

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Самарский государственный технический университет»

На правах рукописи

Новикова Анна Петровна

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА  
РАБОТОСПОСОБНОСТИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА  
АВТОНОМНОГО ТРАНСПОРТНОГО ОБЪЕКТА**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

**Диссертация на соискание  
ученой степени кандидата технических наук**

Научный руководитель:  
доктор технических наук,  
доцент Козловский В.Н.

Самара 2016

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение .....	5
1 Актуализация проблемы разработки электротехнических систем мониторинга ЭКЭП АТО.....	13
1.1 Проблема диагностики ЭКЭП АТО .....	13
1.2 Анализ технических требований к системам электропитания электромобилей и автомобилей с комбинированной энергоустановкой .....	18
1.3 Анализ методов решения проблемы мониторинга работоспособности АТО...20	
1.4 Обзор автомобильных систем диагностики неисправностей и мониторинга работоспособности.....	32
1.5 Концепция создания электротехнической системы мониторинга работоспособности ЭКЭП АТО .....	35
1.6 Цели и задачи диссертационного исследования .....	41
2 Анализ и разработка электротехнической системы мониторинга работоспособности ЭКЭП АТО по критерию сопротивления изоляции шин электропитания.....	46
2.1 Анализ существующих и перспективных проектов АТО с точки зрения разработки и реализации системы мониторинга работоспособности ЭКЭП...46	
2.2 Интеграция электротехнической системы мониторинга в обобщенный электротехнический комплекс АТО (ЭМБ, АКЭУ). Разработка электротехнической системы мониторинга работоспособности ЭКЭП АТО...48	
2.3 Метод оценки работоспособности электротехнического комплекса с использованием эталонного коммутируемого делителя, при разработке и реализации системы мониторинга ЭКЭП АТО .....	51
2.4 Расчетные методы разработки и реализации электротехнической системы мониторинга ЭКЭП АТО .....	54
2.5 Расчет падения напряжения на линии ЭКЭП АТО .....	60

2.6	Разработка функциональной схемы и алгоритма функционирования электротехнической системы мониторинга работоспособности ЭКЭП АТО.....	63
2.7	Выводы по главе 2.....	66
3	Математическое и имитационное моделирование электротехнической системы мониторинга работоспособности ЭКЭП АТО.....	68
3.1	Постановка задачи моделирования электротехнической системы мониторинга работоспособности ЭКЭП АТО .....	68
3.2	Математическое моделирование электротехнической системы ЭКЭП с питанием только от АКБ .....	69
3.3	Математическое моделирование электротехнической системы ЭКЭП с питанием от АКБ и отключенной СБ .....	78
3.4	Математическое моделирование электротехнической системы ЭКЭП с питанием от АКБ и СБ.....	90
3.5	Расчетная схема при двух источниках энергии – АКБ и СБ ( $U_{BC} < U_{BA}$ ) .....	95
3.6	Выводы по главе 3.....	100
4	Экспериментальное исследование электротехнической системы мониторинга работоспособности ЭКЭП АТО.....	102
4.1	Постановка задачи экспериментального исследования системы мониторинга работоспособности ЭКЭП АТО по критерию сопротивления изоляции шин электропитания .....	102
4.2	Реализация расчетного эксперимента с электротехнической системой мониторинга ЭКЭП АТО.....	103
4.3	Разработка и реализация технического решения системы мониторинга ЭКЭП АТО. Экспериментальные исследования функционирования реальной системы .....	108
4.4	Расчет переходного процесса в системе мониторинга ЭКЭП АТО.....	113
4.5	Оценка эффективности электротехнической системы мониторинга работоспособности ЭКЭП АТО.....	116
4.6	Выводы по главе 4.....	119

Заключение .....	120
Библиографический список.....	122
Список аббревиатур .....	133
Приложения .....	135
Приложение 1. Акт внедрения основных результатов научно-исследовательской работы в практику ПАО «КАМАЗ» .....	135
Приложение 2. Акт реализации положений и выводов диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук А.П. Новиковой .....	136
Приложение 3 Требования к процедуре измерений, обработки результатов и алгоритм оценки значений сопротивлений изоляции .....	138
Приложение 4 Элементы для аппаратной реализации системы мониторинга работоспособности ЭКЭП АТО.....	141
Приложение 5 Результаты расчетов значений сопротивлений изоляции .....	144

## ВВЕДЕНИЕ

### **Актуальность работы.**

Рассматривая перспективы развития мировой автомобильной промышленности, необходимо выделить программу создания автономного транспортного объекта (АТО) или беспилотного автомобиля. Данная программа является одной из наиболее важных, и по сути определяющих глобальный тренд в создании принципиально нового автотранспортного средства (АТС).

Активное развитие технологий проектирования и производства электропривода обеспечения движения, систем состоящих из мощных аккумуляторных батарей, а также соответствующих комплексов управления, уже привело к созданию электромобилей (ЭМБ) и автомобилей с комбинированной энергоустановкой (АКЭУ) [32,33], которые в настоящее время завоевывают мировые автомобильные рынки.

