихся регуляторов, выполнение функций контроля, защиты диагностики, оперативного представления информации обслуживающему персоналу.

Рассмотрим пример составления программы по структурной схеме регулятора скорости (рисунок 4.5).

Задание на скорость вводится с внешнего пульта УВС. Величина задания контролируется оператором *ZON* (на случай неверного ввода) . Кнопка 0.1 играет роль пусковой цепи. При ее замыкании задание на скорость поступает на вход задатчика интенсивности (оператор *ING*). Далее следует традиционная структура регулятора скорости. Сигнал обратной связи по скорости поступает с импульсного датчика ДС и преобразуется в код устройством УВВ – 001. Аналоговый сигнал с регулятора скорости поступает на регулятор тока РТ, выполненный в традиционном аналоговом виде.

Логическое ОЗУ предназначено для оперативного занесения и хранения информации в 16 восьмиразрядных ячейках с возможностью обращения к каждому разряду отдельно.

Таймер, содержит 16 независимых счетчиков, позволяющих задавать временные задержки от 0 до 127 сек, с дискретой в одну секунду.

Выходные устройства реализуют передачу управляющих команд к исполнительным элементам. Напряжение питания выходных устройств +15, +24 или +48 В при токе нагрузки до 200мА. Для включения нагрузки более высокой мощности (напряжение 220 В, ток до 5 А) используются симисторные ключи 4 КСО, которые работают совместно с выходными устройствами.

В ПК-02 для программирования используется язык ассемблерного типа. Разрядность программного слова - 16 бит. Форматы программных слов изображены на рисунке 4.6.

В языке программирования ПК-02 используется 8 команд. Тексты управляющих программ записываются в мнемоническом виде с последующим переводом в двоичный код. В таблице 4.1 приведены мнемонические обозначения команд и их назначение.

Код операции трехразрядный. В логических командах также используется признак М следующим образом: при М=0 - операция с входным или выходным устройством; при М=1 - операция с логическим ОЗУ.

В случае замены кнопки «Стоп» на нормально разомкнутую команда AND по первому адресу программы будет заменена на команду LOR.

Т а б л и ц а 4.1 - Основные команды многоканального цифрового регулятора

Команда	Назначение
<i>CLA</i>	Присвоение всем разрядам аккумулятора нулевых значений («чистка аккумулятора»)
<i>CIA</i>	Перевод содержимого аккумулятора в дополнительный код
<i>JMP A</i>	Безусловный переход по адресу А программы
<i>SZA</i>	Условный переход по нулю аккумулятора (при выполнении условия происходит пропуск команды, в противном случае – переход на следующую команду)
<i>SSA</i>	Условный переход по неотрицательному значению аккумулятора (выполнение аналогично SZA)
<i>ACL S</i>	Сдвиг содержимого аккумулятора влево на S разрядов
<i>ACR S</i>	Сдвиг содержимого аккумулятора вправо на S разрядов
<i>LCR NM</i>	Присвоение регистру N значению M
<i>INR NK</i>	Увеличение содержимого регистра N на константу K
<i>DKR NK</i>	Уменьшение содержимого регистра N на константу K
<i>CPR NK</i>	Условный переход по равенству содержимого регистра константе K (выполнение аналогично SZA)
<i>LDC A</i>	Вызов на аккумулятор значения ячейки ОЗУК с адресом А
<i>LDD A</i>	Вызов на аккумулятор значения ячейки ОЗУД с адресом А
<i>LDK A</i>	Вызов на аккумулятор кода УВВ с адресом А
<i>LDY A</i>	Вызов на аккумулятор кода УО с адресом А
<i>STC B</i>	Засылка из аккумулятора в ячейку ОЗУК с адресом В
<i>STD B</i>	Засылка из аккумулятора в ячейку ОЗУД с адресом В
<i>STK B</i>	Засылка содержимого аккумулятора на УВВ с адресом В
<i>STY B</i>	Засылка из аккумулятора на УО с адресом В
<i>ADC A</i>	Сложение содержимого аккумулятора с содержимым ячейки ОЗУК с адресом А (результат остается на аккумуляторе)
<i>ADD A</i>	Сложение содержимого аккумулятора с содержимым ячейки ОЗУД с адресом А
<i>SBC A</i>	Вычитание из содержимого аккумулятора содержимого ячейки ОЗУК с адресом А
<i>SBD A</i>	Вычитание из содержимого аккумулятора содержимого ячейки ОЗУД с адресом А
<i>DLC A</i>	Деление содержимого аккумулятора на содержимое ячейки ОЗУК с адресом А
<i>команда</i>	Назначение
<i>DA</i>	Деление содержимого аккумулятора на содержимое ячейки ОЗУД с адресом А
<i>MPC A</i>	Умножение содержимого аккумулятора на содержимое ячейки ОЗУК с адресом А
<i>MPD A</i>	Умножение содержимого аккумулятора на содержимое ячейки ОЗУД с адресом А

Напомним, после выполнения команды включения выходного сигнала (адрес 005) счетчик адреса программы увеличивается на 2. Таким образом, после выполнения команды с адресом 005 будет осуществлен переход на команду с адресом 007.

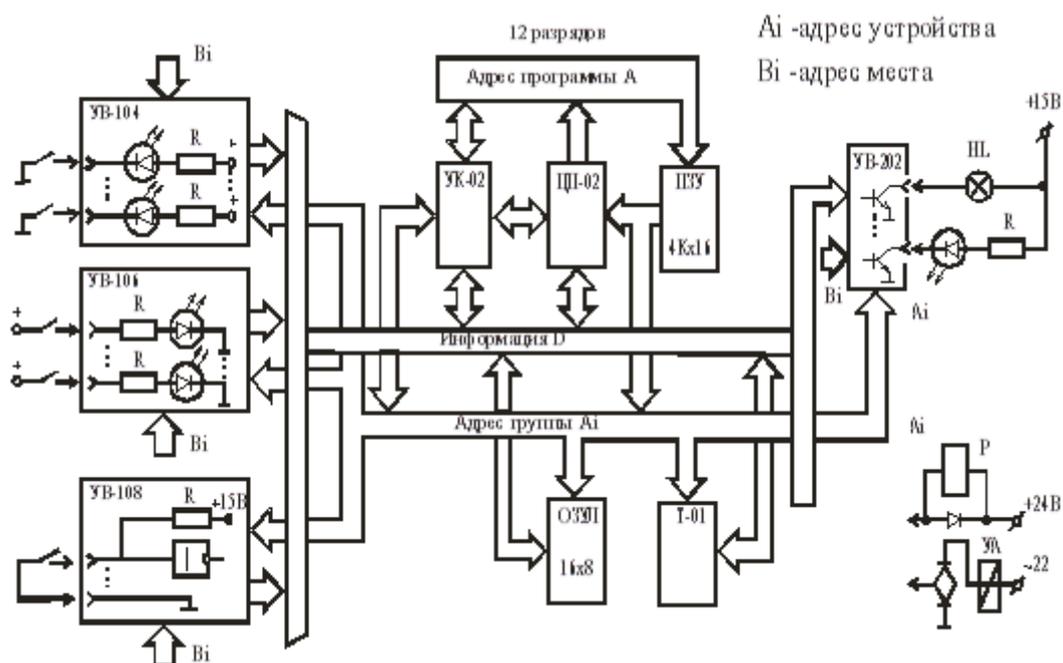


Рисунок 4.5 - Структурная схема регулятора скорости

М	КОП		№ группы	№ соединения	Логическая команда
16	15	13	12 9	1	
⊗	Адрес			Адресная команда	
16	15 13	12 1			
⊗	№ задержки		⊗	Заданное время	Таймерная команда
16	15 13	12	8	7 1	

Рисунок 4.6 - Форматы программных слов контроллера ПК-02

4.1.5 Система наведения солнечной фотоэлектрической станции

Как было рассмотрено в главе 1, если СФЭС неподвижна и сориентирована в полдень по направлению на Солнце, то она теряет порядка 40% по сравнению с подвижной СФЭС при условии, что часовой угол восхода и захода составляет соответственно 0° до 180° и весь световой день доступна прямая солнечная радиация. Отсюда следует, что решающим фактором КПД СФЭС является ориентация СФЭС за источником излучения, т.е. за Солнцем.

Схема датчика слежения без вмешательства извне способна ориентировать солнечную батарею по наилучшей освещенности.

Для поддержания оптимальной освещенности солнечных батарей разработаны разнообразные системы слежения за Солнцем - от простейших аналоговых до аналогово-цифровых. Данные системы, в основном, рассчитаны на изменения солнечной освещенности и срабатывают в результате изменения уровня освещенности. В нашей работе такая система приводится в исходное рабочее состояние и не требует постоянного вмешательства персонала в работу системы.

Блок управления предназначен для автоматической ориентации солнечной батареи на Солнце, а также для обеспечения заряда аккумуляторной батареи (АБ) [97]. В блоке предусмотрена возможность ручного управления солнечными батареями (СБ).

Устройство использует импульсное регулирование для пошагового режима СЭП и позволяет ориентировать солнечную батарею по наилучшей освещенности. Принципиальная схема системы наведения приведена на рисунке 4.8 [98].

Устройство ориентации состоит из тактового генератора (DD1.1, DD1.2), основных интегрирующих цепей, состоящих из фотодиодов (VD2R4C3, VD3R5C4), формирователей (DD1.3, DD1.4), цифрового компаратора (DD2), инверторов (DD1.5, D1.6) и транзисторного коммутатора (VT1 – VT6) направления вращения электродвигателя М1, управляющего поворотом платформы, на которой установлена солнечная батарея.

С подачей питания (от солнечной батареи или аккумулятора), генератор вырабатывает тактовые импульсы с частотой 300Гц. При работе устройства тактовые импульсы формируются инверторами (DD1.3) (DD1.4) и интегрирующими цепями VD2R4C3, VD3R5C4. Их крутизна меняется в зависимости от постоянной времени интегрирования, которая в свою очередь зависит от освещенности фотодиодов VD2 и VD3 (ток зарядки конденсаторов C3 и C4 пропорционален их освещенности).

Сигналы с выходов интегрирующих цепей поступают на формирователи уровня (DD1.3, DD1.4) и далее на цифровой компаратор, выполненный на элементах микросхемы DD2. В зависимости от соотношения длительности импульсов, поступающих на входы компаратора, сигнал низкого уровня появляется на выходе элемента DD2.3 (вывод 11) или DD2.4 (вывод 4). При равной освещенности фотодиодов на обоих выходах компаратора

присутствуют сигналы высокого уровня.

