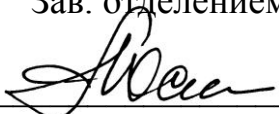


Министерство образования и науки российской федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
**«ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ  
И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ» (ТУСУР)**

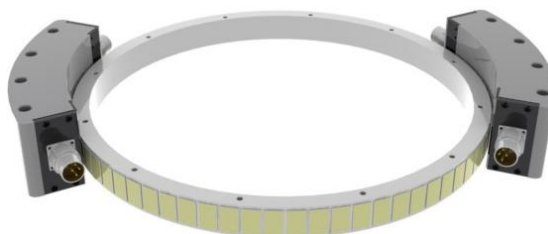
Утверждаю  
Зав. отделением каф. ЮНЕСКО

 Ю.М. Осипов

" \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2012 г.

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ  
ДВИЖЕНИЯ**

Методические указания к лабораторным занятиям  
по дисциплине **«Методика проектирования электромехатронных систем  
движения»** для магистрантов 6 курса, обучающихся по направлению 221000.68  
"Мехатроника и робототехника" по магистерской программе "Проектирование  
и исследование мультикоординатных электромехатронных систем движения"



Томск 2012

УДК 621.396.6.671.7

Проектирование электромехатронных систем движения: методические указания к лабораторным занятиям по дисциплине «Методика проектирования электромехатронных систем движения» для магистрантов 6 курса, обучающихся по направлению 221000.68 "Мехатроника и робототехника" по магистерской программе "Проектирование и исследование мультикоординатных электромехатронных систем движения". – Томск: Изд-во ТУСУР, 2012. – 47 с.

Методические указания рассмотрены и рекомендованы к изданию методическим семинаром отделения кафедры ЮНЕСКО  
«27» марта 2012 г.

Составитель к.т.н., доц.



С.В. Щербинин

Зав. кафедрой ОКЮ  
доктор техн. наук,  
доктор экон. наук  
профессор



Ю.М. Осипов

*Рецензент*

Кандидат технических наук,  
доцент кафедры МИГ ЮТИ ТПУ  
*И.Ф. Боровиков*

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1

## РАЗРАБОТКА КОНСТРУКТОРСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ СЕГМЕНТНЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАТРОННЫХ МОДУЛЕЙ ДВИЖЕНИЯ АВТОНОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ С СОЛНЕЧНЫМИ БАТАРЕЯМИ

### 1.1. Цель и задачи работы

Цель работы состоит в теоретическом обосновании, разработке конструкции и технологии сборки, сегментных электромехатронных модулей движения (СЭМД) большого диаметра для оригинального двухкоординатного электромеханизма с безредукторным электроприводами.

Основные задачи.

1. Разработать конструкторскую документацию СЭМД большого диаметра, обеспечивающего:

- малые скорости углового перемещения, порядка  $0,17 \div 0,5$  град/мин;
- значительных колебаний момента от ветровой нагрузки, так как размеры солнечных батарей, порядка  $1600 \times 1600$  мм и более.

2. Разработать технологию сборки СЭМД большого диаметра для обеспечения максимального вращающего момента.

Наиболее существенные результаты, содержащие научную новизну, состоят в следующем.

1. Мехатронная технология встраивания безредукторных электроприводов на базе сегментных электродвигателей большого диаметра, обеспечивающих повышенный момент вращения, в двухкоординатный электромеханизм манипулирования солнечной батареи (СБ) относительно положения Солнца по азимуту и углу места (разработана подсистема автоматизации проектирования СЭМД для САПР SolidWorks).

2. Способ обеспечения максимального вращающего момента безредукторных электроприводов согласованием положения индукторов электромагнитной системы СЭМД друг относительно друга (получен патент РФ № 2353044).

### 1.2. Теоретическая часть

Как показывают исследования научно-технической и патентной литературы разработчики постоянно совершенствуют элементы и методы преобразования солнечной энергии в электрическую, конструкции СБ и устройств рационального их расположения и ориентации по отношению к Солнцу. Состояние исследований и разработок устройств манипулирования СБ, приведенный список использованных в исследовании источников [1-6], в которых описаны редукторные электроприводы устройств манипулирования СБ, позволяет сказать, что предлагаемый проект с безредукторным электроприводом манипулирования СБ обладает новизной и промышленной полезностью. Технические решения автономной электростанции с ориентированными СБ, разработанные в проекте, патентоспособные и впоследствии будут патентоваться.

**Конструкторская разработка двухкоординатного электромеханизма ориентации СБ.**

Ориентация СБ относительно положения Солнца по азимуту и углу места осуществляется с помощью двухкоординатного электромеханизма на основе СЭМД.

Особенности перемещения СБ:

- 1) малые скорости углового перемещения, порядка  $0,17 \div 0,5$  град/мин.

Рациональнее выполнять безредукторным электроприводом на основе СЭМД большого диаметра с управлением от электронного «редуктора», обеспечивающего скорости вращения от «ползучей» до 360 град/сек;

2) значительные колебания момента от ветровой нагрузки, так как размеры СБ, порядка 1600 x 1600 мм и более.

Переменный момент сопротивления безредукторный электропривод на основе СЭМД большого диаметра обеспечивает не хуже, чем электропривод с механическим редуктором. Значительный момент обеспечивается большим диаметром электромагнитной системы (движущий момент электродвигателя – электромагнитное тяговое усилие в воздушном зазоре, умноженное на радиус ротора);

3) энергопотребление электроприводов от СБ должно быть минимальным, чтобы максимальная доля выработанной электроэнергии передавалась внешним потребителям, это возможно за счет применения старт-стопного управления безредукторными электроприводами на основе СЭМД большого диаметра

Рисунок двухкоординатного электромеханизма представлен в Приложении 1.

**Конструкторская разработка сегментного электромагнетронного модуля движения.** СЭМД представляет собой дуговые сегментные индукторы с трехфазной обмоткой, соединенные подвижно посредством втулки с шарикоподшипниками с круговым ротором, выполненным из магнитомягкого материала с постоянными магнитами, оси, намагниченности которых ориентированы перпендикулярно круговым поверхностям ротора, а направления намагниченности чередуются. На роторе смонтирована лента магнитного датчика положения, корпус которого закреплен неподвижно на индукторе. Сборочный чертеж СЭМД представлен в Приложении 2.

На основе СЭМД возможно [7]:

1) создание многокоординатных систем, позволяющих совершать сложные пространственные манипуляции инструментом или изделием, в нашем случае СБ;

2) получение высоких технико-эксплуатационно-экономических характеристик (ТЭЭХ): модульность и компактность конструкции, малые веса; точность и повторяемость перемещений; надежность из-за отсутствия редукторов; стоимость изготовления и покупки комплектующих.

**Методика расчета магнитной проницаемости зазора электро-магнитной системы СЭМД.** Одной из наиболее сложных задач при проектировании электроприводов прямого действия и анализе их работы является определение магнитной проводимости зазора между статором и ротором при их различных взаимных положениях. Зависимость магнитной проводимости от взаимного смещения статор-ротор определяет усилие в двигателях [8].

Разработана методика расчета, включающая универсальный алгоритм и программное обеспечение для энергоактивного и энергопассивного вариантов дуговых магнитопроводов позволяющая проектировать оптимальные конфигурации электромагнитной системы. Для электропривода прямого действия разработка оптимальной электромагнитной системы имеет особо важное значение из-за отсутствия редукторов, а следовательно повышенным требованиям к точности отработки управляющих сигналов и силовомоментным характеристикам.

Рассмотрим конфигурацию магнитной системы СЭМД с энергопассивным дуговым магнитопроводом (рис. 1.), состоящую из реактивного дугового ротора 1 и дугового индуктора 2 (в целях упрощения показаны прямолинейными).

Входными параметрами для расчета магнитной проводимости воздушного зазора такой системы являются [8, 9]:

$\delta$  – величина воздушного зазора статор-ротор;

$l$  – период электромагнитной системы;

$h$  – относительная ширина впадины гребенчатой поверхности дугового ротора;

$b$  – относительная величина впадины гребенчатой поверхности дугового индуктора;

$\xi$  – относительное смещение ротор-статор (на рис.1.  $\xi=0$ , т.е. полюс индуктора находится строго напротив полюса ротора).

В случае энергопассивного ротора, при значениях  $b$  и  $h$ , лежащих в определенном диапазоне, можно пренебречь потоками рассеяния и считать, что магнитный поток  $\Phi$  замыкается по пути, указанному на рис.1 стрелкой.

Примем магнитный потенциал  $\psi$  на поверхности индуктора равным 0, а на поверхности ротора  $\psi_0 = 0.8F\delta$ . Введем безразмерную функцию  $U = \psi/\psi_0$ , тогда  $U_{\text{индуктора}} = 0$ ,  $U_{\text{ротора}} = 1$ . Если обозначить  $l$  – период электромагнитной системы, то имеем:

$$U(x, y, z + l) = U(x, y, z), \quad (1.1)$$

а также:

$$\frac{dU}{dz}(x, y, z) = \frac{dU}{dz}(x, y, z + l). \quad (1.2)$$

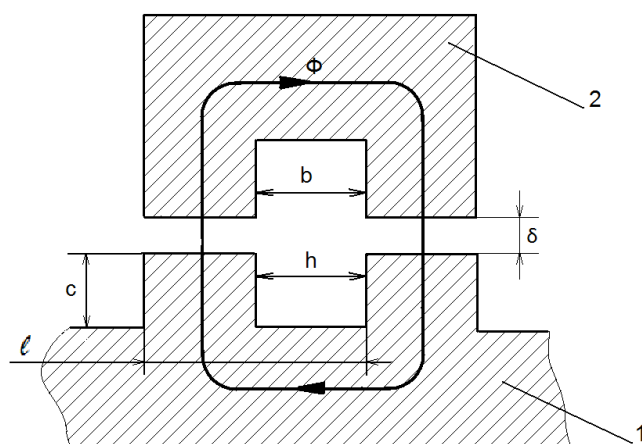


Рис. 1.1. Конфигурация магнитной системы СЭМД с энергопассивным магнитопроводом и путь замыкания магнитного потока.

Рассмотрим плоскую задачу изменения проводимости на единицу ширины полюса. Плоские потенциальные поля описываются уравнением Лапласа:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = 0. \quad (1.3)$$

Энергия магнитного поля:

$$E = \frac{1}{2} \cdot \mu_0 \int_V H^2 dV \quad (1.4)$$

где  $\mu_0$  – магнитная проницаемость воздушного зазора;  $H$  – напряженность магнитного поля;  $V$  – объем воздушного зазора.

Удельная энергия магнитного поля на единицу ширины полюса:

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \cdot \mu_0 \cdot \Psi^2 \iint \left[ \left( \frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial U}{\partial z} \right)^2 \right] dx dz \quad (1.5)$$

Удельная магнитная проводимость, приведенная к  $\mu_0$ :

$$G = \frac{2 \cdot \varepsilon}{\mu_0 \Psi_0^2} = \iint \left[ \left( \frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial U}{\partial z} \right)^2 \right] dx dz \quad (1.6)$$

Истинная функция поля  $U$  есть именно та функция, которая дает минимум функционала  $G$ . Эта задача решается вариационными методами. Для прямоугольных областей воздушного зазора гребенчатой системы задача выбора истинной функции  $U$  (задача Дирихле) решена методом разделения переменных состояния [8-10]. В результате этого было получено выражение для удельной магнитной проводимости:

$$G = \frac{1}{\delta + \frac{16 \cdot h^2}{\pi^2} \cdot \frac{2 \cdot T_{22} + \frac{2}{9} \cdot T_{11} - \frac{4}{3} \cdot T_{12} + F_{22} + \frac{1}{9} \cdot F_{11} - \frac{2}{3} \cdot F_{12} + \frac{28}{9} \cdot \pi}{(3 \cdot \pi + 2 \cdot T_{22} + F_{22}) \cdot (\pi + 2 \cdot T_{11} + F_{11}) - (2 \cdot T_{12} + F_{12})^2}}, \quad (1.7)$$

где

$$T_{m1m2} = \sum_k \frac{1}{\pi} \cdot k \cdot \text{cth}(2 \cdot \pi \cdot k \cdot \delta) \cdot \sigma_k^{m1} \cdot \sigma_k^{m2}; \quad (1.8)$$

$$F_{m1m2} = \sum_k \frac{2 \cdot k}{\pi \cdot \text{sh}(2 \cdot \pi \cdot k \cdot \delta)} \cdot \cos\left(2 \cdot \pi \cdot k \cdot \left(\frac{h-b}{2} - \xi\right)\right) \cdot \sigma_k^{m1} \cdot \sigma_k^{m2} \quad (1.9)$$

$$\sigma_k^m = \frac{4 \cdot (2 \cdot m - 1) \cdot \cos(\pi \cdot k \cdot h)}{h \cdot \left(4 \cdot k^2 - \left(\frac{2 \cdot m - 1}{h}\right)^2\right)} \quad (1.10)$$

Введем дополнительные обозначения:

$$S_{11} = \pi + 2 \cdot T_{11} + F_{11}; \quad (1.11)$$

$$S_{22} = 3 \cdot \pi + 2 \cdot T_{22} + F_{22}; \quad (1.12)$$

$$S_{12} = 2 \cdot T_{12} + F_{12}; \quad (1.13)$$

$$f = S_{22} + \frac{1}{9} \cdot S_{11} - \frac{2}{3} \cdot S_{12}; \quad (1.14)$$

$$g = S_{22} \cdot S_{11} - S_{12}^2. \quad (1.15)$$

С учетом введенных обозначений выражение для скорости изменения магнитной проводимости будет иметь вид:

$$\frac{dG}{d\xi} = -G^2 \frac{\frac{df}{d\xi} \cdot g - \frac{dg}{d\xi} \cdot f}{g^2} \cdot \frac{16 \cdot h^2}{\pi^2}, \quad (1.16)$$

где

$$\frac{df}{d\xi} = \frac{dS_{12}}{d\xi} - \frac{1}{9} \cdot \frac{dS_{11}}{d\xi} - \frac{2}{3} \cdot \frac{dS_{12}}{d\xi}, \quad (1.17)$$

$$\frac{dg}{d\xi} = \frac{dS_{22}}{d\xi} \cdot S_{11} + \frac{dS_{11}}{d\xi} \cdot S_{22} - 2 \cdot \frac{dS_{12}}{d\xi} \cdot S_{12}. \quad (1.18)$$

На основе приведенных выше математических выражений составлен алгоритм вычисления  $G$  и  $\frac{\partial G}{\partial \xi}$ . Данный алгоритм позволяет производить расчет вышеуказанных параметров электромагнитной системы при различных значениях  $h$ ,  $b$  и  $\delta$  для СЭМД с энергопассивным ротором как с воздушным зазором статор-ротор, так и с зазором «диамагнетик-воздух-диамагнетик», который имеет место при использовании в конструкции СЭМД направляющих скольжения.

Описанный выше алгоритм является универсальным для расчета магнитной системы как с энергопассивным, так и с энергоактивным ротором. Расчет параметров  $G$  и  $\frac{\partial G}{\partial \xi}$  электромагнитной системы СЭМД с энергоактивным ротором также производится на основании выполнения вышеуказанного алгоритма, однако усложняется необходимостью учета намагниченности ротора и потоков рассеяния, неизменно возникающих в такой магнитной системе.