Инверторы DD1.5 и DD1.6 необходимы для управления транзисторами VT1 и VT2. Высокий уровень сигнала на выходе первого инвертора открывает транзистор VT1, на выходе второго - VT2.

При работе устройства сравниваются длительности импульсов, сформированных инверторами (DD1.3, DD1.4) и интегрирующими цепями VD2R4C3, VD3R5C4. Их крутизна меняется в зависимости от постоянной времени интегрирования, которая, в свою очередь, зависит от освещенности фотодиодов VD2 и VD3 (ток зарядки конденсаторов C3 и C4 пропорционален их освещенности). Сигналы с выходов интегрирующих цепей поступают на формирователи уровня DD1.3, DD1.4 и далее – на цифровой компаратор, выполненный на элементах микросхемы DD2. В зависимости от соотношения длительностей импульсов, поступающих на входы компаратора, присутствуют, сигналы высокого уровня. Инверторы (DD1.5, DD1.6), необходимы для управления транзисторами VT1 и VT2. Высокий уровень сигнала на выходе первого инвертора открывает транзистор VT1, на выходе второго - VT2. Нагрузками этих транзисторов являются ключи на мощных транзисторах VT3, VT6 и VT4, VT5, которые коммутируют напряжение питания электродвигателя M1. Цепи R8C7R10 и R9C8R11 сглаживают пульсации на базах управляющих транзисторов VT1 и VT2. Направления вращения двигателя меняются в зависимости от полярности подключения к источнику питания. Цифровой компаратор не позволяет одновременно открыться всем ключевым транзисторам и таким образом обеспечивает высокую надежность системы. С появлением Солнца освещенность фотодиодов VD1 и VD4 окажется различной, и электродвигатель начнет поворачивать солнечную батарею с запада на восток. По мере уменьшения разницы в длительностях импульсов, вырабатываемых формирователями, будет уменьшаться длительность результирующего импульса, и скорость поворота солнечной батареи плавно замедляется, что обеспечит ее точное позиционирование.

Таким образом, при импульсном управлении вращение вала электродвигателя передается платформе с солнечной батареей непосредственно без применения редуктора. Платформа с солнечной батареей будет поворачиваться вслед за движением Солнца.

С отсутствием освещенности батареей (Солнце зайдет за горизонт) длительности импульсов на входе цифрового компаратора окажутся одинаковыми, и система перейдет в дежурный режим. В этом состоянии потребляемый устройством ток не превышает 1,2 мА (в режиме ориентации он зависит от мощности двигателя). Аккумулятор устройства используется для накопления энергии, вырабатываемой солнечной, и питания самого электронного блока. Поскольку электродвигатель включается лишь для поворота батареи (т.е. на непродолжительное время), выключатель питания не применяется.

Вышеуказанное устройство слежения СФЭС работает по двум

координатам.

Интегрирующие цепи (VD1R2C2, VD4R6C5) являются вспомогательными, основная задача которых это поворот солнечной панели с запада на восток при восходе солнца.

Фото датчика слежения показано на рисунке 4.7.

Для защиты фотодиодов от избыточного излучения применяются светофильтры.



Рисунок 4.7 - Фото датчика слежения

4.1.6 Выбор электродвигателя солнечной фотоэлектрической станции с учётом результатов моделирования

Для расчета мощности двигателя слежения энергетической гелиоустановки с заданной выходной мощностью $P_{\text{Э}} = 1000$ Вт, и заданным уровнем радиации $E_0 = 1200$ Вт/м² предварительно определяется требуемая площадь фотоэлементов [98]

$$S = \frac{P_{\text{Э}}}{\eta_{\text{п}} \cdot E_0 \cdot K_{\text{з-я}}}, \quad (4.3)$$

где $\eta_{\text{п}}$ - КПД фотопреобразователя, учитывающий КПД преобразования энергии солнечного излучения в электрическую энергию и омические потери $\eta_{\text{п}} = 0,08$;

$K_{\text{з-я}}$ – коэффициент заполнения солнечных модулей фотоэлементами $K_{\text{з-я}} = 0,09$.

$$S = \frac{1000}{0,08 \cdot 1200 \cdot 0,9} \approx 11,57 \text{ м}^2.$$

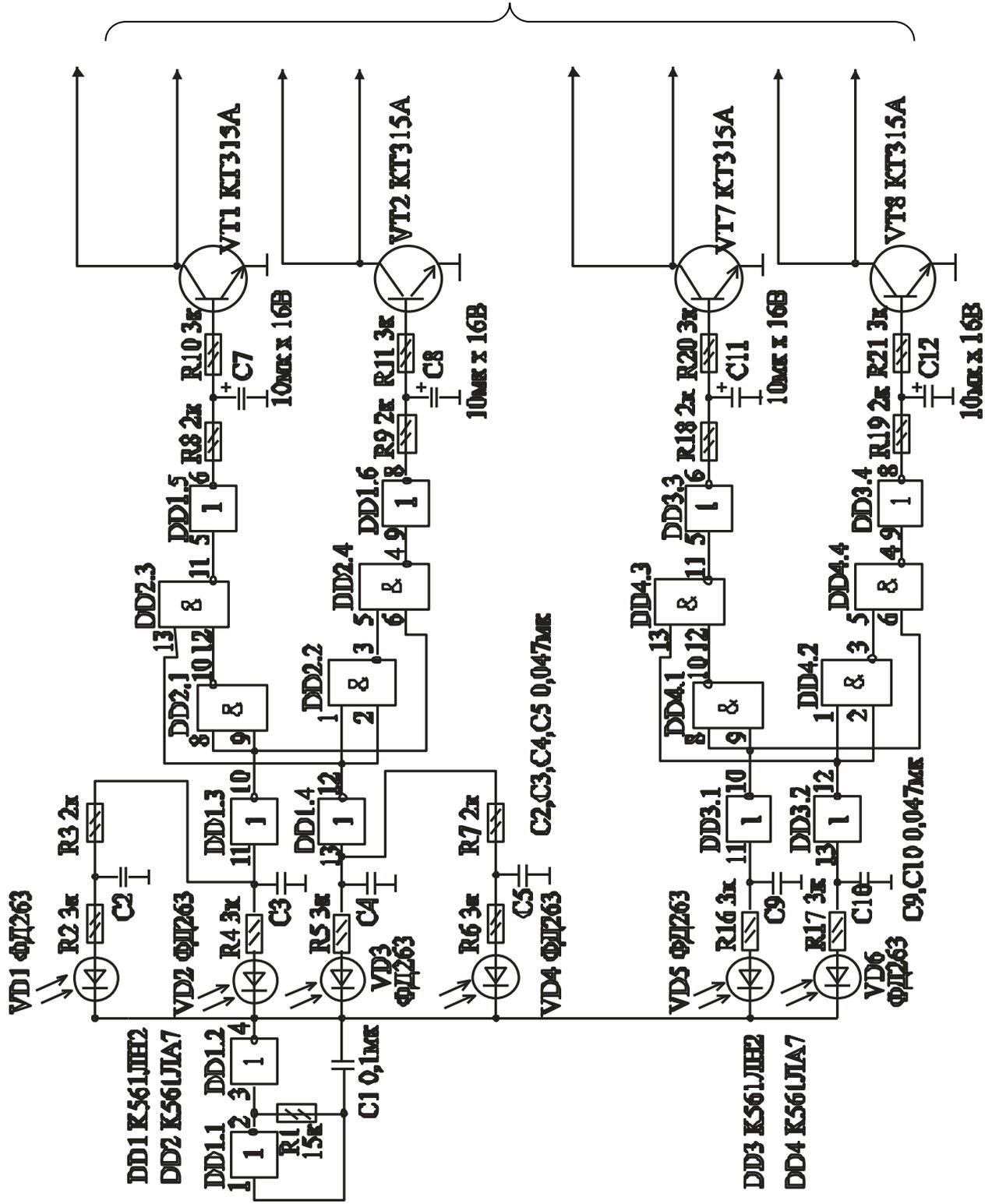


Рисунок 4.8 - Принципиальная схема системы наведения на Солнце вместе с датчиком слежения

При расчете площади фотоприемника учтены параметры имеющихся на современном рынке фотоэлементов [95,96], а также имеющийся опыт проектирования реальных гелиоустановок. Дальнейший расчет ведется по формулам настоящего раздела, выведенным выше.

Выбираются линейные размеры фотоприемника и отдельных модулей, в данном случае $l=3\text{м}$.

На основе имеющейся информации, район эксплуатации установки сопоставляется с районом для конкретной местности и определяется нормированный скоростной напор ветра $W_0=0,23\text{ кПа}$ или 230Па . Затем по таблице [80] определяется коэффициент, учитывающий изменение ветрового давления по высоте – для разрабатываемой местности $k = 0,5$

$$M_{\text{ветр}} = \frac{1}{4} S i k W_0 = 2846 \text{ Н}\cdot\text{м}, \quad (4.4)$$

$$F_{\text{ветр}} = 2 S k W_0 = 7950 \text{ Н},$$

где $S = 33 \text{ м}^2$;
 $l=3\text{м}$;
 $k = 0,5$;
 $W_0 = 230 \text{ Па}$.

$$M_{\text{тр}} = \sqrt{F_{\text{ветр}}^2 + (mg)^2} \cdot f \frac{d}{2} = 28 \text{ Н}\cdot\text{м}, \quad (4.5)$$

где $m = 500 \text{ кг}$;
 $g = 9,8 \text{ м/с}^2$;
 $f = 0,15$;
 $d = 0,04 \text{ м}$.

$$M_{\text{дисб}} = 0,01 \cdot l \cdot (F + mg) = 378 \text{ Н}\cdot\text{м}, \quad (4.6)$$

$$P_{\text{дв}} = K_J \frac{(M_{\text{ветр}} + M_{\text{тр}} + M_{\text{дисб}}) \omega_{\text{исп.м}}}{\eta_{\text{кц}}}. \quad (4.7)$$

На основании данных завода изготовителя редуктора принимаем $\eta_{\text{кц}} = 0,5$. Максимальную скорость исполнительного вала рассчитаем из условия

$$\omega_{\text{исп.м}} = \frac{\theta_n}{t_n}. \quad (4.8)$$

Требуемая длительность перехода $t_n = 600 \dots 1800 \text{ с}$, ширина зоны слежения оценивается примерно $\theta_n = 2,79 \text{ рад}$, тогда $\omega_{\text{исп.м}} = 1,55 \cdot 10^{-4} \dots 4,65 \cdot 10^{-4} \text{ рад/с}$.

$$P_{\text{дв}} = 1,2 \frac{(2846 + 27 + 378) \cdot 4 \cdot 10^{-3}}{0,5} = 31,2 \text{ Вт.}$$

В подразделе 3.1 нашего исследования даны рекомендации по учету механических колебаний при расчетах мощности электродвигателя привода СФЭС. При этом определено, что механические колебания приводят к значительной дополнительной потере мощности в двигателе, которая при неблагоприятном стечении обстоятельств может достигать порядка 20% - 30% номинальных потерь в двигателе. При расчетах мощности двигателя по приведенным в настоящей работе формулам целесообразно учитывать это коэффициентом запаса $K_3 = 1,05 \dots 1,5$.

Поэтому с учётом K_3 для электропривода проектируемой гелиоустановки выбран двигатель постоянного тока МЭ215Б с номинальной мощностью 50 Вт, номинальным напряжением 12В и номинальной скоростью 2500 об/мин. Возбуждение двигателя осуществляется от постоянных магнитов.

4.1.7 Инвертор разработанной солнечной фотоэлектрической станции

Инвертор является преобразователем напряжения 12 (24) постоянного тока в переменный ток напряжением $\sim 220\text{В}$ или в напряжение любого другого номинала которое необходимо по технологии [99].

Если при большой солнечной инсоляции энергия, выдаваемая блоком СМ, оказывается больше необходимой для непосредственной работы потребителя, то КУз/р должен обеспечивать одновременное подключение блока СМ к инвертору и выдачу лишней энергии для заряда АКБ.

При разработке инвертора мы исходим из таких критериев:

- максимальная мощность, отдаваемая в нагрузку должна быть не менее 1 – 1,5 КВт. Данное условие заставляет использовать мощные тиристоры или транзисторы;

- форма выходного напряжения на выходе преобразователя должна быть близкой к синусоидальной, это достигается использованием емкости, подключаемой параллельно нагрузке или применением ее также и в силовой части инвертора тока;

- «сквозные» токи должны быть устранены.

Данная проблема весьма актуальна и заключается в том, что время включения транзистора или тиристора меньше времени выключения, т.е. в тот момент, когда один прибор включается и подает ток в первичную обмотку трансформатора, второй прибор, который уже должен быть выключен в этот момент, также еще подает ток в обмотку. Это проблему можно решить, уменьшив длительность управляющих импульсов тиристора на время,

достаточное для полного его закрытия. Функциональная схема такого преобразователя приведена на рисунке 4.9.

Задающий генератор (ЗГ) вырабатывает прямоугольные импульсы длительностью 10мс. С выходов ЗГ импульсы поступают на линию задержки (ЛЗ) и одновибратор (ОВ). ЛЗ служит для того, чтобы уровень лог. «1» пришел на схему совпадения на 1 мкс позже, чем импульс с одновибратора. Длительность импульса одновибратора вычитается от длительности импульса ЗГ и должна быть больше длительности запирающего применяемых тиристоров. Выходной формирователь импульсов (ВФ) выдает управляющие импульсы на управляющие электроды тиристоров силовой части (СЧ).

Таким образом, преобразование постоянного тока в переменный ток может осуществляться с помощью электрических вентилях, проводимостью которых можно управлять. В этом случае вентили должны быть способны выдерживать приложенное прямое напряжение, и момент времени, когда должна наступить проводимость, должен быть управляем.

В связи с развитием силовой полупроводниковой техники все более широкое применение получают силовые транзисторы, которые в отличие от тиристоров лишены многих их недостатков. Поэтому с целью упрощения схемы инвертора и повышения ее надежности рассмотрим инвертор на транзисторах, принципиальная схема силовой части которого приведена на рисунке 4.10.

Силовые транзисторы используются как ключи, получая сигналы управления от отдельной схемы управления. Сигналы управления, поступающие на транзисторы VT1 и VT2, не совпадают по времени, что устраняет появление сквозного тока источника сигнала [99].

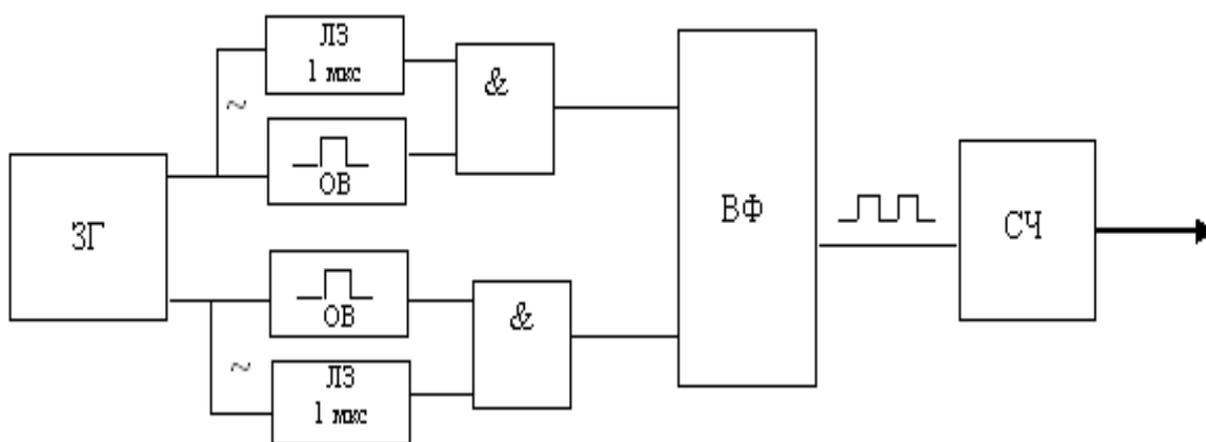


Рисунок 4.9 – Функциональная схема преобразователя

Драйвер один и драйвер два могут быть объединены в одну схему. Например, схема управления должна обеспечить такие возможности, как мягкий запуск, защиту от перегрузок, широтно-импульсную модуляцию и

регулируемое время паузы. Здесь мы имеем в виду не автоколебательные инверторы, а инверторы с внешним возбуждением.

Весь потенциал современных транзисторов, диодов, трансформаторов и конденсаторов не может помочь перед лицом таких общих проблем управления, как флуктуации, недостаточное время паузы, несимметричный рабочий цикл, а также ограниченная или отсутствующая возможность широтно-импульсной модуляции. Эти проблемы можно преодолеть с помощью специальных интегральных схем, разработанных для управления инверторами и преобразователями. Две из них представлены ниже.

В качестве управления дифференциальным инвертором будем использовать микросхему широтно-импульсного модулятора. Предлагаемый полумостовой преобразователь напряжения отличается простотой и надежностью.

Основой преобразователя является микросхема IR2153, представляющая собой драйвер двух ключей (IGBT или MOSFET), имеющий один выход для управления нижним ключом полумоста (LO) и один выход для верхнего ключа (HO) с плавающим потенциалом управления.

IR2153 – драйвер с самотактированием высоковольтных, высокоскоростных МОП-транзисторов или IGBT-транзисторов с выходными каналами нижнего и верхнего уровней. Собственная HVIC-технология и стойкая к защелкиванию КМОП-технология позволили создать монолитную конструкцию. Внешние параметры генератора определяются эквивалентно таймеру 555 (К1006ВИ1). Фото драйвера показана на рисунке 4.11.

Выходы драйверов отличаются высоким импульсным током буферного каскада и паузой при переключении каналов, что выполнено для минимизации встречной проводимости драйвера конструкции и не требует налаживания.

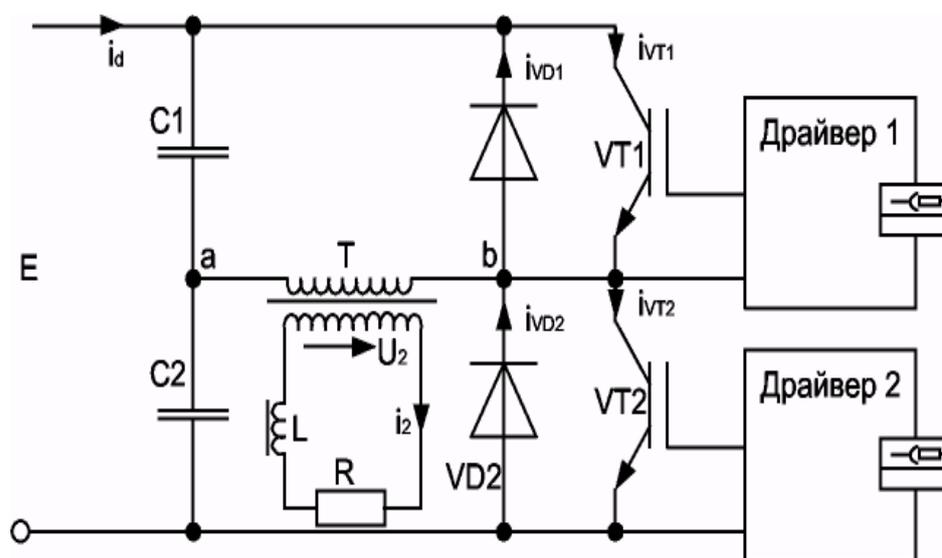


Рисунок 4.10 - Принципиальная схема силовой части инвертора

Задержки распространения сигналов для обоих каналов согласованы для упрощения использования в приложениях со скважностью 2. Выходной канал может быть использован для управления N-канальным силовым МОП-транзистором или IGBT-транзистором с напряжением питания верхнего уровня до 400В. Типовая схема включения драйвера приведена на рисунке 4.12.