На рис. 2 представлена конфигурация магнитной системы СЭМД с энергоактивным дуговым магнитопроводом состоящая из дугового ротора 1 с наклеенными на него постоянными магнитами 3 и дугового индуктора 2 (в целях упрощения показаны прямолинейными).

При такой конфигурации магнитный потенциал на поверхности дугового ротора больше нуля и зависит от величины магнитной индукции постоянных магнитов, т.е. ротор энергоактивен. Полезный магнитный поток  $\Phi$  показан черной стрелкой на рис. 2, а пути замыкания потоков рассеяния  $\Phi_{s1}$  и  $\Phi_{s2}$  – серыми стрелками. Величина потока рассеяния изменяется в зависимости от геометрических параметров магнитопровода ( $b$ ,  $h$ ,  $c$ ,  $\delta$ ) и применяемых в конструкции материалов.

На рис. 3. изображены графики, полученные в результате выполнения алгоритмов. Кривая 1 показывает скорость изменения магнитной проводимости воздушного зазора и зазора «диамагнетик-воздух-диамагнетик» магнитной системы в зависимости от смещения статор-ротор для энергоактивного ротора, а кривая 2 – для энергопассивного при условии, что  $b=h=0.5$ .

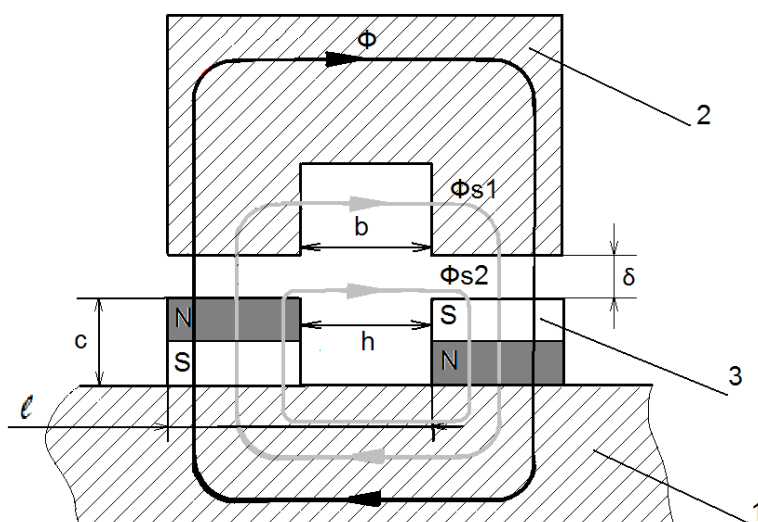


Рис.1.2. – Конфигурация магнитной системы ДЭМД с энергоактивным магнитопроводом и пути замыкания магнитного потока.

Полученные алгоритмы реализованы на языке высокого уровня *VisualDelphi*. Интерпретация результатов расчета производится в графическом виде. Высокая

наглядность дает возможность осуществлять сравнительный анализ характеристик и проводить параметрическую оптимизацию электромагнитной системы СЭМД с целью проектирования рациональных конфигураций электромагнитных систем СЭМД.

Методика выставки сегментных индукторов относительно магнитопроводов двухиндукторной системы (ДС) [11, 12]. Техничко-эксплуатационные показатели функционирования двухиндукторной системы СЭМД в значительной мере зависят от качества согласования электромагнитной системы сегментных индукторных электродвигателей. Рассогласованность электромагнитной системы приводит, прежде всего, к снижению полезного момента, КПД и точности позиционирования.

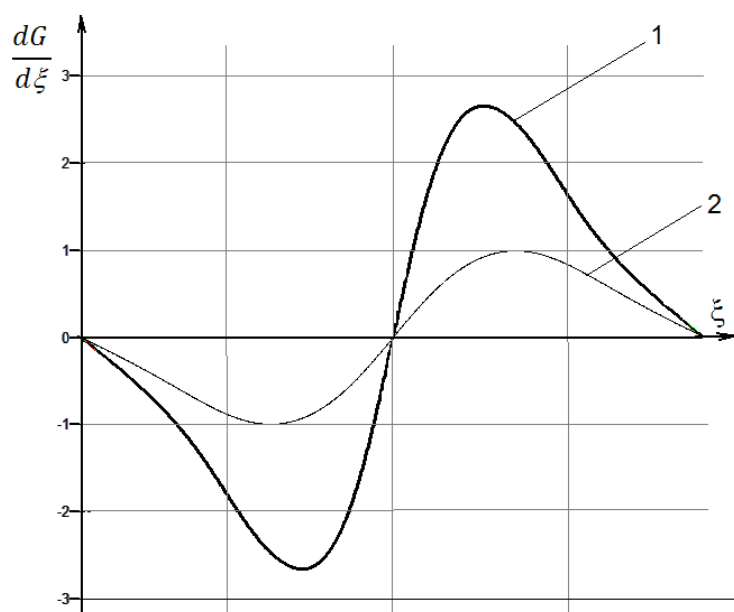


Рис. 1.3. Скорость изменения магнитной проводимости воздушного зазора магнитной системы.

Электромагнитное согласование ДС в соответствии с предложенной методикой выполняется по схеме, представленной на рис. 4 и включает следующие шаги.

1. Индуктор 1 устанавливают в посадочное место на основании 2 и фиксируют неподвижно относительно него при помощи крепежных винтов.

2. Индуктор 3 закрепляют на основании 2 подвижно таким образом, чтобы обеспечить возможность свободного перемещения его в круговом направлении относительно оси  $X$  на величину  $\pm\Delta = T_M/2$ . Для этого крепежные отверстия, при помощи которых осуществляется крепление индуктора 3 на неподвижном основании выполняют дугообразными.

3. Производят предварительное фиксирование индуктора 3 на основании 2 в среднем положении, симметрично относительно индуктора 1, путем затяжки крепежных винтов.

4. Устанавливают на место штатный круговой ротор 4 в шарикоподшипниковую втулку.

5. После установки ротора ослабляют винты крепления индуктора 3 до тех пор, пока не будет обеспечено его свободное перемещение относительно основания 2 в круговом направлении. После ослабления винтов, под действием сил притяжения постоянных магнитов индуктор должен вплотную прижаться к ротору.

6. Обмотки индукторов 2 и 3 соединяют последовательно и подключают выводы обмоток к соответствующим клеммам формирователя трехфазного синусоидального



напряжения СУ. На управляющем ПК запускают программу "Согласование электромагнитной системы ДС".

7. В главном окне программы (рис. 5) в поле "Установка связи с СУ" задают номер СОМ-порта, к которому подключена система управления и нажимают кнопку "Установить связь с СУ". При этом программой будут произведены соответствующие настройки связи с СУ. После того, как эта операция завершится, включают питание СУ.

8. В поле "Делительный диаметр ДС" главного окна программы производят выбор делительного диаметра согласуемой двухиндукторной системы. При необходимости смены выбранного значения делительного диаметра, например при ошибочном вводе или в случае необходимости согласования ДС с другим делительным диаметром, нажимают кнопку "Сброс значений" и затем производят выбор нужного диаметра из выпадающего списка.

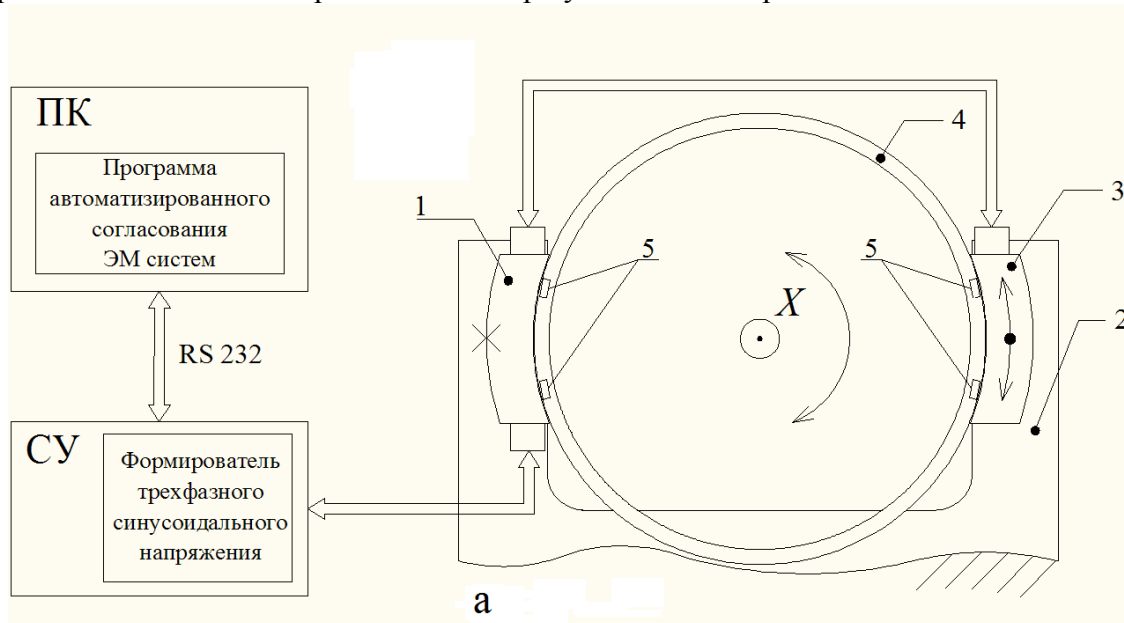


Рис. 4. Схема электромагнитного согласования ДС

9. Для выполнения согласования электромагнитной системы ДС в автоматическом режиме нажимают кнопку "Выполнить согласование" при этом производится подача питания в обмотки СЭМД, выполняется перемещение кругового ротора по заданному алгоритму. После завершения согласования выдается сообщение "Согласование завершено успешно". При этом обесточивания обмоток не происходит, ДС находится в зафиксированном состоянии. В случае возникновения каких-либо неполадок в процессе выполнения алгоритма согласования, выдается сообщение об ошибке. Для того чтобы выяснить на каком этапе возникает ошибка имеется возможность перехода в ручной режим управления ДС. Для этого необходимо нажать кнопку "Ручной режим". При этом в главном окне программы отобразятся два дополнительных поля. Поле "Отправленные" предназначено для ввода команд и последующей их отправки на СУ, поле "Полученные" предназначено для отображения ответных команд СУ.

10. Производят механическую фиксацию индуктора 3 на неподвижном основании 2 путем полной затяжки крепежных винтов. После этого отключают СУ, обесточивают обмотки СЭМД.

11. Включают питание СУ, и в главном окне программы нажимают кнопку "Зафиксировать" при этом производится настройка параметров время токовой защиты СЭМД, устанавливается максимально допустимый ток и производится подача питания в обмотки СЭМД. При этом под действием электромагнитных сил магнитные полюса кругового ротора 4 согласуются с магнитными полюсами индукторов 1, 3.

12. Производят механическую фиксацию подвижного индуктора 3 относительно основания 2. В главном окне программы нажимают кнопку "Расфиксировать", при этом приостанавливается подача питания в обмотки СЭМД, затем выключают СУ.

Блок-схема алгоритма программы автоматического электромагнитного согласования ДС представлена Приложении 3.

Предложенная методика упрощает технологию электромагнитного согласования двухиндукторных систем на основе СЭМД в процессе сборки за счет исключения кондукторов, оправок и высокоточного метрологического оборудования, повышает производительность труда за счет автоматизации процесса согласования, а также улучшает точность сборки. Таким образом, в случае применения предложенной методики удастся добиться высоких технико-эксплуатационных характеристик ДС на основе СЭМД не прибегая к технически сложным способам согласования электромагнитных систем.

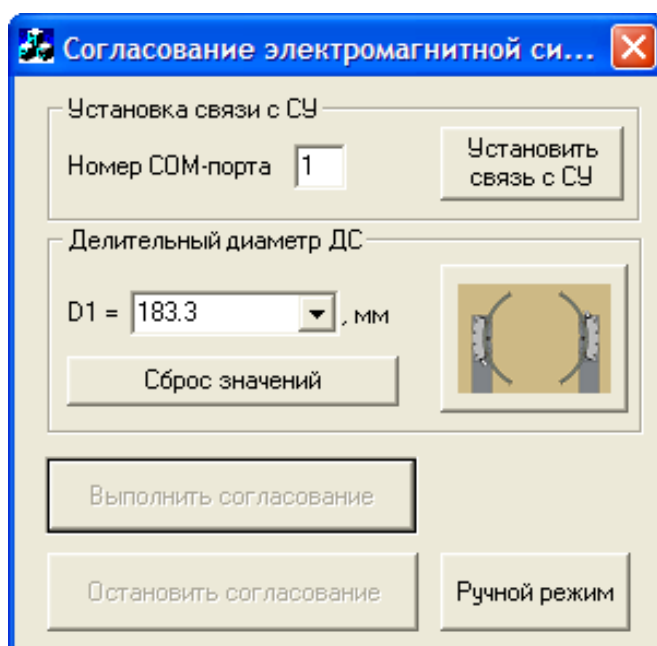


Рис. 1.5. Внешний вид главного окна программы электромагнитного согласования ДС на основе СЭМД

### Список использованных источников

1. Аббасов Э.М. Универсальный электропривод гелиоустановок. МГТУ «МАМИ» [Электронный ресурс] Режим доступа: [www.mami.ru/.../article/s03/s03\\_01.pdf](http://www.mami.ru/.../article/s03/s03_01.pdf).
2. Автономные системы электроснабжения [Электронный ресурс] Режим доступа: [www.solarhome.ru/ru/autonom](http://www.solarhome.ru/ru/autonom).
3. Овсянников Е.М. Электроприводы гелиоустановок наземного и космического базирования. Теория и практика. Дисс. на соискание ученой степени доктора технических наук. М., 2003г.
4. Солнечные батареи. [Электронный ресурс] Режим доступа: [http://www.manbw.ru/analytics/solar\\_power\\_stations\\_details.html](http://www.manbw.ru/analytics/solar_power_stations_details.html).
5. Солнечная электроэнергетика. [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.u380.ru/energy/sun>.
6. Солнечные электростанции на фотоэлементах. [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://manbw.ru/solar.html>
7. Осипов Ю.М. Операционные автоматы с электроприводом прямого действия. – Томск, ИПФ ТПУ, 1997. – 200 с.

8. Свечарник Д.В. Электрические машины непосредственного привода: безредукторный электропривод. – М.: Энергоатомиздат, 1998.

9. Медведев, Д.А. Расчет магнитной проводимости зазоров энергопассивного и энергоактивномагнитопроводов / Инновационные технологии управления. Электромехатроника: сб. науч. тр.; под ред. проф. Ю.М. Осипова. – Томск, Изд-во Томск.гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники. – 2009. – вып.1. – 142 с.– С.113-117.

10. Медведев Д. А. Программа расчета магнитной проводимости воздушного зазора дугового электромехатронного модуля движения / Электронные средства и системы управления. Итоги реализации программы развития электроники и IT-технологий в Томской области. – Томск. – 2009. – С.128-131.