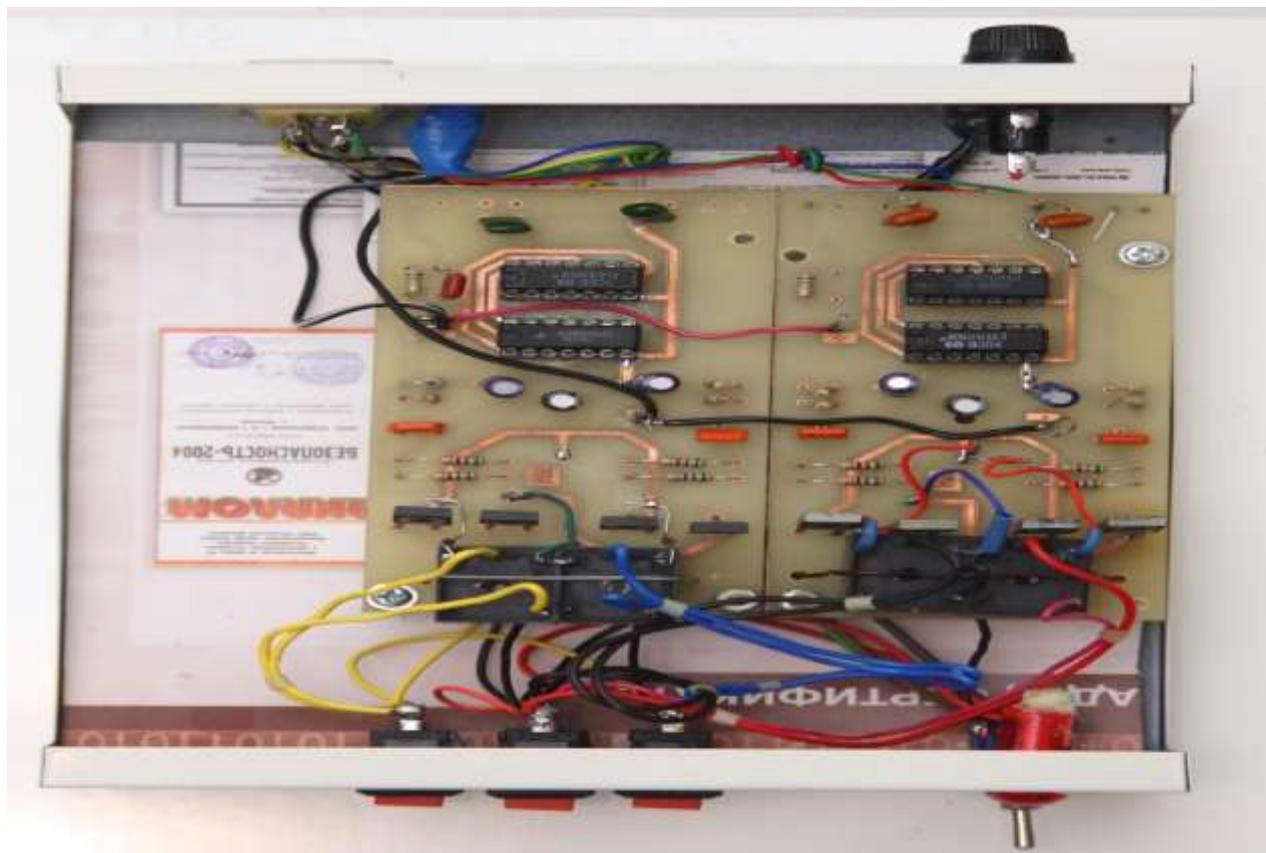


Рисунок 4.11 - Фото драйвера

Мощность, вырабатываемая оборудованием СФЭС равна 1000 Вт.

Цепь подключения драйвера приведена на рисунке 4.13. Так как питание драйвера не может превышать 15В, то рекомендуемое прием равным 12 В тогда $R1= 60 \text{ Ком}$.

Т а б л и ц а 4.2 – Функциональное назначение выводов микросхемы IR2155

R _Г	Резистор задающего генератора, для нормального функционирования в фазе с LO
C _Г	Конденсатор задающего генератора
V _В	Напряжение питания ключей верхнего уровня
НО	Выход драйвера верхнего уровня
V _S	Возврат питания верхнего уровня
V _{CC}	Питание драйверов нижнего уровня и логики
LO	Выход драйвера нижнего уровня
COM	Возврат питания нижнего уровня

Из описания транзистора следует, что R3-R4 берется в районе 50 Ом.

C6-C7- делители напряжения 20мкФ.

Трансформатор Т1 на первичной обмотке 12В;

Вторичная обмотка обеспечивает 220В ток 4,5А при коэффициенте трансформации $K_{тр} = 18$.

VD5-VD7 – диоды КД213А.

C8 - C9 сглаживают пульсации 470мкФ на напряжение до 50 ВС10 соответственно.

Составим принципиальную схему дифференциального инвертора (рисунок 4.13).

Напряжение питания на микросхему D1 поступает через резистор R1 и сглаживается конденсатором C3. Напряжение на выводе VCC микросхемы D1 не может быть выше 15,6 В, так как внутри микросхемы между выводами 1 и 4 установлен стабилитрон. Цепочка R2, C4 задает частоту работы задающего генератора и равна 40 кГц, при необходимости может изменяться от 80 Гц до 1 МГц при условии, что минимальные значения R2 и C4 должны находиться в пределах 10 кОм и 330 пФ соответственно. Для подбора данных деталей можно воспользоваться номограммой. Верхний ключ открывается с выхода НО, нижний с выхода LO между включениями одного и другого ключа выдерживается пауза 1,2мкс, благодаря чему предотвращается протекание сквозных токов через транзисторы. Бутстреповая емкость C5 заряжается через диод VD5 при включении нижнего ключа VT2. Первичная обмотка трансформатора Т1 подключена к делителю напряжения образованному конденсаторами C6,C7 и силовыми ключами VT1,VT2. Конденсаторы C8,C9, подключенные параллельно выпрямительным диодам VD6,VD7 значительно снижают амплитуду выбросов в моменты переключения диодов.

Конденсаторы C3,C5,C6,C7,C10 электролитические типа К50-35. Вместо диода VD5 подойдут любые другие на ток 30-40А и напряжение 40вольт, вместо VD6,VD7 желательно применить диоды Шотки типа КД2997 установленные на радиатор и рассчитанные на ток нагрузки оборудования.

В заключение необходимо отметить что, как правило, силовые IGBT транзисторы инвертора выбирают из условия тройного запаса по току по сравнению с номинальной величиной тока нагрузки. Это позволяет иметь высокие перегрузочные способности ИБП и ток короткого замыкания инвертора в пределах 150-200%. Термозащита силовых транзисторов реализуется с помощью сигнала с релейного датчика температуры (80-90 °С). Указанный сигнал поступает на центральный микроконтроллер (МК) платы управления. МК подсчитывает время, в течение которого транзисторы не выйдут из строя из-за перегрева, после чего выдает сигнал на отключение инвертора и переключение нагрузки на Байпас.

Если нагрузка продолжает оставаться в пределах 110-120% от номинальной, то по окончании просчета заданного времени охлаждения (2-4 мин.) МК выдает сигнал на повторное включение инвертора и т.д. При больших значениях перегрузки МК через определенное время выдаст сигнал переключения нагрузки на Байпас, и повторное включение инвертора будет возможно лишь после снятия перегрузки.

Затем МК просчитывает время охлаждения транзисторов, чтобы не дать возможности включения инвертора сразу после окончания первой перегрузки.

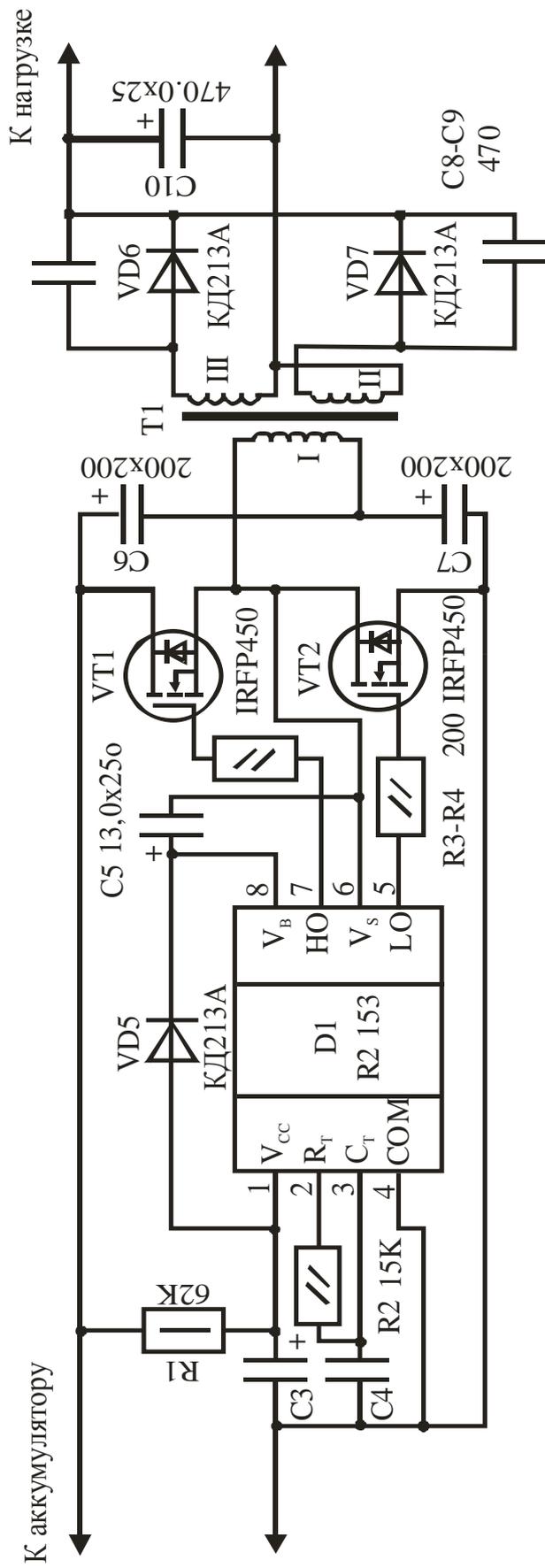


Рисунок 4.13 – Принципиальная схема дифференциального инвертора

4.2 Методика для измерения параметров панелей солнечной фотоэлектрической станции

Использовать солнечные элементы можно так же, как любой другой источник питания. Каждый из них предназначен для поддержания определенной силы тока при заданном напряжении. Тем не менее, в отличие от обычных источников питания выходные характеристики солнечного элемента зависят от количества падающего света. Например, набежавшее облако может снизить выходную мощность более чем на 50 %.

Более того, не все элементы выдают одинаковую мощность при одинаковых условиях освещенности, даже если элементы идентичны по размерам и конструкции. Отклонения в технологических режимах могут повлечь за собой заметный разброс выходных токов элементов одной партии. Эти факторы необходимо учитывать при разработке и изготовлении конструкций с солнечными элементами. Вольтамперные характеристики фотопанелей представлены на рисунке 4.14.

Следовательно, если желают обеспечить максимальную отдачу от фотоэлектрических преобразователей, необходимо проверить все элементы. Чтобы лучше понять, какие параметры подлежат проверке, сначала рассмотрим характеристики кремниевого солнечного элемента.

Всякий раз при работе с любым источником питания необходимо представлять себе, какова связь между собой напряжения и тока, а также зависимость их от нагрузки. В большинстве случаев взаимосвязь определяется законом Ома.

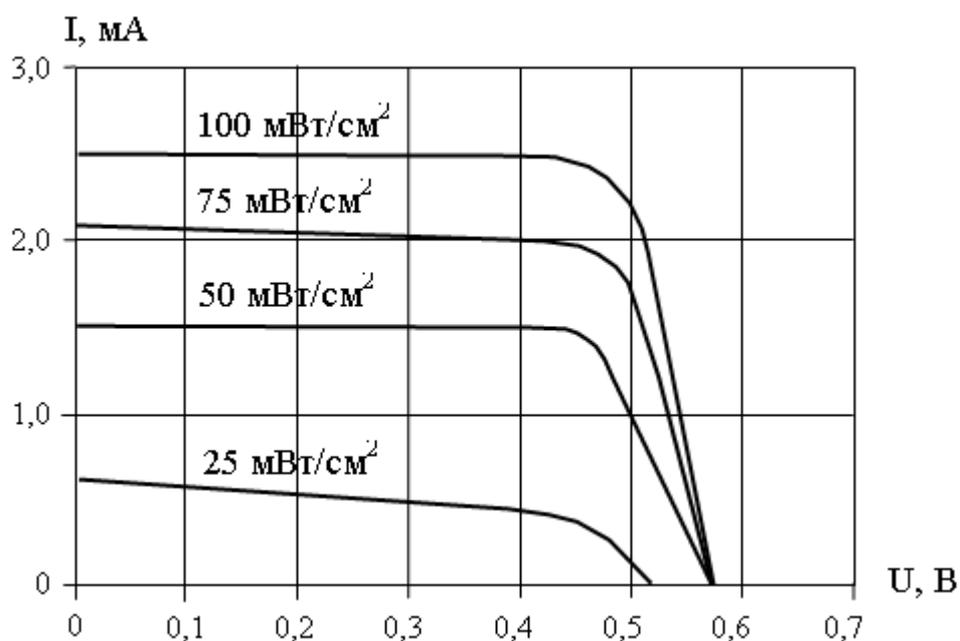


Рисунок 4.14 - Вольтамперная характеристика фотопанелей

При уменьшении сопротивления резистора элемент все более нагружается. Как и в случае обычной батарейки питания, это вызывает возрастание потребляемого тока. Одновременно выходное напряжение слегка падает, как это и должно произойти с нестабилизированным источником питания.

При этом фактически в цепи нет никакого тока и результирующее выходное напряжение можно считать равным напряжению холостого хода, представляющему собой напряжение, которое генерирует элемент, когда к нему не подключено никакой нагрузки. Схема для исследования характеристик фотопанелей представлена на рисунке 4.15.

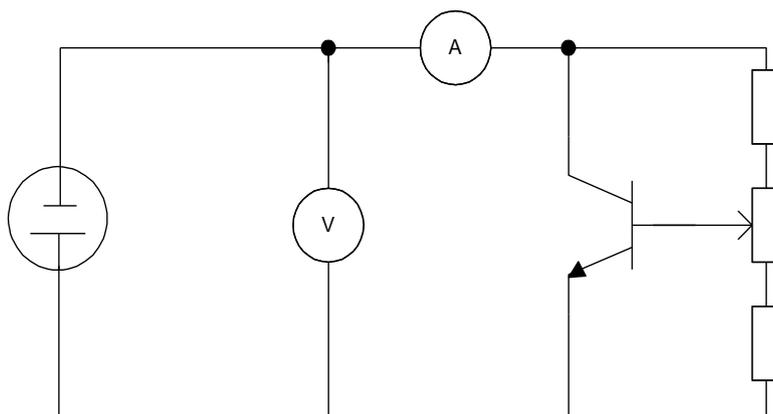


Рисунок 4.15 - Схема для исследования характеристик фотопанелей

Оно составляет около 600 мВ (0,6 В). Величина этого напряжения может слегка изменяться при переходе от одного элемента к другому в одной партии и от одной фирмы-изготовителя к другой.

При уменьшении сопротивления резистора элемент все более нагружается. Как и в случае обычной батарейки питания, это вызывает возрастание потребляемого тока. Одновременно выходное напряжение слегка падает, как это и должно произойти с нестабилизированным источником питания.

Затем достигается такое положение, когда с уменьшением сопротивления нагрузки выходной ток более не увеличивается. Ничто не может привести к увеличению тока даже короткое замыкание. На практике этот ток называют током короткого замыкания.

Напряжение будет постоянно уменьшаться пропорционально возрастанию нагрузки.

Как только сопротивление нагрузки станет равным нулю, напряжение упадет до нуля. Кстати, короткое замыкание фотоэлектрического преобразователя не приводит к выходу его из строя.

Сила тока, которую может развить элемент, зависит от интенсивности света.

Между этими двумя пределами при работе фотоэлектрического преобразователя в нагрузке выделяется мощность, причем пиковая мощность

выделяется лишь в одной точке. Именно в ней, совокупность всех факторов, обеспечивает отбор наибольшей энергии от солнечного элемента.

Семейство кривых тока полученное при эксперименте имеет одинаковую форму, что означает, наличие максимальной мощности при одном и том же напряжении независимо от яркости солнца.

Чтобы правильно оценить качество каждого используемого кремниевого солнечного элемента, необходимо нагрузить его так, чтобы выходное напряжение равнялось 0,45 В, а затем измерить выходную мощность. Этот метод эффективен не только для сравнения элементов между собой в одинаковых условиях, но и для оценки качества отдельного элемента.

Перемножив напряжение и ток, можно получить величину мощности.

Кроме того, энергия, вырабатываемая солнечным элементом, полностью рассеивается на потенциометре, обуславливая его нагрев и нестабильность.

Ток базы фактически изменяет сопротивление транзистора, которое в свою очередь используется в качестве нагрузки для солнечного элемента [100].

Принцип работы схемы следующий.

Регулятор сравнивает входное напряжение, поступающее от фотоэлектрического преобразователя, с опорным напряжением.

Диод D1, прямое смещение на котором задано резистором RI, определяет диапазон напряжений регулятора, ограничивая напряжение на регулировочном резисторе VRI «калибровка».

Опорное напряжение с движка этого потенциометра подается на неинвертирующий вход усилителя.

На инвертирующий вход усилителя через резистор R3 подается напряжение фотоэлектрического преобразователя. Резистором R4 задается величина коэффициента усиления операционного усилителя (в данном случае она составляет 100).

Благодаря своей особенности операционный усилитель пытается выровнять напряжение на своих инвертирующем и неинвертирующем входах, управляя током, текущим через шунтирующий регулировочный транзистор Q1.

Транзистор снижает входное напряжение до такой величины, что оно становится равным напряжению на отводе резистора VR1. Это напряжение может регулироваться в пределах 0—0,7 В.

Тем не менее, реально транзистор не может иметь нулевого сопротивления, которое требуется, чтобы снизить напряжение до нуля. При любых условиях, на транзисторе сохранится небольшое остаточное напряжение величиной около 150 мВ. Это ограничивает диапазон регулирования в пределах 0,15—0,7 В. Схема тестера показана на рисунке 4.16.

Для чистоты эксперимента берем две панели с одинаковыми характеристиками.

Контрольные приборы.

Техническая характеристика фотопанели:

габаритные размеры, мм

155x98x10

масса без (упаковки), кг

0,14

Электрические характеристики даны при облученности 1000 Вт/м² и температуре (25±10⁰С):

мощность, Вт, не менее

0,5

номинальное напряжение, В,

9,0

ток рабочий при номинальном напряжении, мА, не менее

56

Магазин сопротивлений: МСР – 60М

Измерение напряжения и тока на солнечном элементе осуществляется мультиметром DIGITAL MULTIMETR DT-9208A.

Мощность (в ваттах) определяется перемножением показаний обоих приборов.

На рисунке 4.17 и 4.18 показаны фотопанели для следящей и стационарной системы.

Результаты эксперимента занесены в таблицу в приложении 1

Следящая система снабжена окном для реверса. После захода солнца система отключается и переходит в ждущий режим.

Утром при первых лучах солнца (или при освещении рассеянным светом) окна для реверса (снабженного светодиодом) система включается, и делает разворот в сторону восходящего солнца, становится в исходное рабочее положение.

Для полученных экспериментальных данных U, I – зависимость $I=f(U)$ можно представить в виде уравнения $y=3.5e-0,05x^7$ и т.д. При этом имеется возможность по данной формуле вычислить ток фотопанели в любой точке на отрезке 72,8 – 12,4 при заданной U на любом отрезке от 1 – 12,6 В.