11. Патент 2 353 044 РФ, МПК H02K15/00. Способ согласования электромагнитных систем и систем с постоянными магнитами / Ю.М. Осипов (РФ). – № 2 005 104 032 / 11; заявл. 16.02.2005; опубл. 20.04.2009, Бюл. № 11. – 1 с.

12. Медведев Д.А. Многокоординатный манипулятор на основе линейных и дуговых электромехатронных модулей движения / Автореф. дис. на соиск. степ.к.т.н. по спец. 05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления. – Томск, 2009.

## Приложения

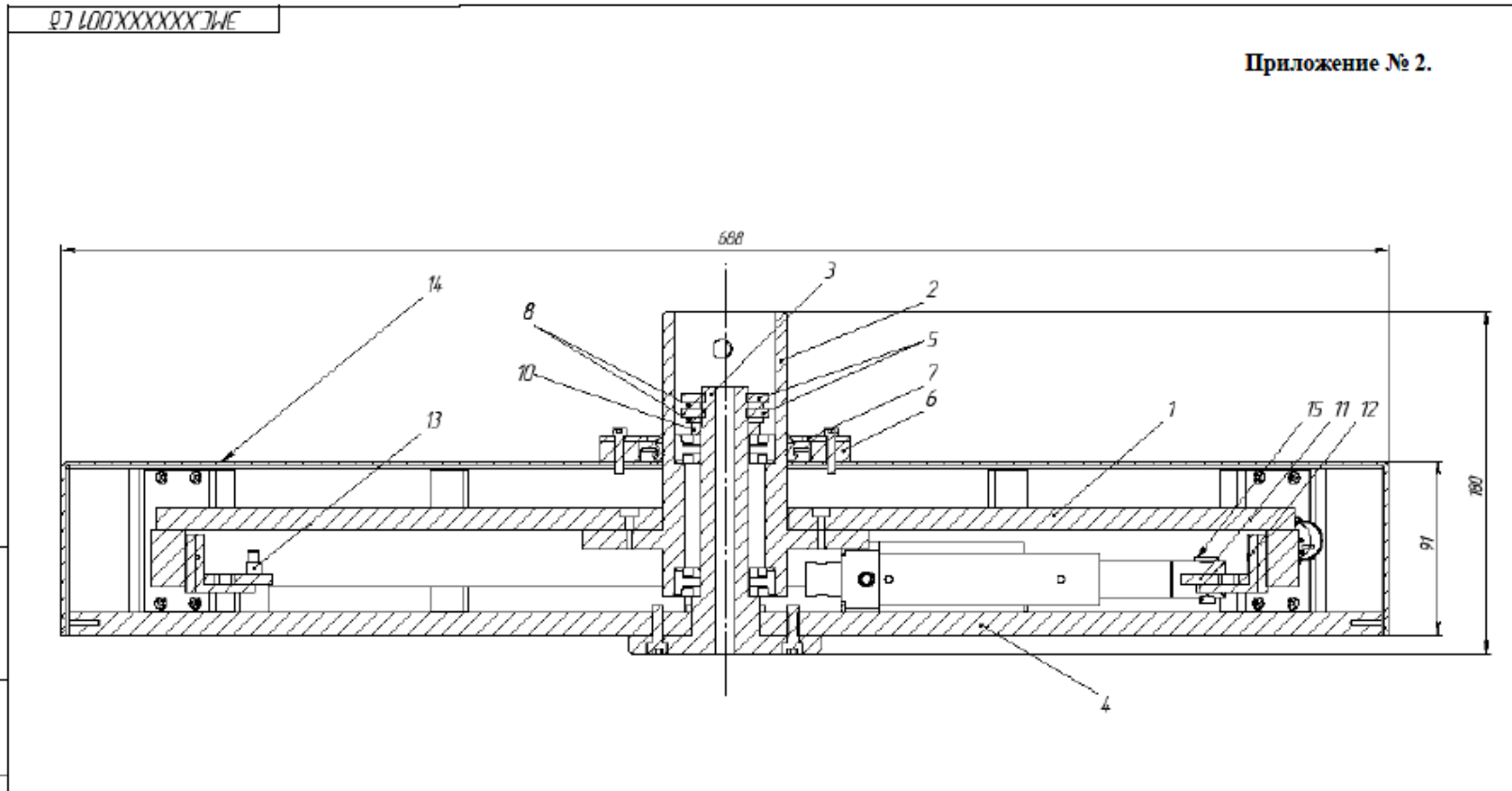
**Приложение № 1** Двухкоординатное поворотное устройство автономной электростанции с ориентированными солнечными батареями

**Приложение № 2** Сборочный чертеж СЭМД

**Приложение № 3** Блок-схема алгоритма программы автоматического электромагнитного согласования ДС



Рис.П1. Двухкоординатное поворотное устройство автономной электростанции с ориентированными солнечными батареями



Размеры для справок

Изд. № подл. Изменения и дата. Выпущено под №. Изд. № эскиза. Изменения и дата.

					ЭМС.ХХХХХХ.001 СБ		
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	<b>Привод безредукторный</b>		Лист
Разработ.		Медведев					Масса
Изобр.		Осипов					Насштаб
Т. контро.							1:2
Н. контро.							Лист 1
Экз.		Осипов					Листов 2
					ООО "Электроэнергетические системы"		

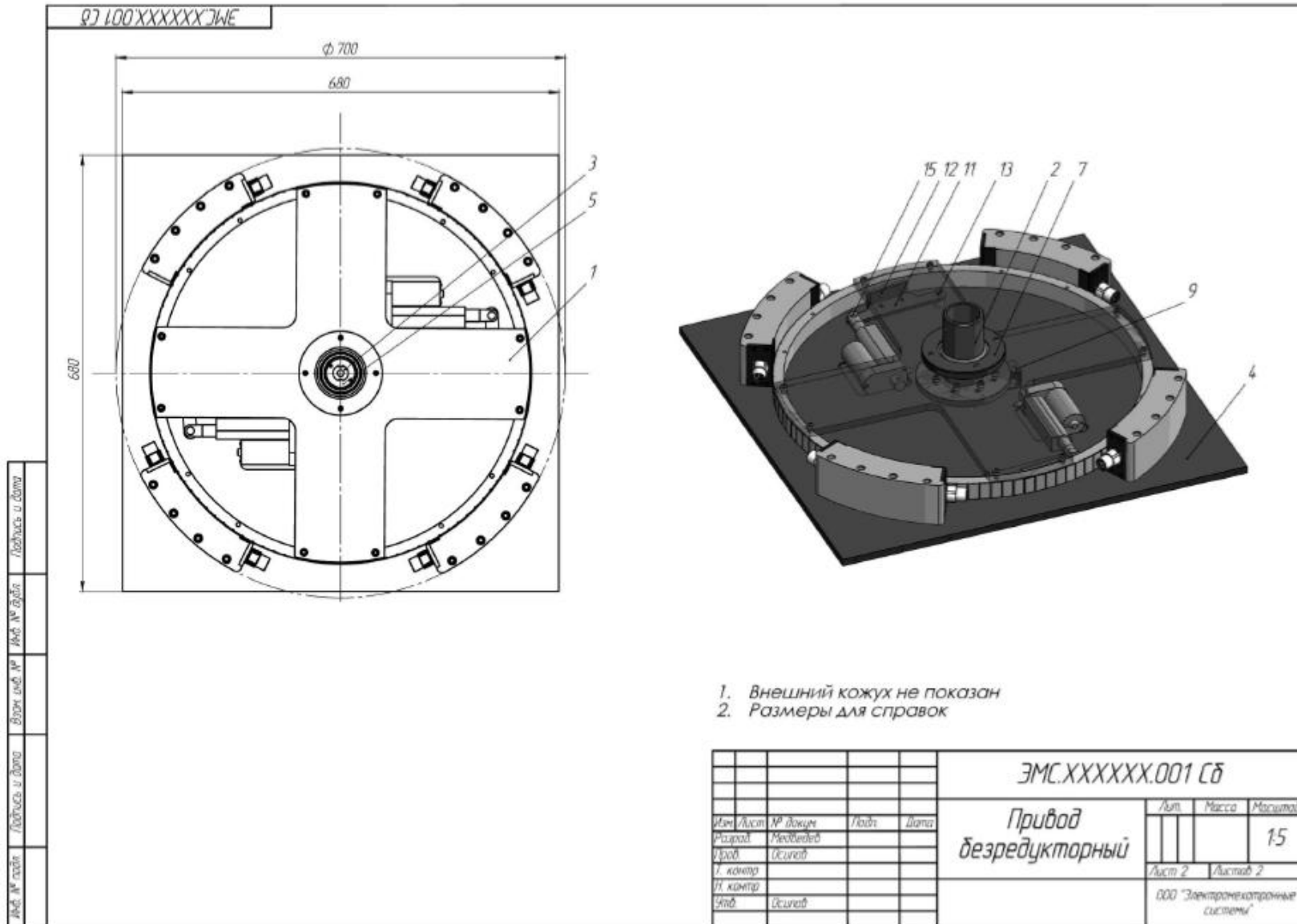


Рис. П2.

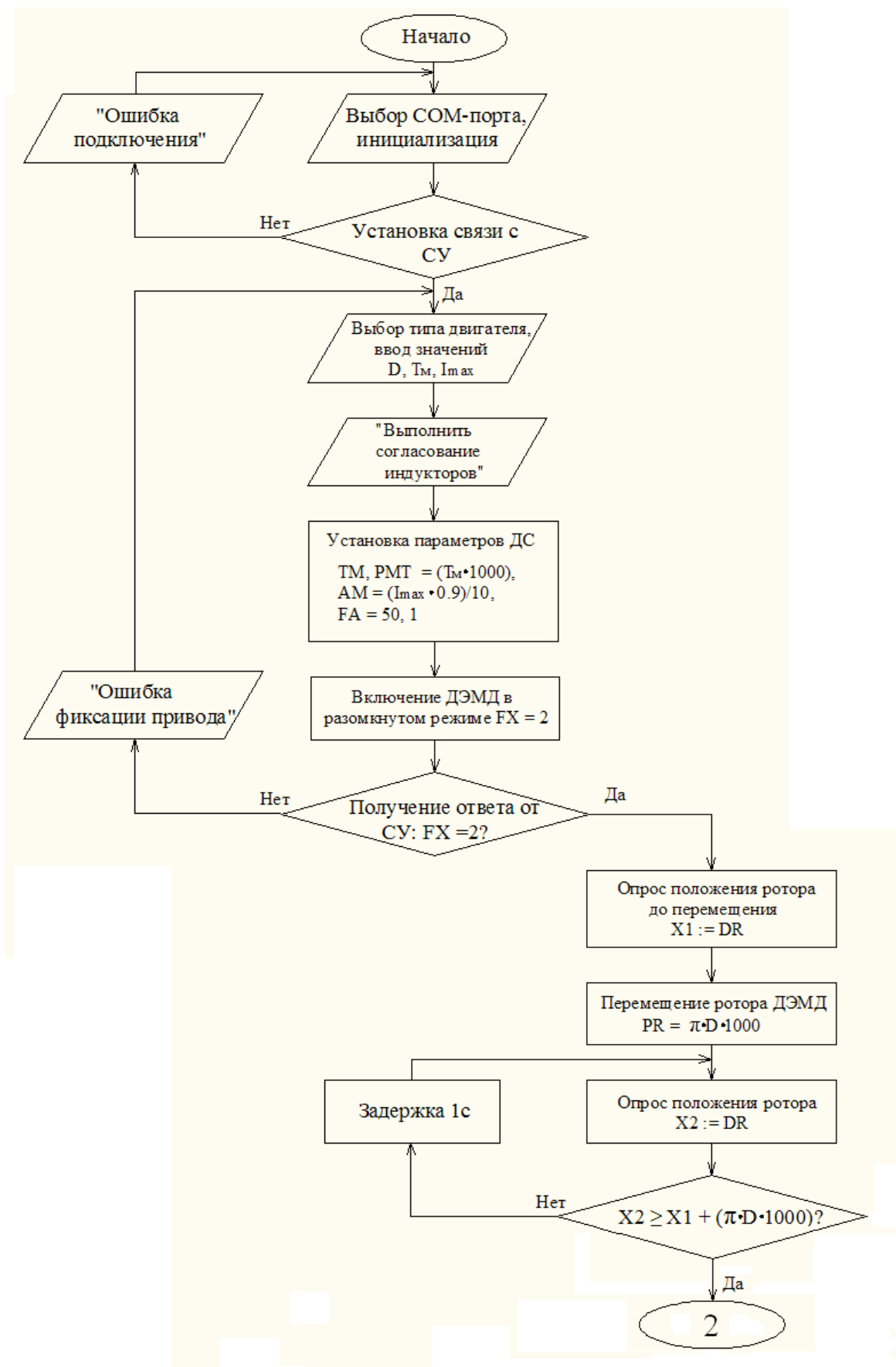


Рис. П3а. Блок-схема алгоритма программы автоматического электромагнитного согласования ДС (начало)

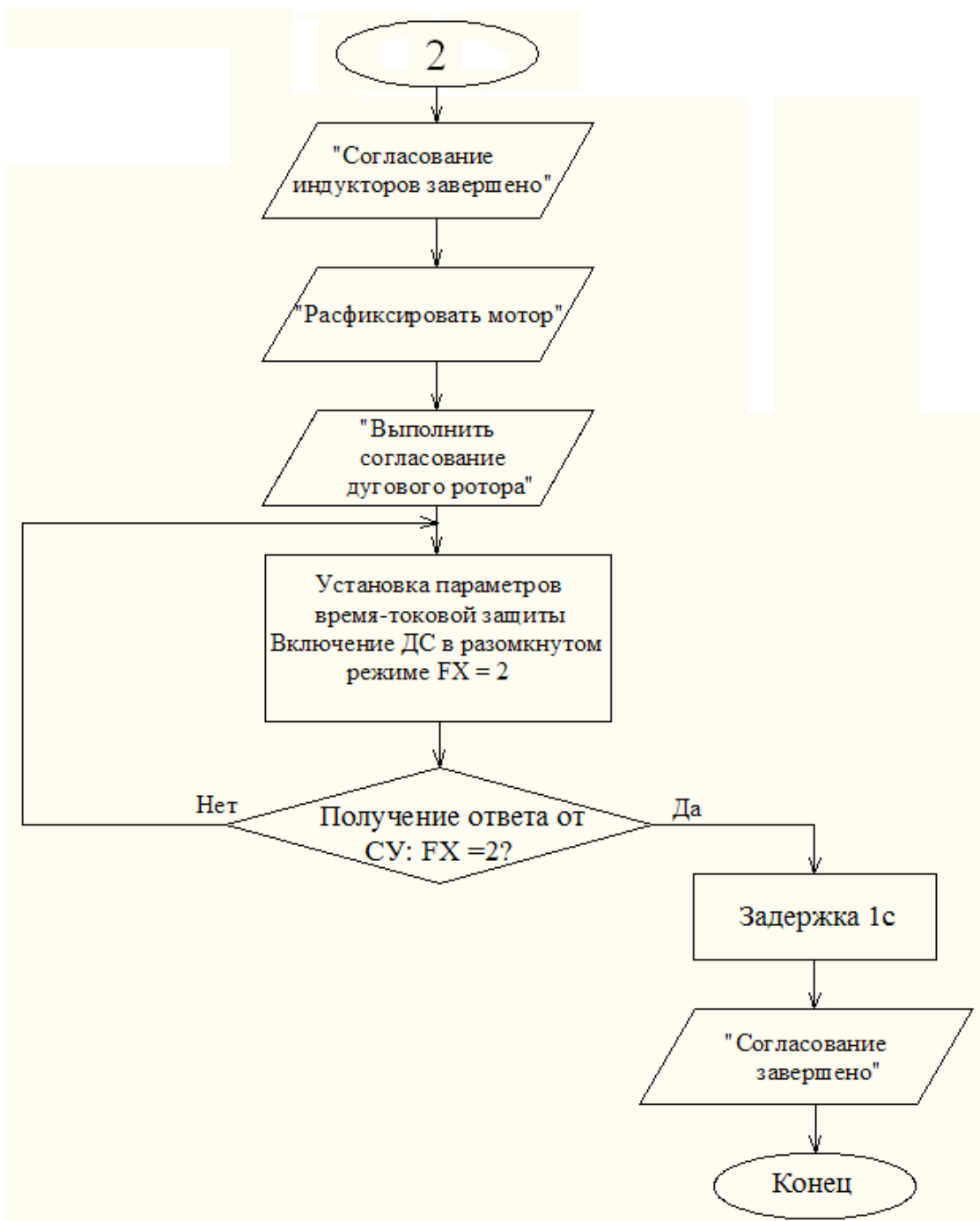


Рис. ПЗб. Блок-схема алгоритма программы автоматического электромагнитного согласования ДС (окончание)



## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2**

### **РАЗРАБОТКА КОНСТРУКТОРСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ ПОВОРОТНОГО УСТРОЙСТВА АВТОНОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ С СОЛНЕЧНЫМИ БАТАРЕЯМИ**

#### **2.1. Цель и задачи работы**

Цель лабораторной работы "Разработка конструкторской документации поворотного устройства АЭ СБ" состоит в проведении проектных расчетов и разработке конструкторской документации поворотного устройства для двухкоординатного электромеханизма с безредукторными электроприводами.