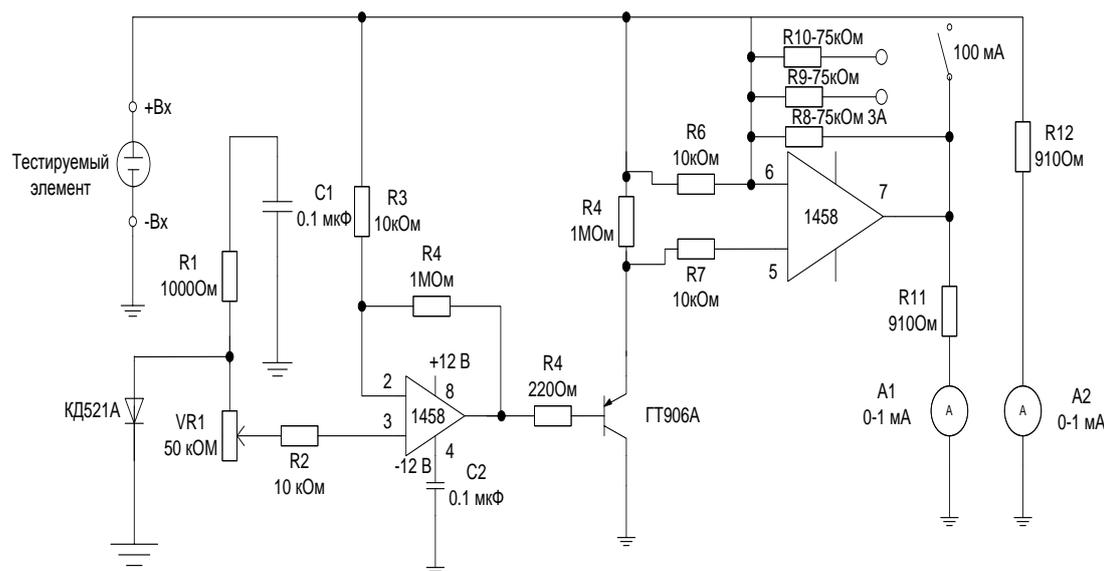


Рисунок 4.16 - Схема тестера для проверки характеристик фотопанели

Результаты измерений показаны в приложении А.

На рисунке 4.19 показано окно реверса для возвращения системы в исходное состояние.

На рисунке 4.20, и 4.21 показаны зависимости средне результирующие тока и мощности по времени. Эксперимент проходил в течение светового дня, с опытным образцом следящей системой СЭП, и неподвижной стационарной системой.

Максимальное значение тока по графику видно $I_{\text{ср.маx}} = 26 \text{ мА}$.

$$\Delta I = \frac{I_{\text{max}} - I_{\text{min}}}{2}$$
$$\Delta P = \frac{P_{\text{max}} - P_{\text{min}}}{2}$$



Рисунок 4.17 - Фото следящей системы

В целом если посмотреть затраты на изготовление нашего СЭП СФЭС , то стоимостные показатели будут следующие:

- a) СЭП СФЭС, модернизированный с СПС – 35000т.
- b) Датчик слежения с системой наведения – себестоимость 1500т.
- c) Драйвер электропривода постоянного тока – 4000т.
- d) Микроконтроллер – 35000т.

Общая стоимость 75500т, что гораздо дешевле идентичных зарубежных систем индийского производства (3500\$), на мощность 1 кВт.

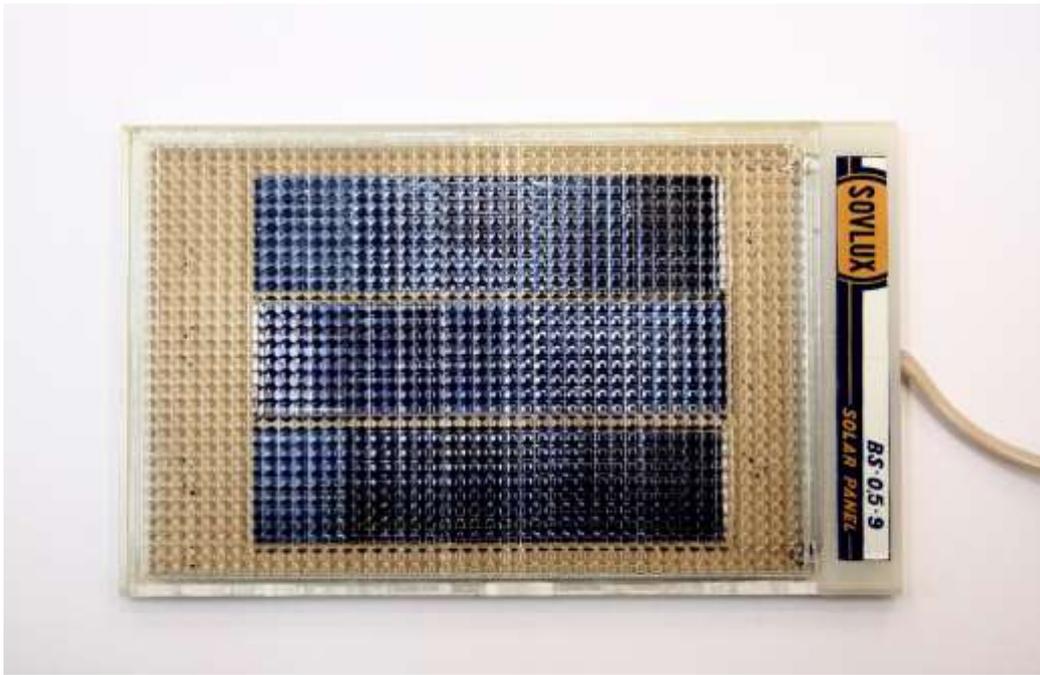


Рисунок 4.18 - Фото панели для следящей и стационарной системы



Рисунок 4.19 - Вид сзади, окно для реверса

Методом графического интегрирования среднее значения фототока по времени в течении светового дня определим $I_{ф.ср} = 15 \text{ мА}$.

$$\eta = \frac{I_{ф.мах} - I_{ф.ср}}{I_{ф.мах}} \cdot 100\% = \frac{26 - 15}{26} \cdot 100\% = 42\% .$$

Таким образом, в нашем случае получено КПД установки 42%. [101]

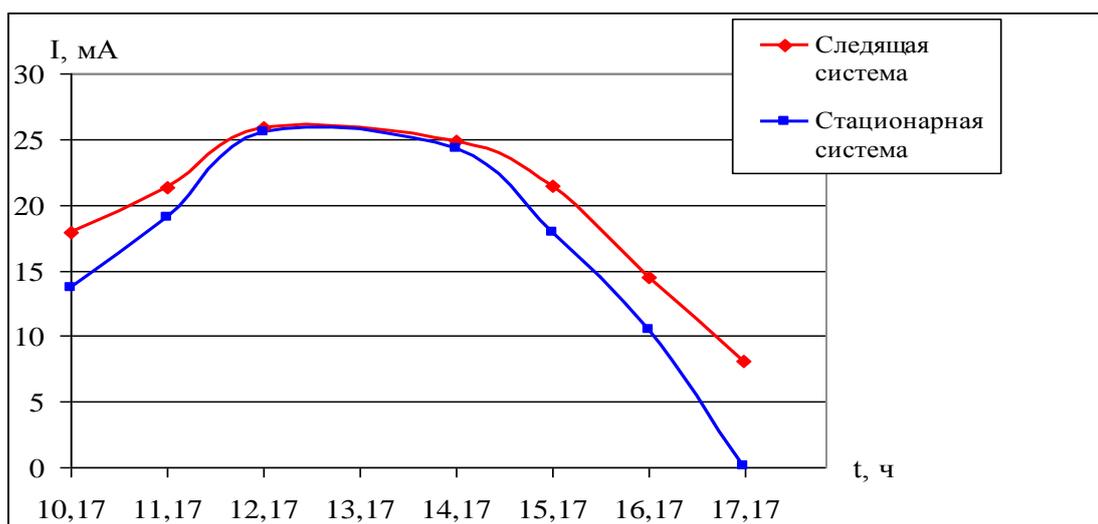


Рисунок 4.20 – График зависимости тока фотопанели от времени следящей и стационарной системы в течение светового дня

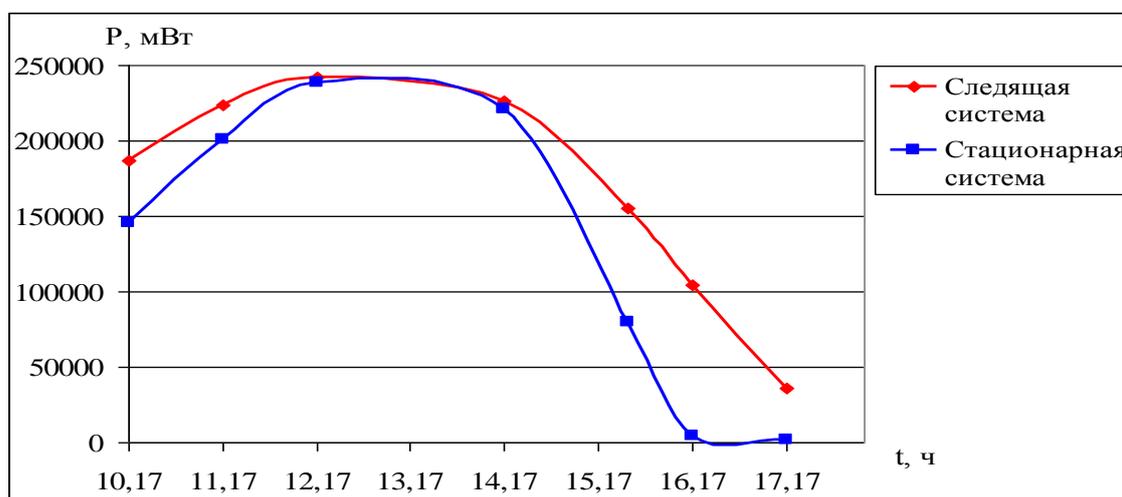


Рисунок 4.21 – График зависимости мощности вырабатываемой фотопанелями от времени следящей и стационарной системы в течение светового дня

Используя данное устройство мы можем с уверенностью сказать, что мощности его будет достаточно, чтобы запитать маломощную базовую станцию, к примеру М-200, или же ещё более меньшее по затратам энергии устройство для поддержания сотовой связи в отдалённых районах и сельской местности, такое как репитер GSM - VEGATEL VT-900E/1800-kit, которое используется для усиления сигнала, ближайшей для него базовой станции. Характеристики данных устройств приведены в Приложении В.

4.3 Выводы по разделу

Создана установка следящего электропривода СЭП, с датчиком слежения и системой наведения на Солнце;

Разработана и испытана система управления электропривода постоянного тока;

По итогам проведенных экспериментов КПД установки СФЭС за счёт СЭП был увеличен на 42%. Результаты данной работы можно применять для проектирования солнечных фотоэлектрических станций различной мощности.

Заключение

В данной диссертации разработана система управления следящего электропривода солнечных фотоэлектрических станций, разработана методика анализа энергетической эффективности СЭП СФЭС, расчета мощности СЭП СФЭС с учетом конкретных условий, направленная на улучшения энергетических показателей, повышения надежности и уровня автоматизации и снижения стоимости системы, а также произведена практическая разработка следящего электропривода СФЭС.