Основные задачи на промежуточном этапе № 1.2.

1. Разработать конструкторскую документацию на поворотное устройство.
2. Рассчитать детали и узлы и, в целом, поворотное устройство на прочность.
3. Провести патентные исследования.

#### **2.2. Задание**

Основанием для проектирования поворотного устройства АЭ СБ является техническое задание, согласно которому, оно должно иметь следующие технико-эксплуатационно-экономические (ТЭЭХ) характеристики:

- угол поворота вокруг вертикальной оси, град – от 0 до 360;
- угол поворота вокруг горизонтальной оси, град – от 0 до 90;
- комплектация солнечными батареями (СБ) – 2-мя, 4-мя или 6-ю;
- размеры СБ, мм – 800×1600;
- вес СБ, кг – 30;
- вес АЭ СБ, в зависимости от комплектации, кг – 181,5; 211,5; 241,5;
- работоспособность до скорости ветра, м/с - до 30.

При разработке конструкторской документации пройдены следующие стадии [1].

Техническое предложение – совокупность конструкторских документов, которые должны содержать обоснования ТЭЭХ изделия на основании анализа технического задания и сравнительной оценки различных вариантов АЭ СБ и его компонентов с учетом конструктивных и эксплуатационных особенностей и патентных исследований [2].

При разработке технического предложения были проведены следующие работы:

- а) выявлены варианты возможных решений, установлены особенности вариантов (принципов действия, размещения функциональных составных частей и т. п.), их конструкторская проработка. Глубина проработки достаточна для сравнительной оценки рассматриваемых вариантов;
- б) проверка вариантов на патентную чистоту и конкурентоспособность;

в) проверка соответствия вариантов требованиям техники безопасности и производственной санитарии;

г) сравнительная оценка рассматриваемых вариантов. Сравнение проводилось по показателям качества изделия, например, надежности, экономическим, эстетическим, эргономическим. Сопоставление вариантов проводилось также по показателям технологичности (ориентировочной удельной трудоемкости изготовления, ориентировочной удельной материалоемкости и др.), стандартизации и унификации. При этом учитывались конструктивные и эксплуатационные особенности разрабатываемого и комплектующих изделий, тенденции и перспективы развития отечественной и зарубежной техники в данной области, вопросы метрологического обеспечения разрабатываемого изделия (возможности выбора методов и средств измерения).

д) выбор оптимального варианта изделия, обоснование выбора; установление требований к изделию (технических характеристик, показателей качества и др.) и к последующей стадии разработки изделия (необходимые работы, варианты возможных решений, которые следует рассмотреть на последующей стадии и др.).

### **2.3. Теоретическая часть**

Техническое предложение после согласования и утверждения в установленном порядке является основанием для разработки эскизного (технического) проекта.

Эскизный проект – совокупность конструкторских документов, которые должны содержать принципиальные конструктивные решения, дающие общее представление о назначении, об устройстве, принципе работы и габаритных размерах разрабатываемого изделия, а также данные, определяющие назначение, основные параметры и габаритные размеры разрабатываемого изделия. Эскизный проект после согласования и утверждения в установленном порядке служит основанием для разработки технического проекта или рабочей конструкторской документации [3].

Технический проект – совокупность конструкторских документов, которые должны содержать окончательные технические решения, дающие полное представление об устройстве разрабатываемого изделия, и исходные данные для разработки рабочей документации [4].

Основой для разработки конструкторской документации поворотного устройства АЭ СБ явилась электронная модель изделия (рис. 1), созданная в соответствии с требованиями ГОСТ 2.052-2006. Она содержит полный набор конструкторских, технологических и физических параметров согласно ГОСТ 2.109 необходимых для выполнения расчетов, математического моделирования, разработки технологических процессов и др. [5]. Полнота и подробность модели на различных стадиях разработки соответствуют требованиям стандартов ЕСКД.

Электронный конструкторский документ, выполненный в виде модели, соответствует следующим основным требованиям: атрибуты (модели), обозначения и указания, приведенные в модели, необходимы и достаточны для указанной цели выпуска (например, изготовления изделия или построения чертежа в бумажной и или электронной форме); все значения размеров должны получаться из модели; определенные в модели связанные геометрические элементы, атрибуты, обозначения и указания согласованы; атрибуты, обозначения и указания, определенные и/или заданные в модели и изображенные на чертеже, согласованы; если в модели не содержатся все конструкторские данные изделия, то это должно быть указано; не допускается давать ссылки на нормативные документы, определяющие форму и размеры конструктивных элементов (отверстия, фаски, канавки и т.п.), если в них нет геометрического описания этих элементов. Все данные для их изготовления должны быть приведены в модели; разрядность при округлении значений линейных и угловых размеров должна быть задана.

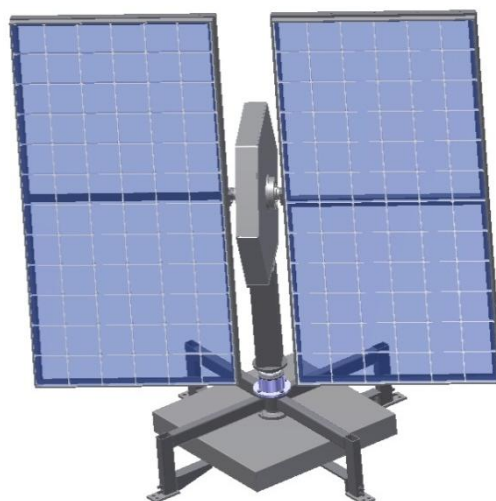


Рис. 2.1. Визуализация электронной модели поворотного устройства АЭ СБ

Электронная модель поворотного устройства АЭ СБ состоит из пяти основных сборочных единиц (рис. 2): верхнего СЭМД; нижнего СЭМД; стойки, с помощью которой СЭМД крепится к опоре; опоры, которая крепится к фундаменту и удерживает все остальные элементы конструкции; двух СБ, которые крепятся на сварной раме (первая комплектация).

Кроме электронной модели изделия создана электронная структура изделия (ЭСИ) в соответствии с ГОСТ 2.053-2006 (рис. 3). Содержательная часть ЭСИ определяет состав сборочной единицы, связи его составных частей и другие данные, которые могут быть связаны (ассоциированы) с изделием или его сборочного чертежа и выполняется в виде набора данных, представляющих совокупность информационного обеспечения [6].

При разработке конструкции выполнены расчеты отдельных элементов конструкции на прочность и работоспособность, как методом конечных элементов, так и аналитическими выражениями, при действии на элементы

конструкции двух главных сил – ветровой нагрузки и сил тяжести элементов и конструкции в целом.

нагрузки и сил тяжести

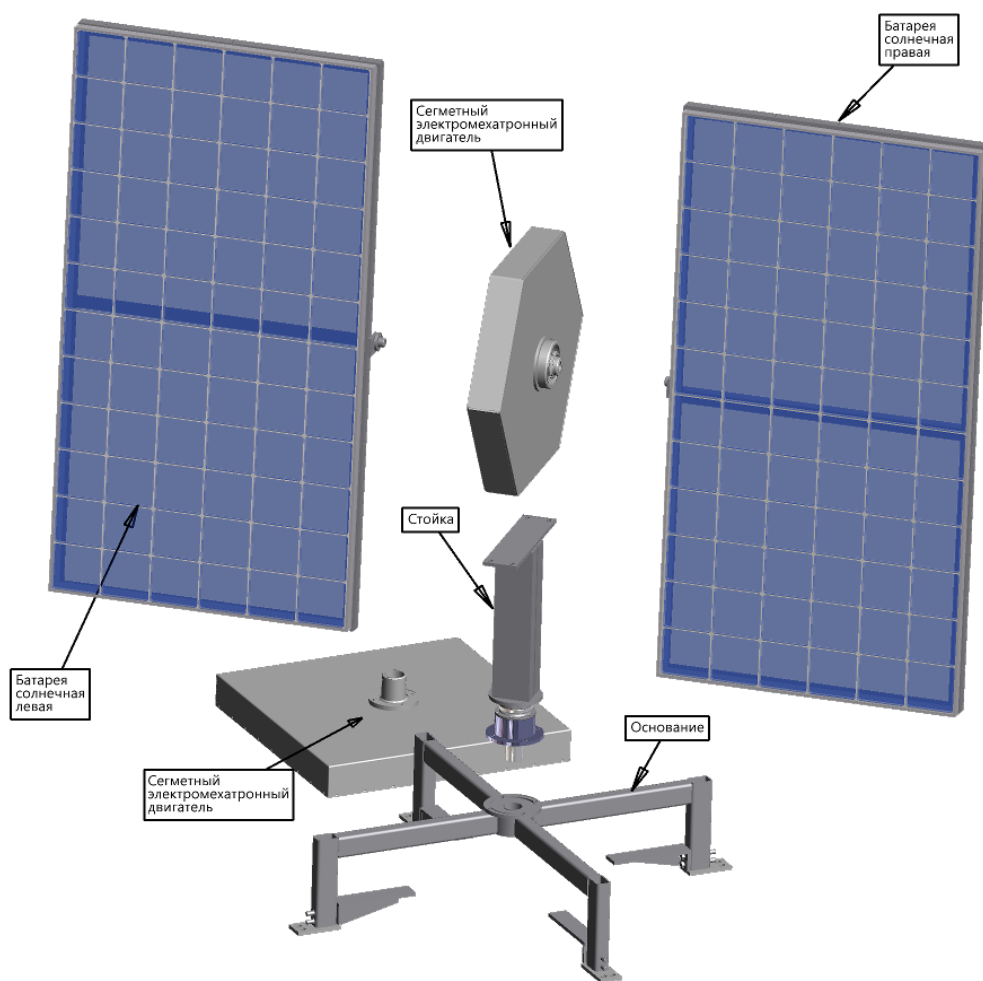


Рис. 2.2. Схема электронной модели поворотного устройства АЭСБ

Динамическое давление ветра на поверхность автономной электростанции с солнечными батареями (АЭСБ) определяется по формуле [7,8]:

$$f = \frac{\rho V^2}{2g},$$

где  $\rho = 1,225 \text{ кг/м}^3$  - плотность воздуха;  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения;  $V$  - скорость ветра, воздействующая на поверхность АЭСБ (в г. Томске на высоте 10 метров = 30 м/с).

Максимальная полная ветровая нагрузка на наветренную максимальную поверхность  $S$  АЭСБ:

$$w_{\max} = fSnc,$$

где  $c=1,2$  - аэродинамический коэффициент поверхности;  $n=1,5$  - коэффициент, учитывающий динамическую составляющую ветровой нагрузки;  $S=1.3 \text{ м}^2$  - максимальная наветренная поверхность АЭСБ.

Коэффициент запаса устойчивости АЭСБ:

$$k = \frac{M_1}{M_2} = 1,26 ,$$

где  $M_1$  - момент, удерживающий АЭСБ равен весу фундамента + вес АЭСБ, умноженные на плечо удержания;  $M_2$  - момент, опрокидывающий АЭСБ:  $M_2 = w_{\max} H$ ;  $H$  - высота автономной электростанции СБ от центра места приложения ветровой нагрузки до заделки в бетонном фундаменте.

Расчет ветровой нагрузки в виде т-файла приведен в Приложении 2.1.

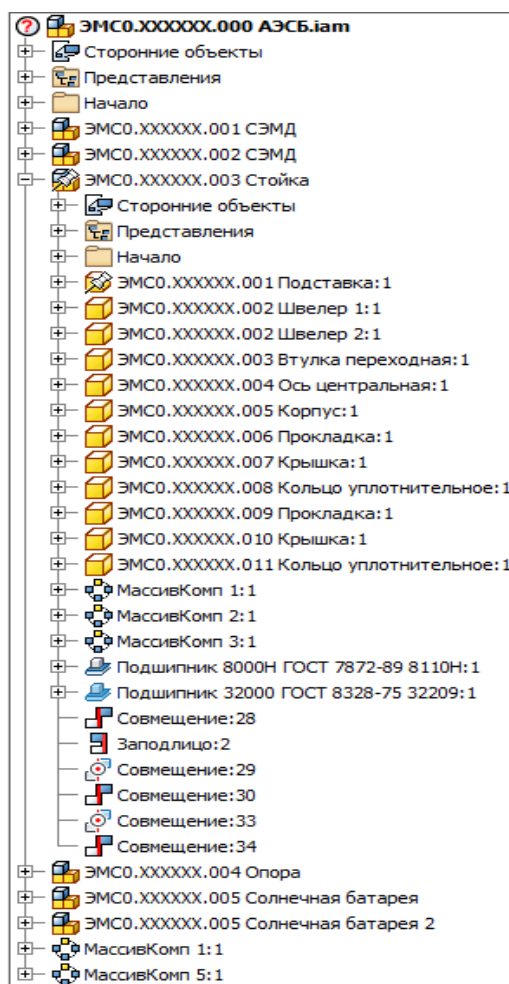


Рис. 2.3. Визуализация структуры АЭСБ в виде многоуровневого списка

Рассмотрим пример расчета винтов 3, с помощью которых крепится втулка 1 (рис. 2.4) СБ к оси 2 СЭМД, на срез и смятие. Расчетная схема болта под действием поперечной силы приведена на рис. 5. Болт установлен без

зазора. Болт установлен в отверстие из-под развертки, работает на срез и смятие. Условие прочности на срез:

$$d = \sqrt{\frac{4F_r}{\pi[\tau_{cp}]}} = 0.0025 \text{ м,}$$

где  $F_r = 710 \text{ Н}$  - поперечная сила, равная суммарному значению веса СБ и величине ветровой нагрузки;  $[\tau_{cp}] = 157 \text{ Мн/м}^2$  - напряжение среза для стали 3.

Проверочный расчет на смятие:

$$\sigma_{см} = \frac{F_r}{d\delta} = 10.044 < \sigma_{см} .$$

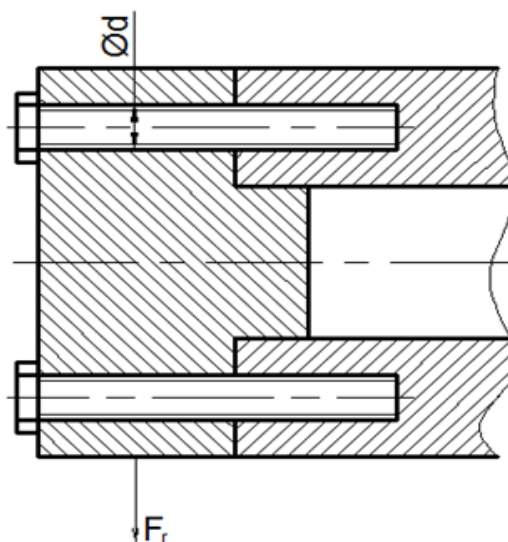
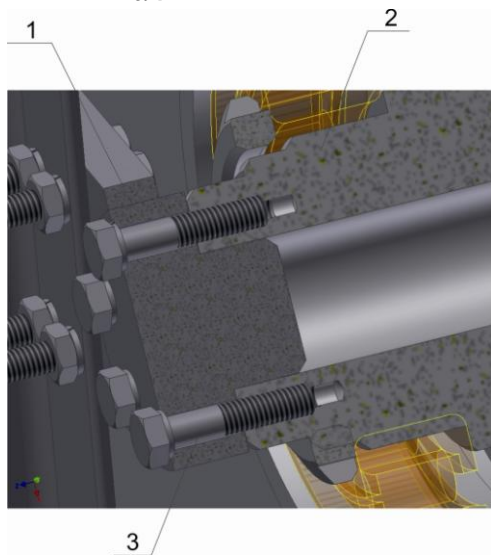


Рис. 4. Крепление СБ к оси СЭМД

Рис. 5. Схема к расчету затянутого поперечной силы винта под действием

Проведен расчет по анализу напряжений электронных моделей сборочных единиц: стойки, опоры, рам на которых закреплены СБ. На (рис. 6) представлен фрагмент визуализации результатов расчета на смещение деталей стойки. В Приложении 2 представлен отчет по анализу напряжений всех деталей входящих в состав стойки.

Для валов и осей выполнены расчеты на прочность. Построены эпюры сил сдвига, изгибающих моментов, отклонений и напряжений (рис. 7). Определена нагрузка на эти детали и на их опоры (см. таблицу 1). Результаты расчетов явились основанием для выбора материала и геометрических размеров этих деталей.

# Таблица 1

## Результаты расчетов оси верхнего СЭМД

### Нагрузка

Индекс	Положение	Радиальная сила				Изгибающий момент				Распределенная нагрузка			Осевая сила	Крутящий момент	Отклонение				Угол отклонения	
		Y	X	Значение	Направление	Y	X	Значение	Направление	Y	X	Значение			Направление	Длина				
1	6 мм	0,000 Н	650,000 Н	650,000 Н	90,00 град											-0,043 мкм	-0,284 мкм	0,288 мкм	261,49 град	0,00 град
2	6 мм	100,000 Н		100,000 Н												-0,043 мкм	-0,284 мкм	0,288 мкм	261,49 град	0,00 град
3	178 мм	0,000 Н	656,201 Н	656,201 Н	90,00 град											-0,044 мкм	-0,294 мкм	0,297 мкм	261,55 град	0,00 град
4	178 мм	100,000 Н		100,000 Н												-0,044 мкм	-0,294 мкм	0,297 мкм	261,55 град	0,00 град

### Опоры

Индекс	Тип	Положение	Сила реакции						Предел текучести	Тип	Отклонение				Угол отклонения
			Y	X	Значение	Направление	Осевая сила	Y			X	Значение	Направление		
1	Свободные	32 мм	120,812 Н	645,905 Н	657,107 Н	79,41 град			Пользовательский	-0,000 мкм	0,000 мкм	0,000 мкм	141,68 град	0,00 град	
2	Фиксированные	151,5 мм	121,827 Н	660,296 Н	671,441 Н	79,55 град			Пользовательский	-0,000 мкм	0,000 мкм	0,000 мкм	171,47 град	0,00 град	

### Результаты

Длина	L	184,000 мм
Масса	Масса	4,348 кг
Максимальное напряжение при изгибе	$\sigma_B$	0,860 МПа
Максимальное напряжение при сдвиге	$\tau_S$	0,463 МПа
Максимальное напряжение при кручении	$\tau$	0,000 МПа
Максимальное напряжение при растяжении	$\sigma_T$	0,000 МПа
Максимальное приведенное напряжение	$\sigma_{red}$	0,996 МПа
Максимальное отклонение	$f_{max}$	0,338 мкм
Угол закручивания	$\varphi$	0,00 град

### Смещение

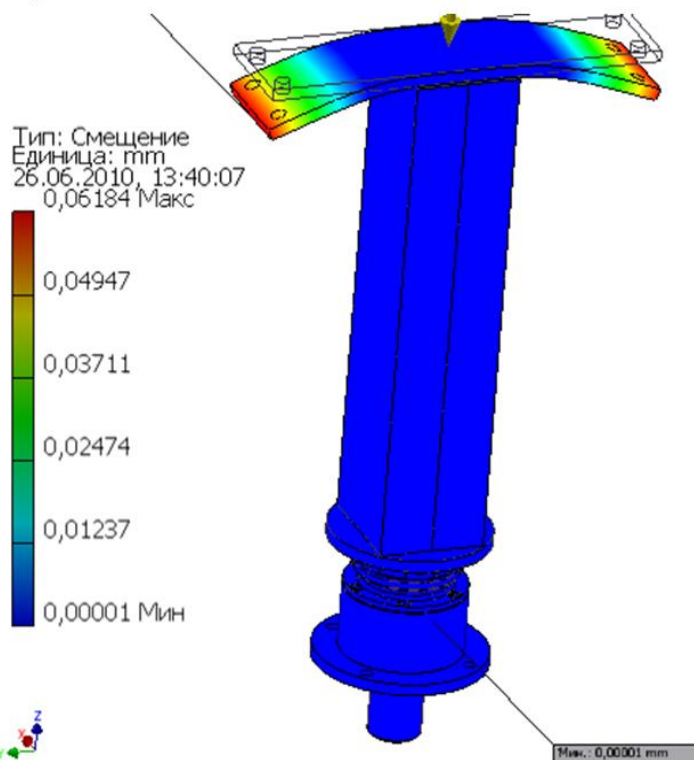
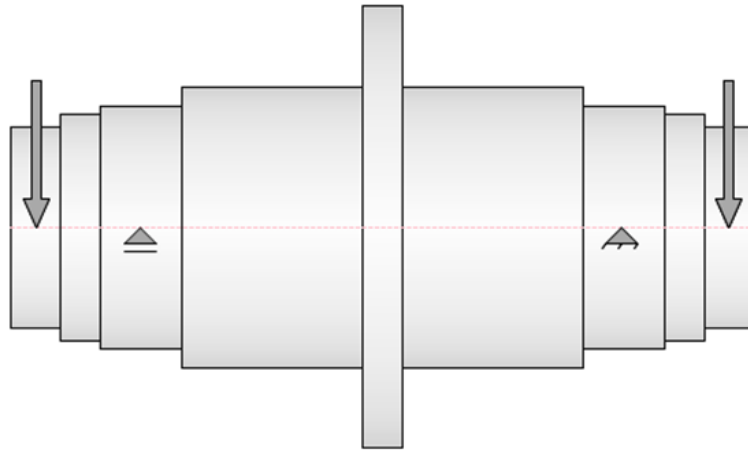


Рис. 6. Визуализация результатов расчета на смещение деталей стойки

Просмотр



Сила сдвига

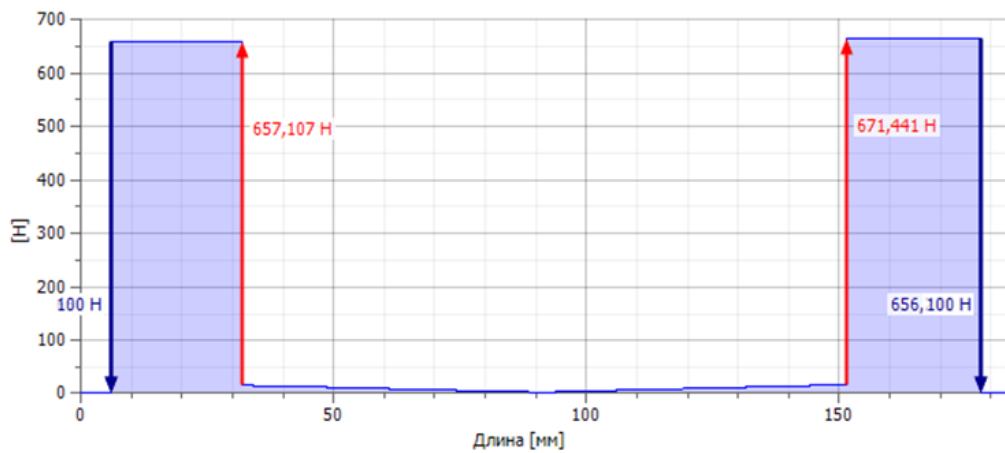


Рис. 7. Фрагмент визуализации расчета на прочность оси верхнего СЭМД

Наиболее ответственные детали проверены на прочность по анализу напряжений. На рис. 8. показан фрагмент анализа напряжений оси верхнего СЭМД. Полностью отчет по анализу напряжений этой детали представлен в Приложении 3.

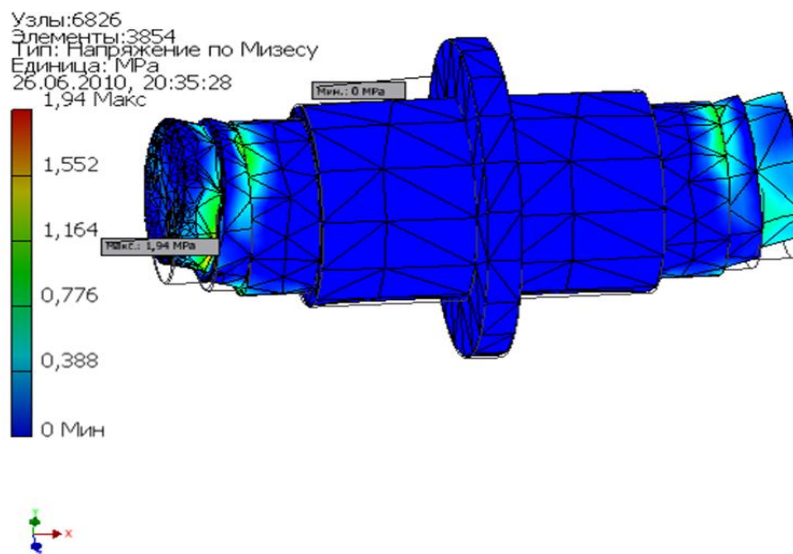




Рис. 8. Визуализация фрагмента анализа напряжений оси СЭМД

По результатам проведенных расчетов была разработана конструкторская документация в соответствии с "ГОСТ 2.102-68 Виды и комплектность конструкторских документов"

Приложение 4 – Сборочные чертежи узлов поворотного устройства АЭ СБ

### **Список использованных источников**

ГОСТ 2.103-68. ЕСКД. Стадии разработки. [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://vsenip.com/Data1/47/47609/index.htm> .

ГОСТ 2.118-73. ЕСКД. Техническое предложение. [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://vsenip.com/Data1/47/47609/index.htm>.

ГОСТ 2.119-73. ЕСКД. Эскизный проект..[Электронный ресурс] Режим доступа: <http://vsenip.com/Data1/47/47609/index.htm>.

ГОСТ 2.120-73. ЕСКД. Технический проект. Общие положения. [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://vsenip.com/Data1/47/47609/index.htm>.

ГОСТ 2.052-2006. ЕСКД. Электронная модель изделия. Общие положения. [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://vsenip.com/Data1/47/47609/index.htm>.

ГОСТ 2.053 - 2006. ЕСКД. Эксплуатационные документы.. [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://vsenip.com/Data1/4/4556/index.htm>.

Расчет ветровой нагрузки рекламных конструкций. [Электронный ресурс] Режим доступа: [http://www.ksinit.ru/statyi\\_1\\_veter.html](http://www.ksinit.ru/statyi_1_veter.html).

СНиП 2.01.07-85\* «Нагрузки и воздействия». [Электронный ресурс] Режим доступа: [http://www.ksinit.ru/statyi\\_1\\_veter.html](http://www.ksinit.ru/statyi_1_veter.html).

## Приложение № 1

### РАСЧЕТ ВЕТРОВОЙ НАГРУЗКИ НА ПОВЕРХНОСТЬ АВТОНОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ С СОЛНЕЧНЫМИ БАТАРЕЯМИ

Плотность воздуха  $\rho_0 = 1.225$ ; кг/м<sup>3</sup>.

Ускорение свободного падения  $g = 9.81$ ; м/с<sup>2</sup>.

Скорость ветра, воздействующая на поверхность АЭ СБВ = 30; м/с.

Динамическое давление ветра на поверхность автономной электростанции с солнечными батареями

$$f = \rho_0 * V^2 / 2 * g \text{ кг/м}^2.$$

$$f = 5407.8$$

Аэродинамический коэффициент поверхности  $c = 1.2$ ; .

Коэффициент, учитывающий динамическую составляющую ветровой нагрузки  $n = 1.5$ ; .

Максимальная наветренная поверхность АЭ СБС =  $0.810 * 1.59 + 2 * (0.351 * 0.08)$ ; м<sup>2</sup>.