Краткий анализ солнечной радиации свидетельствует о больших энергетических ресурсах Казахстана и возможностях, которые могут быть использованы при решении практических задач развития (ВИЭ) возобновляемых источников энергии, в частности гелиотехники. Проведенные литературно-патентные исследования подтверждают необходимость разработки и создания СЭП для СФЭС.

Выполнены исследования по поиску оптимальных режимов управления СЭП с целью экономии электрической энергии и реализации максимального КПД СФЭС, в результате чего исследован пошаговый режим автосопровождения Солнца.

Предложены аналитические зависимости для определения потерь энергии и мощности в фотоприемнике СФЭС в результате перехода от непрерывного к пошаговому режиму автосопровождения Солнца.

Разработана методика определения оптимальной величины шага по критерию максимальной выходной мощности СФЭС и математические модели для одноконтурной и двухконтурной СЭП СФЭС.

Предложена система с переменной структурой СЭП, которая повышает качество и чувствительность системы управления к изменению её параметров. Данная система обеспечивает высокое быстродействие в отработке заданного угла поворота СЭП СФЭС за счет снижения времени ее переходных процессов.

Система с переменной структурой (СПС) СЭП СФЭС, уменьшает время переходных процессов, величину перерегулирования и число колебаний. В результате снижаются затраты энергии на компенсацию возмущающих воздействий, и режим работы привода становится энергосберегающим.

Результаты выполненной работы:

- создана установка следящего электропривода СЭП, с датчиком слежения и системой наведения на Солнце;
- разработана и испытана система управления электропривода постоянного тока;
- по итогам проведенных экспериментов КПД установки СФЭС за счёт СЭП был увеличен на 42%. Результаты данной работы можно применять для проектирования солнечных фотоэлектрических станций различной мощности и использовать, для поддержания удалённых от электросетей базовых станций и репитеров GSM.

Список сокращений

Определения, обозначения и сокращения

АД – асинхронный двигатель

АКБ – аккумуляторные батареи

БАУ – блок автоматического управления;

ВИЭ – возобновляемые источники энергии

Г – генератор;

ДПТ – двигатель постоянного тока

ДСР – датчик солнечной радиации;

ДВН – датчик ветровой нагрузки;

ЗС – звуковой сигнал;

ИД – исполнительный двигатель

КСЭ – концентратор солнечной энергии;

К – компрессор;

НЭ – накопитель энергии.

ОПУ – опорно-поворотное устройство

ПЧ – преобразователь частотный

ПРЭ – преобразователь распределитель;

ПИТО – приемник излучения с теплообменником и аккумулятором тепла;

ПУ – пусковое устройство турбосистемы;

РТ – рабочее тело газотурбинного цикла;

РРТС – регулятор режимов турбосистемы;

СЭП – следящий электропривод

СФЭС – солнечная фотоэлектрическая станция

СПС – система с переменной структурой

СГУ – солнечные гелиоустановки

СЭС – солнечные электростанции

СБ – солнечные батареи

СНС – система наведения на солнце

СЭУ – солнечная энергетическая установка

САС – система автоматического стопорения;

Т – турбина;

ТОН – теплообменник-накопитель;

ТОР – теплообменник-регулятор;

ФП – фотопанели

ФЭС – фотоэлектрическая схема;

ШИМ – широтно-импульсная модуляция

ЭМС – электромеханические системы

ЭМП – электромеханические преобразователи

ЭУ – электролизное устройство;

ЭУ – электролизное устройство.

Список литературы

1. Болотов А.В. Технология возобновляемой энергии. Потенциал перспективы освоения неисчерпаемых энергий и возобновляемых энергетических ресурсов. Энергетика, телекоммуникации и высшее образование в современных условиях: Труды 5-й МНТК – Алматы,-2006.- С.153-156.
2. Тлеуов А.Х., Тлеуов Т.Х.Использование нетрадиционных видов энергии в Казахстане. – Алматы,: Білім, - 1998. – 205 с.
3. Возобновляемые источники энергии и энергосбережения.: Коллектив авторов. под ред Н.Искакова.- Астана, - 2008.-354 с.
4. Дж. Твайделл, А. Уэйр., Возобновляемые источники энергии.-М.: Энергоатомиздат,- 1990. - 390 с.
5. Стребков Д.С. Роль солнечной энергии в энергетике будущего.// Гелиотехника, - 2005, - №1, - С. 12-23.
6. Сибикин Ю.Д., Сибикин М.Ю. Нетрадиционные возобновляемые источники энергии: учеб. пособие. – М.: ИП РадиоСофт, - 2008.-228 с.
7. Самойлов М.В. Основы энергосбережения: Учебное пособие. - Мн.: БГЭУ, - 2004. – 198 с.
8. Харченко Н.В. Индивидуальные солнечные установки – М.: Энергоатомиздат, 1991, - 208 с.
9. Ахметов Е. Электроэнергетика: проблемы и решения. // Эксперт Казахстан, - 2009.- №35-. [www/Эксперт Казахстан, kz/](http://www/Эксперт_Казахстан_kz/)
10. Стребков Д.С., Беленев А.Г., Муругов В.П. Использование энергии солнца.- М.: Нива России, - 1992.-48 с.
11. Овсянников Е.М. Электропривод энергетической гелиоустановки.: - Труды МЭИ, - 2000. - 54 с.
12. Овсянников Е.М. Электроприводы гелиоустановок наземного и космического базирования.: Теория и практика: автореф. докт.тех. наук.. – М.: МЭИ, -2003, - 40 с.
- 13.Овсянников Е.М Электропривод энергетической гелиоустановки//Привод и управление, - 2000, - №2.-С.4-9.
14. Климат Казахстана.: Под ред. Канд. геогр.наук А.С. Утешева: -. Справочник. Л.: Нива,1959.-450 с.
15. Савченко И.Г., Тарнижевский Б.В. Определение оптимального уровня концентрации солнечного излучения для фотобатарей при различных способах их охлаждения//Гелиотехника.- 1972. - № 4.- С 20-23.
16. Метеорология и климатология: учебник. - 4-е изд.перераб. и доп.-М.: Издательство МГУ, 1994.-253 с.
17. Сулеев Д.К, Сагитов С.И, Сагитов П.И., Жумагулов К.К. Экология и природопользование, - Алматы.: Ғылым, 2004.-392 с.
18. Гандин Л.С. Объективный анализ метеорологических полей.- Л.: Гидрометеиздат, 1967. – 390 с.

19. Цаценкин В.К. Безредукторный автоматизированный электропривод с вентильными двигателями.: – М.: МЭИ, 1991.-240 с.
20. Сорокин Г. А. Электроприводы энергетических гелиоустановок без концентрации излучения. автореф. канд. техн. наук.– М.: МЭИ.- 2005-23 с
- 21 Терехов В. М., Овсянников Е.М., Цаценкин В.К., Малоредукторный следящий электропривод для систем наведения, – М.: МЭИ, вып. 976.- 2000.- С.46-58.
22. М.Е. Гольц. А.Б. Гудзенко, В.М. Остеров и др. Быстродействующие электропривода постоянного тока с широтно-импульсным преобразователем.: – М.: Энергоатомиздат, 1986. - 184 с.
23. Овсянников Е.М., Особенности следящих электроприводов гелиоустановок.: Труды МЭИ, вып.400., - 1979.- С 79-85.
24. Андреев В.П, Сабинин Ю.А. Основы электропривода.: – Госкомиздат.. Л., 1963г. -722 с.
24. Ключев В.И. Теория электропривода: учеб.для вузов.– М.: Энергоатомиздат, 2001.-704 с.
25. Диаграмма изменения стоимости кремниевых элементов с течением времени. Сайт о солнечной энергетике.<http://solar-battery.narod.ru/img/grafik.gif>
26. Абдурахманов Б.М., Байдаков С.Г., Соловейчик В.И., Чирва В.П. Модули и элементы солнечных фотоэлектрических станций с концентрацией излучения.: // изд-во «ФАН», 1993,-200 с.
27. Андреев В.М., Грилихес В.А., Румянцев В.Д. Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения.:– Л., Наука, 1989.
28. Захидов Р.А. Зеркальные системы концентрации лучистой энергии.: // . ФАН, - 1975 №2-175 с.
29. Клычев Ш.И., Захидов Р.А., Ахмедов Х. Коэффициенты равномерного распределения солнечного излучения в составных концентраторах.:// Гелиотехника, 1997 , № 2, - С. 62 - 64.
30. Герметичные солнечные резервуары для производства электроэнергии// Colonnell Energie fiternative. - 1984 Vol.6, №28 - P.-103-113.
31. Саламов А.А., Гелиотермические электростанции в США.:–М.: Энергохозяйство за рубежом., 1987. №5-С 34-41.
32. Материалы о гелиотермических системах.Энергетический институт.://пер.ст. Mar R. W. из журнала Ea Solar Energy. - 1981., №5-Р.37-53.
33. Keller L. and Affolter P. Optimizing the Panel Area of a Photovoltaic System in Relation to Static Inverter Practical Results.// SE.-1995.- Vol. 55, № 1, P. 1-7.
34. Теплотехника и теплоэнергетика. Общие вопросы.:– Справочник ред. В.А.Григорьева и В.М. Зорина, – М.: Энергоатомиздат, 1987. - С. 397-399.
35. Использование солнечных печей. //из. журн. Solar Energy.- 1981. Vol.26, №5, P.377-390 с.