Максимальная полная ветровая нагрузка на наветренную максимальную поверхность S АЭ СБ:

$$w_{\max} = f * S * n * c / 9.8 \text{ Н}$$

$$w_{\max} = 1335$$

Момент, удерживающий АЭ СБМ1 =  $(2000 + 1000) * 1.230 / 2$  Н.

$$M1 = 1845$$

Момент, опрокидывающий АЭ СБМ2 =  $w_{\max} * 1.1$  Н.

$$M2 = 1468.5$$

Коэффициент запаса устойчивости АЭСБ:

$$k = M1 / M2$$

$$k = 1.2564$$

**Результаты анализа напряжений сборочной единицы: стойка**

Общая цель и параметры

Цель проектирования	Одноточечный
Тип моделирования	Статический анализ
Обнаружить и устранить моды жесткого тела	Да
Разделить поперечные напряжения контактных поверхностей	Нет
Анализ нагрузок движения	Нет

**Результаты**

Имя	Минимальная	Максимальная
Объем	2009620 мм <sup>3</sup>	
Масса	15,1596 кг	
Напряжение по Мизесу	0,000746022 МПа	9,06225 МПа
1-ое основное напряжение	-2,07718 МПа	8,85674 МПа
3-е основное напряжение	-11,1756 МПа	1,11805 МПа
Смещение	0,0000061006 мм	0,0618387 мм
Коэфф. запаса прочности	15 бр	
Напряжение XX	-2,85471 МПа	2,27349 МПа
Напряжение XY	-1,3879 МПа	1,01902 МПа
Напряжение XZ	-3,09352 МПа	2,82256 МПа
Напряжение YY	-11,0514 МПа	8,84746 МПа
Напряжение YZ	-3,05975 МПа	3,41955 МПа
Напряжение ZZ	-7,67339 МПа	4,10438 МПа
Смещение по оси X	-0,000650077 мм	0,00081406 мм
Смещение по оси Y	-0,00364101 мм	0,00327332 мм
Смещение по оси Z	-0,0617598 мм	0,00000256 мм
Эквивалентная деформация	0,0000000031 бр	0,00032768 бр
1-ая основная	-	
		0,00024410

деформация	0,00000095415 бр	1 бр
3-я основная деформация	-0,000318551 бр	0,000000150068 бр
Деформация XX	- 0,0000700814 бр	0,0000227054 бр
Деформация XY	- 0,0000288111 бр	0,0000276317 бр
Деформация XZ	-0,000210824 бр	0,00022702 бр
Деформация YY	- 0,0000521517 бр	0,0000404282 бр
Деформация YZ	-0,000177866 бр	0,000178294 бр
Деформация ZZ	- 0,0000418049 бр	0,0000243527 бр
Контактное давление	0 МПа	152,187 МПа
Контактное давление по оси X	-7,11661 МПа	7,91929 МПа
Контактное давление по оси Y	-105,54 МПа	111,988 МПа
Контактное давление по оси Z	-103,04 МПа	98,1863 МПа

Сборочная единица **стойка** удовлетворяет условиям прочности.

**Результаты анализа напряжений детали: ось**

**Общая цель и параметры**

Цель проектирования	Одноточечный
Тип моделирования	Статический анализ
Обнаружить и устранить моды жесткого тела	Да
Разделить поперечные напряжения контактных поверхностей	Да
Анализ нагрузок движения	Нет

**Результаты**

Имя	Минимальная	Максимальная
Объем	553143 мм <sup>3</sup>	
Масса	4,34217 кг	
Напряжение по Мизесу	0,000438315 МПа	1,94046 МПа
1-ое основное напряжение	-0,693406 МПа	2,39767 МПа
3-е основное напряжение	-2,47472 МПа	0,794398 МПа
Смещение	0,0000001679 52 мм	0,000206404 мм
Кoeff. запаса прочности	15 бр	
Напряжение XX	-1,48979 МПа	1,569 МПа
Напряжение XY	-0,989244 МПа	0,691708 МПа
Напряжение XZ	-0,519036 МПа	0,429297 МПа
Напряжение YY	-1,94811 МПа	2,02369 МПа
Напряжение YZ	-0,461153 МПа	0,67755 МПа
Напряжение ZZ	-1,41003 МПа	2,0297 МПа
Смещение по оси X	- 0,0000503748 мм	0,000048537 3 мм
Смещение по оси Y	- 0,00000219139 мм	0,000198539 мм
Смещение по оси Z	- 0,0000551601 мм	0,000059936 7 мм
Эквивалентная деформация	0,0000000018 5121 бр	0,000008727 21 бр
1-ая основная деформация	0,0000000011 9677 бр	0,000009324 02 бр
3-я основная деформация	- 0,00000906362 бр	0,000000059 4799 бр

Деформация ХХ	- 0,00000441406 бр	13 бр	0,000004408
Деформация ХУ	- 0,00000612389 бр	6р	0,000004282
Деформация ХZ	- 0,00000321308 бр	55 бр	0,000002657
Деформация УУ	- 0,00000628546 бр	97 бр	0,000005930
Деформация УZ	- 0,00000285476 бр	36 бр	0,000004194
Деформация ZZ	- 0,00000287128 бр	1 бр	0,000007046

**Ось** удовлетворяет условиям прочности.

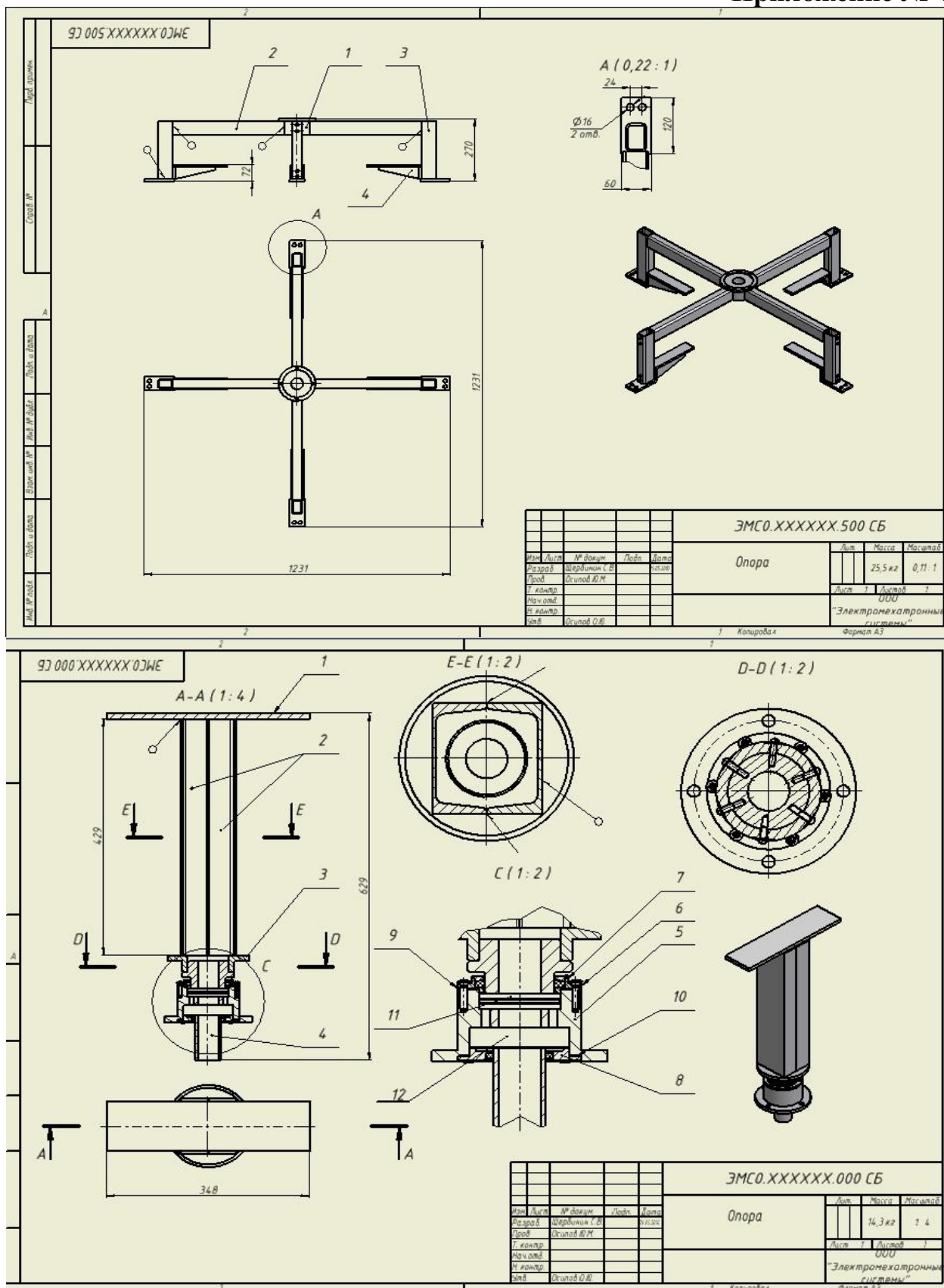


Рис. П.4. Сборочные чертежи узлов поворотного устройства АЭ СБ

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3

## РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОМОНТАЖНЫХ ЧЕРТЕЖЕЙ БЛОКА УПРАВЛЕНИЯ ПОВОРОТНОГО УСТРОЙСТВА АВТОНОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ С СОЛНЕЧНЫМИ БАТАРЕЯМИ

### 3.1. Цель и задачи работы

Цель работы состоит в проведении проектных расчетов и разработке конструкторской документации системы управления поворотным устройством для двухкоординатного электромеханизма с безредукторными электроприводами.

Основные задачи.

1. Рассчитать элементы и узлы системы управления.
2. Разработать конструкторскую документацию на систему управления электроприводами поворотного устройства.
3. Разработать конструкторскую документацию на систему распределения электрической энергии солнечных батарей.

### 3.2. Задание

Основанием для проектирования системы управления поворотным устройством АЭ СБ является техническое задание, согласно которому, она должна иметь следующие технико-эксплуатационно-экономические (ТЭЭХ) характеристики:

- напряжение питания, В – 12;
- выходное напряжение, В –  $\pm 35$ ;
- частота преобразования, кГц – от 20 до 40;
- количество фаз выходного напряжения – 3;
- макс. мощность нагрузки, Вт – 700;
- габаритные размеры, мм – не более 250x150x90;
- температура, град – от -40 до 50;

и обеспечивать следующие ТЭЭХ:

- угол поворота вокруг вертикальной оси, град – от 0 до 360;
- угол поворота вокруг горизонтальной оси, град – от 0 до 90;
- скорости вращения, град/сек – от 0,5 до 360;
- точность позиционирования, град – 0,1.

Система распределения электрической энергии солнечных батарей должна удовлетворять следующим ТЭЭХ:

- входное напряжение, В – 12;
- выходное напряжение, В – 12 (пост.), 220 (50 Гц);
- макс. мощность заряда аккумуляторных батарей, Вт – 250;
- пост.выходная мощность, Вт – 1000;
- макс. выходная мощность, Вт – 3000;
- габаритные размеры, мм – 560x480x170.

### 3.3. Теоретическая часть

При разработке конструкторской документации пройдены следующие стадии в соответствии с ГОСТ 2.103-68 [1].

1. Эскизный проект – совокупность конструкторских документов, которые должны содержать принципиальные конструктивные решения, дающие общее представление о назначении, об устройстве, принципе работы и габаритных размерах разрабатываемого изделия, а также данные, определяющие назначение, основные параметры и габаритны



размеры разрабатываемого изделия. Эскизный проект после согласования и утверждения в установленном порядке служит основанием для разработки технического проекта или рабочей конструкторской документации.

На стадии эскизного проектирования осуществлялась разработка структурных и функциональных схем, выбор базовых элементов и предварительные расчеты блоков систем управления электроприводами и распределения энергии.

2. Технический проект – совокупность конструкторских документов, которые должны содержать окончательные технические решения, дающие полное представление об устройстве разрабатываемого изделия, и исходные данные для разработки рабочей документации.

Техническое проектирование позволило детализовать каждый блок структурной схемы системы управления электроприводами, путем расчета параметров элементов схемы, и осуществить выбор необходимых компонентов.

3. Конструкторская документация для изготовления макетов разрабатывается с целью: проверки принципов работы изделия или его составных частей на стадии эскизного проекта; проверки основных конструкторских решений разрабатываемого изделия или его составных частей на стадии технического проекта; предварительной проверки целесообразности изменения отдельных частей изготавливаемого изделия до внесения этих изменений в рабочие конструкторские документы опытного образца (опытной партии).

Результатом этой стадии стал комплект конструкторской документации на систему управления электроприводами и систему распределения электроэнергии солнечных батарей. На основании которого были изготовлены опытные образцы отдельно взятых блоков и проведен ряд испытаний, позволившие выявить существующие недостатки и произвести соответствующие изменения в документации.

Задачей блока управления является формирование алгоритма работы инверторов силового блока. Структурная схема блока управления приведена на рисунке 1 (электрические принципиальные схемы в приложении 1). Основным элементом блока управления является микроконтроллер (МК). Он обеспечивает управление ключами инвертора звена повышенной частоты (ИЗПЧ), реализует алгоритм управления ключами двух 3-х фазных инверторов силового блока (И1, И2), осуществляет контроль токов фаз и скорости вращения роторов двигателей.

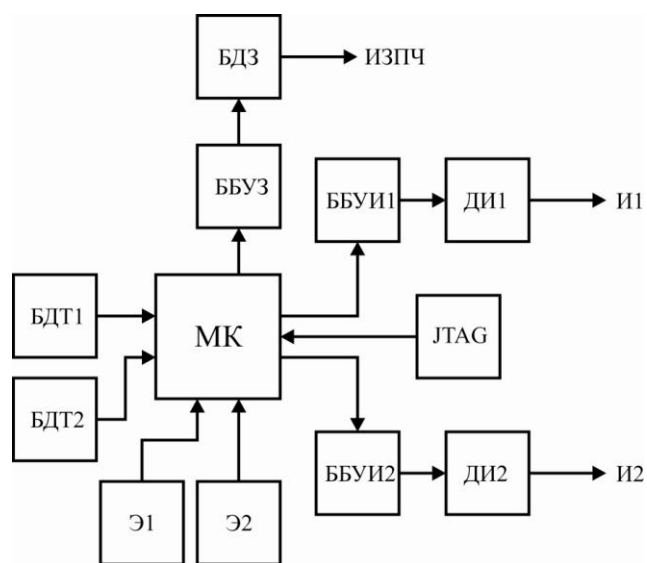


Рис. 3.1. Структурная схема блока управления

Для согласования низковольтных логических управляющих сигналов суровнями управления ключей инверторов силового блока, требуется установка высоковольтных драйверов (БДЗ – блок драйверов инвертора звена повышенной частоты (ЗПЧ), ДИ1 – драйвер первого 3-х фазного инвертора, ДИ2 – драйвер второго 3-х фазного инвертора). Эти устройства согласования обеспечивают необходимые уровни сигналов управления, защиту ключевых элементов и индикацию аварийных режимов.

В роли промежуточных устройств согласования сигналов между микроконтроллером и высоковольтными драйверами выступают шинные формирователи (буфера-усилители) (ББУЗ – блок буферов-усилителей ЗПЧ, ББУИ1 – блок буферов-усилителей И1, ББУИ2 – блок буферов-усилителей И2). С блоков датчиков тока (БДТ1, БДТ2) на микроконтроллер поступают аналоговые сигналы, соответствующие уровням токов фаз двигателей. Информация о скорости вращения роторов двигателей и их текущем положении поступает на порты микроконтроллера с энкодеров (Э1, Э2). Программирование микроконтроллера через программатор осуществляется посредством интерфейса *JTAG*.

Выбор микроконтроллера, основного элемента системы управления электроприводами, осуществлялся на основании стоимости и предлагаемых технических характеристик. В результате были отобраны три аналогичных друг другу контроллера, основные параметры которых приведены в таблице 1 [2-4].

Табл. 1

Сравнительные характеристики микроконтроллеров

Микроконтроллер <i>PIC</i> ( <i>Microchip Technology</i> )	Микроконтроллер <i>AVR</i> ( <i>Atmel</i> )	Микроконтроллер <i>ARM</i> ( <i>Philips</i> )
<ul style="list-style-type: none"> <li>- 16-битный микроконтроллер;</li> <li>- высокая производительность (до 16 <i>MIPS</i>);</li> <li>- пять 16-битных таймеров;</li> <li>- 10-битный АЦП последовательного приближения;</li> <li>- реализация модуля <i>JTAG</i>;</li> <li>- поддержка интерфейсов <math>I^2C</math>, <i>SPI</i> и <i>UART</i>;</li> <li>- векторная система прерываний с 16 уровнями приоритетов;</li> <li>- наличие 16 рабочих регистров;</li> <li>- возможность выполнения 16-битных математических операций;</li> <li>- возможность выполнения операций умножения с разрядностью 17*17 бит за один машинный цикл;</li> <li>- возможность выполнения сдвига на произвольное количество бит (до 16) за один машинный цикл;</li> <li>- аппаратно-программная архитектура, оптимизированная для разработки программ на языке Си;</li> <li>- мощная система команд, которая включает инструкцию повторения <i>repeat</i> для циклического выполнения команд, что особенно полезно при использовании команд пересылки данных.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 32-битные микроконтроллеры;</li> <li>- высокая производительность (1 <i>MIPS</i> на 1 МГц);</li> <li>- 32 регистра общего назначения;</li> <li>- <i>Flash</i>-память - от 1 до 256 Кбайт;</li> <li>- поддержка внешних прерываний;</li> <li>- четыре 8-битных таймера-счетчика;</li> <li>- сторожевой таймер;</li> <li>- аналоговые компараторы;</li> <li>- 10-разрядный 8-канальный АЦП;</li> <li>- интерфейсы <i>UART</i>, <i>JTAG</i> и <i>SPI</i>;</li> <li>- устройство сброса по понижению питания;</li> <li>- широтно-импульсные модуляторы.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- производительность до 54 <i>MIPS</i>;</li> <li>- высокопроизводительное 32/16-битное ядро <i>ARM7TDMI-S</i>;</li> <li>- 8/16/32/64 Кбайт памяти типа <i>SRAM</i>(статическое ОЗУ);</li> <li>- 64/128/256/512 Кбайт памяти типа <i>Flashc</i> 128-битной шиной и обращением без цикла ожидания;</li> <li>- стандартный отладочный интерфейс <i>JTAG</i>;</li> <li>- работа с командами длиной 32 битов (стандартный режим <i>ARM</i>) и 16 битов (режим <i>THUMB</i>);</li> <li>- внешняя 8/16/32-битная шина (только для устройств <i>LPC2000</i> в 144-вы- водном корпусе);</li> <li>- многоканальный модуль ШИМ;</li> <li>- интерфейсы <i>UART</i>, быстрый <math>I^2C</math> (400 Кбит/с), <i>SPI</i>;</li> <li>- интерфейсы <i>CAN</i> с приемными фильтрами;</li> <li>- два 32-битных таймера с каналами сравнения и захвата;</li> <li>- таймер реального времени и сторожевой таймер <i>WDT</i>;</li> <li>- интерфейс <i>USB</i>;</li> <li>- многоканальный 10-битный АЦП, обеспечивающий время преобразования в одном канале 2,44 мкс;</li> <li>- 10-битный модуль ЦАП;</li> <li>- встроенный отладочный интерфейс <i>ICE</i>, позволяющий задавать точки останова.</li> </ul>

Исходя из приведенной выше информации, 32-битные микроконтроллеры, использующие процессорное ядро с архитектурой ARM, являются наиболее предпочтительными для использования в данном проекте. Их отличает производительность, соотношение “цена/качество”, они обладают необходимым набором периферийных устройств и позволяют создавать универсальные системы, обладают малым энергопотреблением, имеют малый размер корпуса, доступны в продаже. Данные микроконтроллеры поддерживаются программными средствами разработки различных фирм, что облегчает работу с данными микросхемами.

Для работы блока управления требуется источник питания собственных нужд, так как необходимо обеспечить различные уровни напряжения для каждой микросхемы. Кроме того необходимо повысить напряжения с имеющихся 12В до  $\pm 35$ , для того чтобы обеспечивать работу двигателей. На рисунке 2 представлена структурная схема источника питания собственных нужд, содержащий трехфазный инвертор напряжения (электрические принципиальные схемы в приложении 2).

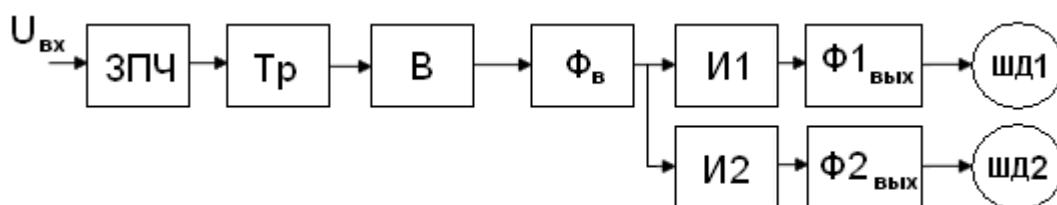


Рис. 3.2. Структурная схема источника питания собственных нужд

Система питается от постоянного напряжения в 12В, которое необходимо преобразовать в трехфазное переменное. Для преобразования уровня напряжения необходимо использовать трансформатор и инвертор. На входе трансформатора ставим звено повышенной частоты (ЗПЧ) позволяющее преобразовать постоянное напряжение в переменное. Повысив частоту, передаём сигнал на трансформатор (Тр). Трансформатор повысит уровень напряжения до требуемого, после чего напряжение с выхода трансформатора необходимо выпрямить, используя выпрямитель (В). Выпрямленное напряжение поступает на вход LC-фильтра (Ф<sub>в</sub>) для достижения постоянного напряжения и тока близких к идеальному. Преобразование однофазного источника в трёхфазный потребует наличие в системе трёхфазного инвертора для каждого из двигателей (И1, И2). Поскольку сигнал с выхода инвертора будет иметь высокочастотные гармоники, необходимо произвести их фильтрацию. Для этого на выходе трёхфазного инвертора ставится ёмкостной фильтр (Ф<sub>вых</sub>). Сформированные сигналы для каждой из фаз поступают на двигатель (ШД).

Произведем расчет трехфазного мостового инвертора напряжения. В данном мостовом инверторе переключение ключей производится с помощью сигналов управления, поступающих от системы управления (рис. 1 (ДИ1, ДИ2)).

Произведем расчет токов и напряжений инвертора по следующим выражениям:

$$U_{си.мах} = 1,2 * U_{ex}, \quad (3.1) \quad (1)$$

$$I_{с.мах} = 1,2 * I_{ex}, \quad (3.2) \quad (2)$$

где  $U_{ex}$  – потребляемое напряжение инвертора, В;

$I_{ex}$  – потребляемый ток инвертора, А.

Для расчета изначально предположим, что у нас все элементы трёхфазного инвертора идеальны. Исходя из этого, можно предположить, что входному напряжению соответствует напряжение между фазами двигателя  $U_{AB} = 35\text{ В}$ , а входному току – потребляемый ток двигателя  $I_H = 10\text{ А}$ .

Таким образом, значения напряжения и тока для выбора транзисторов трёхфазного инвертора равны:

$$U_{си.мах} = 1,2 * 35 = 42\text{ В}, \quad (3.3)$$

$$I_{с.мах} = 1,2 * 10 = 12\text{ А}. \quad (3.4)$$

В качестве силовых ключей выберем МОП-транзисторы *IRF3415*, тип корпуса *TO-220/3*, имеющий следующие параметры:

- предельно допустимое напряжение сток-исток ( $U_{си.мах}$ ) 150 В,
- предельно допустимый прямой ток ( $I_{с.мах}$ ) 43 А,
- мощность рассеяния ( $P_{рас}$ ) 200 Вт,
- температурный диапазон эксплуатации от -55 до +175 °С,
- максимальное напряжение затвор-исток ( $U_{зи.мах}$ )  $\pm 20\text{ В}$ ,
- максимальная емкость «затвор-сток» ( $C_{тр}$ ) 2,4 нФ,
- сопротивление канала ( $R_{кан}$ ) 0,042 Ом,
- максимальное падение напряжения ( $\Delta U_{VT}$ ) 1,3В,
- обратный ток ( $I_{ис}$ ) 25 мкА,
- время включения транзистора ( $t_{вкл}$ ) 55 нс,
- время выключения транзистора ( $t_{выкл}$ ) 69 нс.

После выбора силовых ключей элементы представляются уже не являются идеальными, у них существуют потери. На выбранных транзисторах падает напряжение в 1,3 В, тогда на вход мы должны подавать напряжение с учётом этого падения. Одновременно у нас работают три транзистора. Следовательно, два из них будут находиться в параллели, их общее напряжение составит 1,3 В.

Значение суммарного максимально возможного падения напряжения на транзисторах составит:

$$\Delta U_{VT.сум} = 2 * \Delta U_{VT} = 2 * 1,3 = 2,6\text{ В}. \quad (3.4)$$

Напряжение на входе трёхфазного инвертора должно составить:

$$U_{\Sigma_{вх1}} = \frac{U_{вх} + \Delta U_{VT.сум}}{\eta_{\phi 1}} = \frac{35 + 2,6}{0,96} = 39,17\text{ В}. \quad (3.5)$$

где  $\eta_{\phi 1} = 0,96$  – коэффициент полезного действия ёмкостного фильтра.

Рассчитав суммарное входное напряжение инвертора, отметим изменения напряжения, относительно рассчитанного по формуле (3). В таком случае мы должны повторно проверить транзисторы на предельно допустимое напряжение. Поскольку допустимое напряжение сток-исток выбранного транзистора укладывается в предельные значения тока и напряжения, оставляем транзисторы без изменения.

Мощность потерь определяется как сумма потерь мощностей, рассеиваемых на транзисторах, работающих в динамических и статических режимах.

Статическая мощность потерь, выделяемая на транзисторах, определяется, используя выражение:

$$P_{ст} = \frac{1}{2} * I_n^2 * R_{кан} * \gamma + I_{uc} * U_{\Sigma_{вх1}} * (1 - \gamma), \quad (3.7) \quad (7)$$

где  $\gamma$  – относительная длительность импульса.

Динамическая мощность потерь определяется следующим выражением:

$$P_{дин} = \frac{1}{2} * I_n * U_{\Sigma_{вх1}} * f_{np} * (t_{вкл} + t_{выкл}) + \frac{1}{2} * C_{тр} * U_{\Sigma_{вх1}}^2 * f_{np}, \quad (3.8) \quad (8)$$

где  $f_{np}$  – частота переключения транзистора, Гц;

Система управления транзисторами осуществляется таким образом, что относительная длительность открытого состояния транзистора ( $\gamma$ ) изменяется в пределах от 0...1. Выберем наихудший вариант состояния транзистора ( $\gamma = 0$ ). Используя формулы (7) и (8) определим потери на ключевых элементах.

$$P_{ст1} = \frac{1}{2} * 10^2 * 0,042 * 1 + 25 * 10^{-6} * 39,17 * (1 - 0) = 2,1 \quad (3.9)$$

$$P_{дин1} = \frac{1}{2} * 10 * 39,17 * 40 * 10^3 * (55 * 10^{-9} + 69 * 10^{-9}) + \frac{1}{2} * 2,4 * 10^{-9} * 39,17^2 * 40 * 10^3 = 1,05 \quad (3.10)$$

В связи с тем, что постоянно работают три транзистора, причём в любой момент времени ток на одном из них равен сумме токов двух других, которые между собой равны, используя формулы (7) и (8) рассчитаем статические и динамические потери двух других транзисторов.

$$P_{ст2} = \frac{1}{2} * 5^2 * 0,042 + 25 * 10^{-6} * 39,17 * (1 - 0) = 0,53 \text{ Вт}, \quad (3.11)$$

$$P_{дин2} = \frac{1}{2} * 5 * 39,17 * 40 * 10^3 * (55 * 10^{-9} + 69 * 10^{-9}) + \frac{1}{2} * 2,4 * 10^{-9} * 39,17^2 * 40 * 10^3 = 0,56 \text{ Вт}. \quad (3.12)$$

Следующим выражение вычислим общую мощность, рассеиваемую одновременно включёнными транзисторами.

$$P_{рас.VT} = P_{ст1} + P_{дин1} + 2 * (P_{ст2} + P_{дин2}), \quad (5.10)$$

$$P_{рас1.VT} = 2,1 + 1,05 + 2 * (0,53 + 0,56) = 5,33 \text{ Вт}, \quad (3.13)$$

Принимаем  $P_{рас1.VT} = 6 \text{ Вт}$ .

По результатам проведенного расчета инвертора, производился расчет выпрямителя и сглаживающего фильтра, после чего вычислялись параметры высокочастотного фильтра на выходе схемы источника питания собственных нужд. Приведенные расчеты инвертора и транзисторов, послужили основанием для расчета параметров "обвязки" драйвера трехфазного инвертора и звена повышенной частоты.

По результатам проведенных расчетов была разработана конструкторская документация в соответствии с ГОСТ. При разработке схем выполнены расчеты параметров отдельных элементов при помощи аналитических выражений. Проектирование принципиальных схем производилось при помощи программного комплекса *P-CAD 2000*, электромонтажных схем при помощи программы *CorelDrawX14*.

#### **Список использованных источников**

1. ГОСТ 2.103-68. ЕСКД. Стадии разработки. [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://vsesnip.com/Data1/47/47609/index.htm> .
2. Магда, Ю.С. Микроконтроллеры PIC: архитектура и программирование / Ю.С. Магда. – М. : ДМК Пресс, 2009. – 240 с.
3. Устройство микроконтроллеров AVR [Электронный ресурс] Режим доступа: [http://www.myrobot.ru/stepbystep/mc\\_architecture.php](http://www.myrobot.ru/stepbystep/mc_architecture.php).
4. Микроконтроллеры ARM7 семейства *LPC2000*: Руководство пользователя / П.П. Редькин [и др.]. - М. :Додэка - XXI, 2007. – 560с. – ISBN 978-5-94120-111-2.