36. Гелиотермические станции. //журнал Polytechnisch tijdschrift electrotechniek// elektronica.1980. Vol. 35, №5, P. 296-302.
37. Баум В.А. Солнечные высокотемпературные печи. – М.: Изд. иностранной литературы, 1960.-470 с.
38. Захидов Р.А., Клычев Ш.И. К оценке характеристик концентраторов.// Гелиотехника, 1997.- С. 38 – 42.
39. Халыков А.М., Апариси Р.Р., Автоматизация управления оптической системы солнечной электростанции башенного типа.//Гелиотехника, 1977.- Вып.6,- С.64-68.
40. Солнечные и ветровые энергетические системы: //Пер. ст. из журнала.: –РЕМ: process Engineerino magazine. - 1983.Vol.23, P.3-4.
41. Телешов В.Г. Организация использования нетрадиционных источников энергии.: учебное пособие .- Чита.: ЧитГУ, 2004. - 97 с.
42. Жигарев А.А., Шамаев Г.Г. Электронно-лучевые и фотоэлектрические приборы.- М.: Высшая школа, 1982. - 463 с.
43. А. Амброзьяк. Конструкция и технология полупроводниковых фотоэлектрических приборов. –М.: изд. «Советское радио», 1970.- .270 с.
44. Чопра К., Дас С. Тонкопленочные солнечные элементы. : Пер. с англ. – изд.Мир, 1986.- 435 с.
45. Фотопреобразователь на основе кремниевых эпитаксиальных структур n-p⁺-типа.// Гелиотехника, 1985.№6.-С 12-17.
46. Овсянников Е.М., Особенности следящих электроприводов гелиоустановок.:- Труды МЭИ, вып.400., 1979. - С79-85.
- 47.Овсянников Е.М. Электропривод энергетической гелиоустановк.//Привод и управление, -2000.№2.-С.4-9
48. Овсянников Е.М., Датчики рассогласования для следящих электроприводов гелиоустановок.//Привод и управление,- 2001. №1.-С 13-17.
49. Овсянников Е.М., Агафонов М.С., Разработка фотоэлектрических датчиков рассогласования для электроприводов гелиоустановок,–М.:изд. МЭИ, 1997.-С.107-115.
50. Терехов В.М., Овсянников Е.М., Гулям Савар. Оптимизация режимов слежения по потерям электроэнергии в тихоходных следящих электроприводах.– Изд. МЭИ, 1995. - С.29-34.
51. Глазенко Т.А. Импульсные полупроводниковые усилители в электроприводах. – М.: Энергия, 1985.-188 с
52. Овсянников Е.М., Анализ эффективности типовых энергетических гелиоустановок.// Автономная энергетика, 2001.№12,-С .3-6.
53. Ильинский Н.Ф. Проблема повышения экономичности электроприводов и пути ее решения.:- Труды МЭИ, вып 570, 1982.
54. Панасюк В.И. Управление электроприводом оптимальное по потерям энергии и ее потреблению.– М.:изд.. Энергетика, 1982. - С 30-35.
55. Дубилович В.М., О влиянии перекрестного эффекта на динамические свойства автоматической системы управления гелиостатом.// Гелиотехника, 1986.№4. - С 44-47.

56. Панасюк В.И. Управление электроприводом оптимальное по потерям энергии и ее потреблению.– М.:, изд. Энергетика, 1982., №2. - С 30-35.
57. Энергосберегающие технические решения в электроприводах. – под ред. Н.Ф. Ильинского.-М.: МЭИ, 1985,- 64 с.
58. Терехов В.М., Алферов В.Г., Овсянников Е.М., Анализ способов компенсации люфтов в высокоточных следящих приводах, – М.: Труды МЭИ, вып.362, 1978.-С.48-56.
59. Следящие приводы.:Под ред. Чемоданова Б.К.–М.: Энергия.-1976-480 с.
60. Габдо М.Е., Автоматизированное проектирование приводов и динамических систем,– Челябинск: ЧГТУ, 1994.-111 с.
61. Ремшин Б.И., Ямпольский Б.С., Проектирование и наладка систем подчиненного регулирования электроприводов. – М.: Энергия, 1975.-184 с.
62. Ковчин С.А. Филатов В.Н., Хижин А.А.: Применение микропроцессорных систем управления в электроприводах постоянного тока.// Новые разработки в области конструирования РЭА. Л., Общество «Знание», 1988.- 24 с
63. Ермолин Н.П. Расчет коллекторных машин малой мощности: -Л.: Энергия, 1973.- 65 с.
64. Кацевич В.Л., Никольский А.А., Чулин В.И. Оптимизация переходных процессов в двигателе постоянного тока по минимуму нагрева.– Труды МЭИ, вып.308: , - 1977.- 74 с.
65. Ермолин Н.П. Электрические машины малой мощности: учебное пособие.-М.: Высшая школа,- 1967.- 190 с.
66. Казмиренко В.Ф., Лесков А.Г., Введенский В.А., Системы следящих приводов.: под ред. Казмиренко В.Ф.,–М.: Энергоатомиздат, 1973.-320 с.
67. Симоянц А.А, Шермазян Я.Е., Ватаян А.В., Опыт расчета следящего электропривода гелиоустановки.// Гелиотехника,-: Вып.1 1976.-С 73-81
68. Чиликин М.Г., Ключев В.И., Сандлер А.С., Теория автоматизированного электропривода. –М.: Энергия, 2000-616 с.
69. Ивоботенко Б.А., Ильинский Н.Ф., Копылов И.П., Планирование эксперимента в электромеханике, –М.: Энергия, 1975.-184 с.
70. Дараев А.М. Актаев Э. Т., Самсоненко А.И. Основные проблемы управления СЭП СФЭС. // Вестник АИЭС, - 2010. №2 ,-С. 24-28
71. Снаковский Е.А., Шаталов А.С., Шматок С.А., Громыко В.Д., Теория автоматического управления.–М.: Высшая школа, 1977-447 с.
72. Бесекерский В.А. Попов Е.П. Теория систем автоматического управления.–СПб, «Профессия», 2004.- 752 с.
73. Овсянников Е.М., Безлюфтовые опорно-поворотные устройства для гелиоустановок.,–М.: Тр. МЭИ, вып 677,- 2001.-С.51-54.
74. Андреев В.П., Сабинин Ю.А. Основы электропривода. –Госэнергоиздат. Л.,- 1963.,-772 с.
75. Ключев В.И. Теория электропривода: учебник для вузов.– М.: Энергоатомиздат, 2001,-704 с.

76. Дараев А.М. Цыба Ю.А. Оптимизация энергозатрат в электроприводе слежения СФЭС при переходе от непрерывного режима к пошаговому. // Вестник АИЭС., - 2009. №1 - С. 75-79
77. Дискретный электропривод с шаговыми двигателями.: под.ред. М.Г. Чиликина.,-М.: Энергия, 1971.-380 с.
78. Сагитов П.И, Цыба Ю.А, Дараев А.М. Влияние механических колебаний на мощность электропривода СФЭС.// Вестник ПГУ, - 2008. - №4.- С 22-24
79. Гарифулин К.К. Изменчивость ветра в свободной атмосфере.- Л.: Гидрометеиздат, 1967.- 320 с.
80. СНиП 2.01.07-85 Нагрузки и воздействия.- М.: Госстрой России, ГУП ЦПП.- 2003.
81. Басистов Г.Г., Коротков С.В., Мясников В.А, Теоретическое и экспериментальные исследования системы компенсации ветровых возмущений на антенну радиотелескопа.: –Л.: Наука, 1968.-С.61-72.
82. Дараев А.М. Сагитов П.И., Цыба Ю.А. Характер механических колебаний в электроприводе энергетических гелиоустановок. // Вестник АИЭС., - 2009 №2.-. С. 21- 24
83. Автоматическое моделирование солнечной установки // Galanti M.e a: Condizi onamentodell aria. - 1982. Vol.26, №3, - P.221-228.
84. Толстов Г.П. Ряды Фурье.:–М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1980.-384 с.
85. Дараев А.М Математическая модель следящего электропривода солнечной фотоэлектрической станции. // Вестник КазАТК , 2009. - №6 - С.154-157.
86. Дараев А.М. Применение математической модели для исследования следящей системы СФЭС.// Труды международной конференции «Наука и образование – ведущий фактор стратегии Казахстан-2030» 24-26 июня 2010. КарГТУ. - С.138-140.
87. Дараев А.М. Актаев Э. Т.,Самсоненко А.И. Математическая модель двухконтурной следящей системы электропривода солнечной фотоэлектрической станции.// Вестник КазНТУ, 2010. №1 - С.26-28
88. Дараев А.М. Самсоненко А.И. Модель двухконтурной следящей системы электропривода солнечной фотоэлектрической станции. // Всероссийская научно-техническая конференция «Электроэнергия: от получения до эффективного использования» 25-28 мая - 2010. ТПУ г.Томск
89. Емельянов С.В. Система автоматизированного управления с переменной структурой.: –М.:изд.Наука, 1967. - 320 с.
90. Дьяконов В.П.: Справочник по применению системы РС МАТЛАВ.–М.: Фиматлит, 1993.-260 с.
91. Потемкин В.Г. Система МАТЛАВ.: Справочное пособие,–М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 1997.-281 с.
92. Сагитов П.И. Цыба Ю.А.,Дараев А.М.,Шадхин Ю.И.,Актаев Э.Т.

Оптимизация системы управления следящего электропривода гелиоустановки.
// Вестник КазАТК, 2009. №6 - С .139-142

93. Дараев А.М. Повышение качества управления следящих систем гелиоустановок. // Труды 9-й международной научно-практической конференции «Современные энергетические комплексы и управление ими» 21 июня - 2010. ЮРГТУ ,г.Новочеркасск. Россия.

94. Раушенбах Г. Справочник по проектированию солнечных батарей.: пер. с англ. под ред. проф. М.М. Колтуна.–М.: Энергоатомиздат, 1983.-360 с.

95. Фотоэлектрические солнечные модули. Сайт компании ТОО « ND&Co».

<http://www.solar-ct.com/partners/ndco>

96. Солнечная энергетическая установка.//Solar System.kz/
<http://www.solarsystems.kz/>

97. Цыба Ю.А., Дараев А.М., Актаев Э.Т. Системы наведения в современных солнечных фотоэлектрических станциях. // Вестник Автоматизации, 2009. - №2, - С.7-10.

98. Беляев Н.И., Нагорский В.Д., Выбор двигателя и редуктора следящих систем.,–М.: Машиностроение, 1972.-240 с.

99. Готлиб И.М. Источники питания. Инверторы.:–М.: изд. Энергия, 2000.-190 с.

100. Байерс Т. 20 конструкций с солнечными элементами.— М.: Мир, 1988. - 197 с.

101. Дараев А.М., Алфёров А.Н. Системы слежения за солнцем для гелиоэнергетики. // Вестник КазНТУ, 2013. -№6, С.245-248.

102. Дараев А.М., Алфёров А.Н. Исследование потерь энергии фотопреобразователя солнечной фотоэлектрической станции. // Вестник КазНТУ, 2013. -№6, С.257-260.