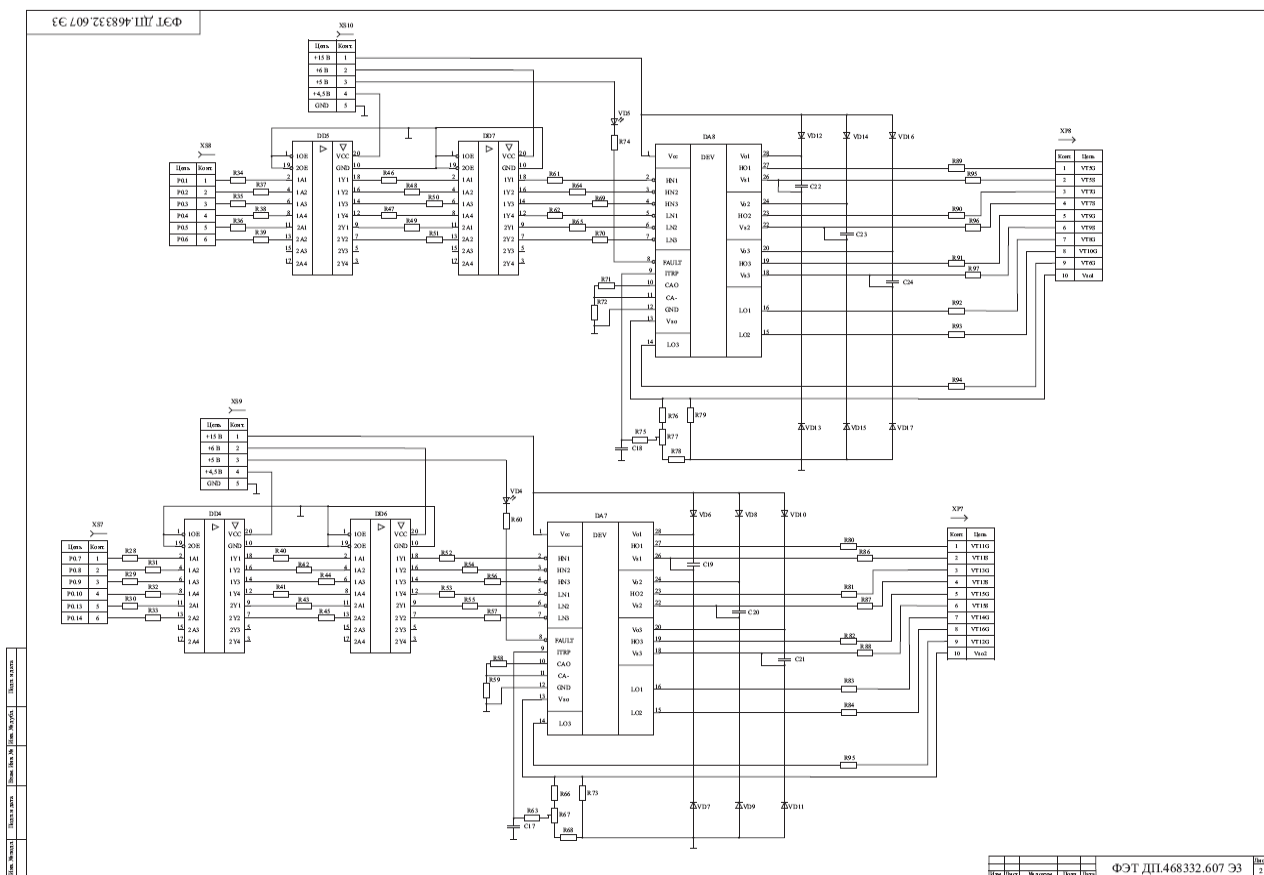
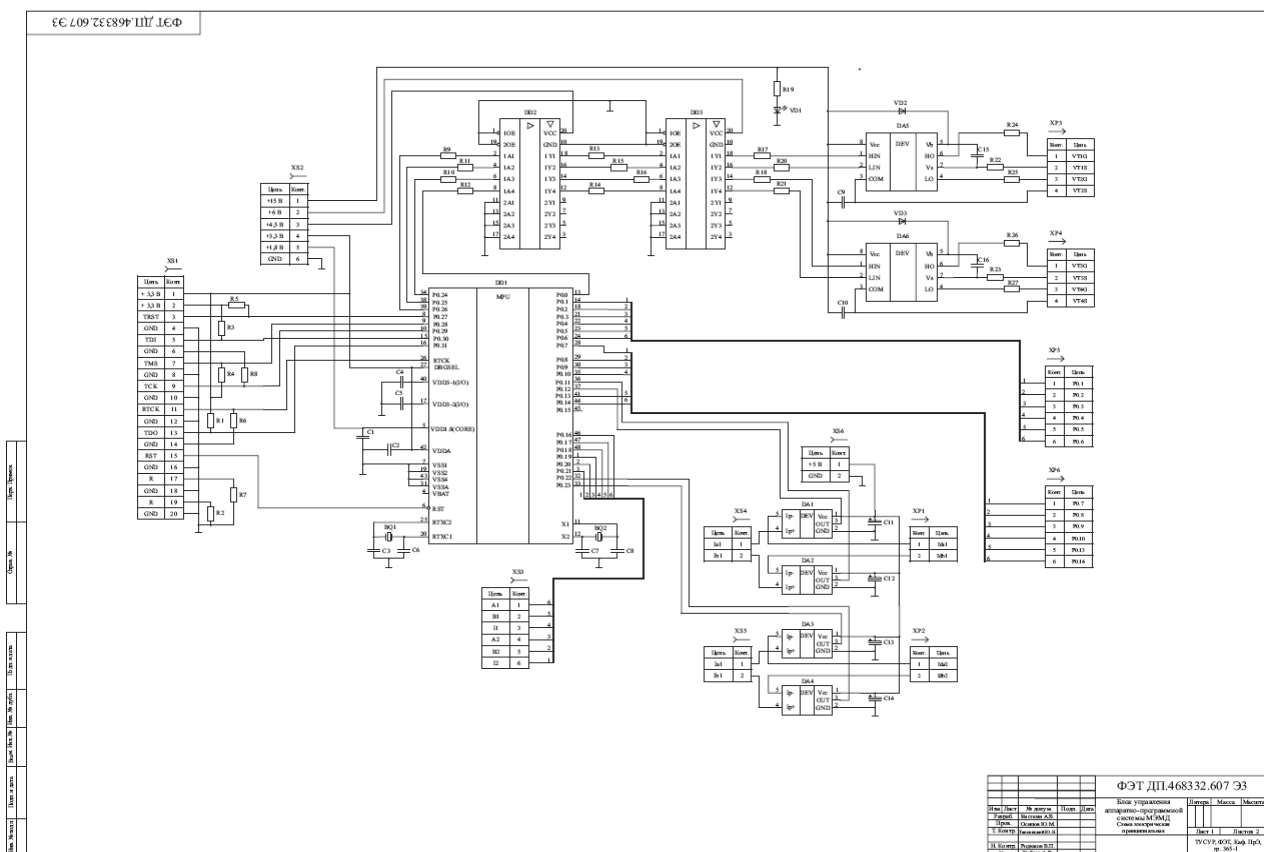


Рис. П.3.1. Схемы электрические принципиальные системы управления электроприводами

Изм. №	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ФЭТ ДП.468332.607 ПЭЗ			Изм. №	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Лист
					Изм. №	Лист	№ докум.						
					ФЭТ ДП.468332.607 ПЭЗ								
Блок управления аппаратно-программной системы МЭМД													
Перечень элементов													
					ФЭТ ДП.468332.607 ПЭЗ								
					ФЭТ ДП.468332.607 ПЭЗ								

Изм. №	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ФЭТ ДП.468332.607 ПЭЗ			Изм. №	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Лист
					Изм. №	Лист	№ докум.						
					ФЭТ ДП.468332.607 ПЭЗ								
Блок управления аппаратно-программной системы МЭМД													
Перечень элементов													
					ФЭТ ДП.468332.607 ПЭЗ								
					ФЭТ ДП.468332.607 ПЭЗ								

Изм. №	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ФЭТ ДП.468332.607 ПЭЗ			Изм. №	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Лист
					Изм. №	Лист	№ докум.						
					ФЭТ ДП.468332.607 ПЭЗ								
Блок управления аппаратно-программной системы МЭМД													
Перечень элементов													
					ФЭТ ДП.468332.607 ПЭЗ								
					ФЭТ ДП.468332.607 ПЭЗ								

Изм. №	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ФЭТ ДП.468332.607 ПЭЗ			Изм. №	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Лист
					Изм. №	Лист	№ докум.						
					ФЭТ ДП.468332.607 ПЭЗ								
Блок управления аппаратно-программной системы МЭМД													
Перечень элементов													
					ФЭТ ДП.468332.607 ПЭЗ								
					ФЭТ ДП.468332.607 ПЭЗ								

Рис. П.3.2. Перечень элементов системы управления электроприводами





Приложение № 4

Поз. обозначение	Наименование	Кол.	Примечание																																
Конденсаторы																																			
C1, C2	K73-17-M47-250B-0,33мкФ±5%	2																																	
C3, C4	K73-17-M47-250B-0,1мкФ±10%	2																																	
C5...C8	K73-17-M47-250B-0,33мкФ±5%	4																																	
C9...C12	K73-17-M47-250B-0,1мкФ±10%	4																																	
C13	K73-17-M47-250B-0,33 мкФ±5%	1																																	
C14	K73-17-M47-250B-0,1мкФ±10%	1																																	
C15	K73-17-M47-250B-0,33мкФ±5%	1																																	
C16, C17	K50-35-M47-50B-10мкФ±10%	2																																	
C18	K73-17-M47-250B-0,33мкФ±5%	1																																	
C19...C21	RNE840MZ7330MF15R06L2	3																																	
C22	K73-17-M47-250B-0,1мкФ±10%	1																																	
C23, C24	K50-35-M47-50B-10мкФ±10%	2																																	
C25	K73-17-M47-250B-0,1мкФ±10%	1																																	
C26...C37	K50-35-M47-100B-1мкФ±5%	12																																	
Микросхемы																																			
DA1, DA2	L7815	2																																	
DA3	L7806	1																																	
DA4	L7805	1																																	
DA5	LM117	1																																	
DA6	L7806	1																																	
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Имя</th> <th>Лист</th> <th>№ докум.</th> <th>Подп.</th> <th>Дата</th> <th>Лист</th> <th>Лист</th> <th>Листов</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> </tr> </tbody> </table>				Имя	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Лист	Лист	Листов																								
Имя	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Лист	Лист	Листов																												

Поз. обозначение	Наименование	Кол.	Примечание																		
DA7	L7805	1																			
DA8	LM117	1																			
DA9	L7815	1																			
DA10	L7806	1																			
DA11	LM117	1																			
DA12	LM1085	1																			
DA13	IRU1117	1																			
DA14	L7805	1																			
L1	Дроссель E55 ФЭТ ДП.671342.108	1																			
Резисторы																					
R1	C1-4-0.25Вт-2,4кОм±5%	1																			
R2	C1-4-0.25Вт-5,1кОм±5%	1																			
R3	C1-4-0.25Вт-2,4кОм±5%	1																			
R4	C1-4-0.25Вт-5,1кОм±5%	1																			
R5	C1-4-0.25Вт-2,4кОм±5%	1																			
R6	C1-4-0.25Вт-5,1кОм±5%	1																			
TV1	Трансформатор EFD 30 ФЭТ ДП.671221.108	1																			
Диоды																					
VD1...VD4	40EPF02	4																			
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Имя</th> <th>Лист</th> <th>№ докум.</th> <th>Подп.</th> <th>Дата</th> <th>Лист</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> </tr> </tbody> </table>				Имя	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Лист												
Имя	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Лист																



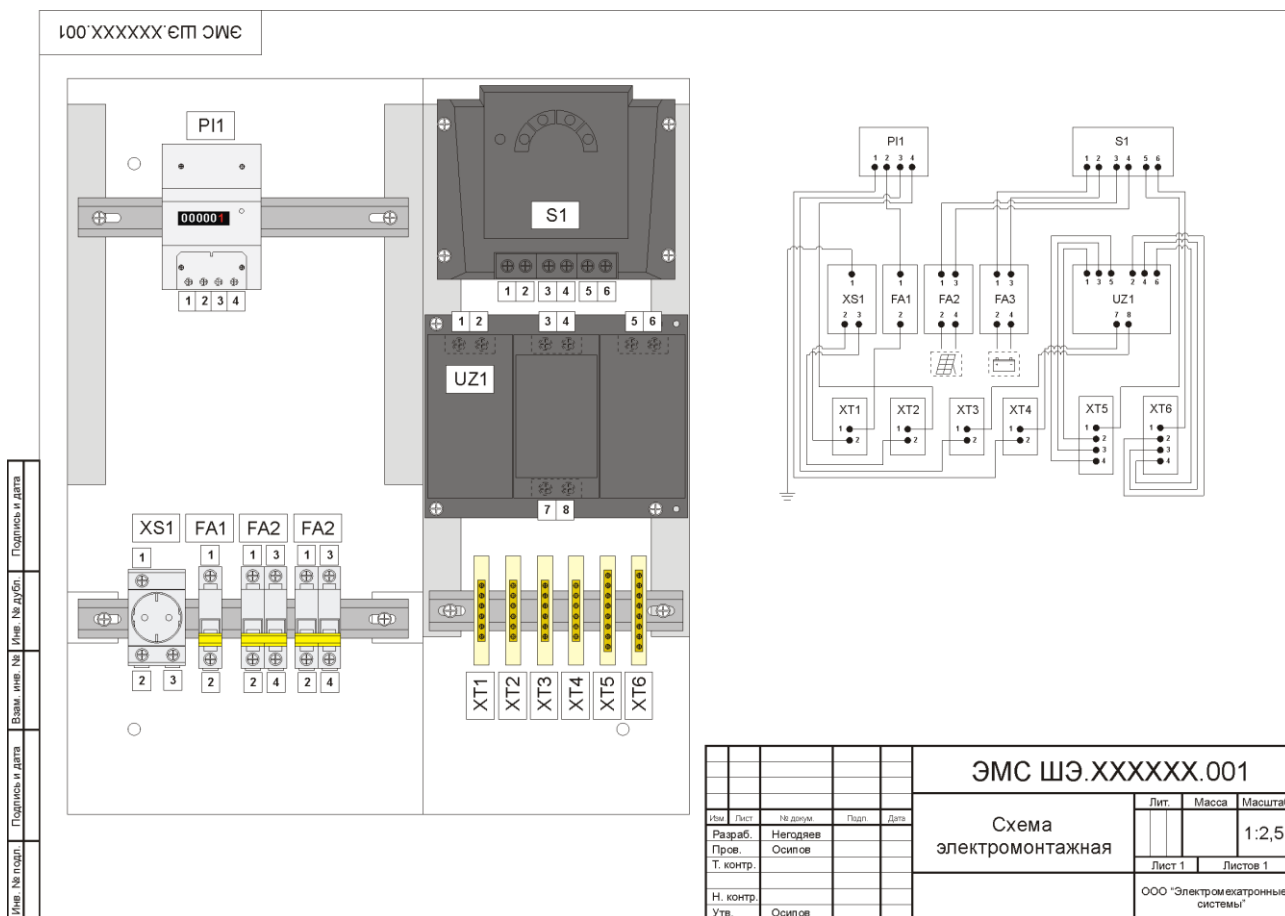


Рис. П.3.5. Схема электромонтажная системы распределения электропитания

# **ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ ДВИЖЕНИЯ**

Методические указания к лабораторным занятиям  
по дисциплине **«Методика проектирования электромехатронных систем движения»**  
для магистрантов 6 курса, обучающихся по направлению 221000.68 "Мехатроника и  
робототехника" по магистерской программе "Проектирование и исследование  
мультикоординатных электромехатронных систем движения"

Составитель

Щербинин Сергей Васильевич

Подписано к печати

Формат 60x84/16. Бумага офсетная

Печать RISO. Усл.печ.л. Уч.-изд.л.

Тираж 50 экз. Заказ . Бесплатно