Сейчас можно говорить о начале использования на автомобильном транспорте солнечных батарей, что является следствием улучшения их технологичности, энергоемкости и надежности.

Электротехнические и электронные системы управления становятся одной из доминант в вопросах обеспечения эксплуатационной эффективности современных автомобилей [5]. В этом плане, в последние годы существенно развиваются технологии нечеткой логики программирования и инструменты интеллектуальных систем.

Таким образом, получается, что в настоящее время активно развиваются целые кластеры научно-технических направлений, интеграция которых в рамках концепции АТО обеспечивает создание принципиально нового продукта автомобилестроения [9,18].

Из всего выше сказанного следует, что электрооборудование и электроника получает важнейшую роль в иерархии автомобильных систем. Следовательно, задача обеспечения качества и надежности функционирования бортовой системы

электрооборудования приобретает особое звучание и новые горизонты актуальности.

В электромобилях, в силу различия систем питания разного напряжения, первоочередной задачей является обеспечение надежности и оценки работоспособности электротехнического комплекса электропитания (ЭКЭП), по критерию сопротивления изоляции. Важность выделенной задачи определяется наличием соответствующих отказов ЭМБ, АКЭУ и традиционных АТС [5], следствием которых является в лучшем случае обездвиживание транспортного средства, а в худшем его возгорание, то есть такие отказы на прямую влияют на безопасность эксплуатации АТС. Выделенная задача в космической и авиационной отраслях уже решалась [54,66], но в автомобильной промышленности, она по сути не решена.

Значимость проблемы мониторинга работоспособности АТО, подтверждается пунктами Федеральной программы «Долгосрочные приоритеты в прикладной науке России от 2013г», а также формируемой в РИНКЦЭ Минобрнауки РФ программы «Новые приоритеты направления развития», подраздел «Транспортные и космические системы».

### **Степень разработанности проблемы**

Основными в области разработки, исследования и реализации систем мониторинга ЭКЭП АТО являются работы Лачина В. И., Бородянского М.Е., Бородянского И.М., Соломенцева Ю. М., Краснобаева Ю.В., Серебрякова В.В., Абрамова И.И., Ванина В.К., Дунаева Б.Д., Капля Э.И., Кичаева В.В., Кононова С.В., Малафеева С.И., Марковской О.А., Покрашенко А.И., Серебренникова Н.В., Савельева В.А., Слезкина С.Н., Фейгина Л.З, Fisher R.A., Sghleif F.R., Curdts E..В. и др. Одним из основоположников теории разработки систем мониторинга работоспособности автономных объектов является Высоцкий В.Е.

В последние десятилетия, вскрытая проблема активно разрабатывается лидерами автомобильных и компонентных кластеров, такими как Fiat, Audi, Volkswagen, Bosh [83,84].

На основании вышеизложенного определены цель и задачи научного исследования.

**Целью диссертационной работы** является повышение эффективности функционирования энергосистемы автономного транспортного объекта на основе мониторинга сопротивления комплекса электропитания.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие основные задачи:

1. Провести анализ электротехнических систем мониторинга ЭКЭП, для выбора наиболее эффективных из них при разработке, реализации и обслуживании АТО.

2. Разработать методику и алгоритм мониторинга сопротивления ЭКЭП с реализацией оценки критического состояния АТО.

3. Разработать математические и имитационные модели, реализующие метод и алгоритм электротехнической системы мониторинга АТО.

4. Провести параметрический синтез электротехнической системы мониторинга ЭКЭП.

5. Предложить техническую реализацию электротехнической системы мониторинга работоспособности ЭКЭП АТО.

**Объектом исследования** является электротехнический комплекс электропитания автономного транспортного объекта.

**Предмет исследования** – качество и стабильность функционирования энергосистемы ЭКЭП автономного транспортного объекта на основе предлагаемых методов, моделей и алгоритмов управления.

### **Методы решения**

В работе приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований, полученных с использованием теории линейных электрических цепей, методов математического и имитационного моделирования, а также теории измерений. Исследования были проведены с использованием математических пакетов MATLAB и Electronic Workbench . Имитационное моделирование было проведено в программой среде Simulink. Экспериментальные данные были

получены методом активного эксперимента при использовании теории планирования эксперимента. Результаты и выводы работы теоретически обоснованы и подтверждены расчетами и экспериментами.

### **Научная новизна**

1. Предложена концепция решения сложной научно-технической задачи по мониторингу работоспособности ЭКЭП АТО.

2. Разработана методика и алгоритм мониторинга сопротивления изоляции ЭКЭП с оценкой критического состояния АТО, реализуемые на схемах с эталонным и коммутируемым делителями напряжения.

3. Проведен параметрический синтез и спроектированы математическая и имитационная модели электротехнической системы мониторинга сопротивления изоляции, учитывающие конфигурацию и структуру ЭКЭП, а также влияние характеристик и тип первичных источников электроэнергии.

4. Предложена техническая реализация системы мониторинга работоспособности ЭКЭП АТО по критерию сопротивления изоляции шин электропитания.

### **Практическая значимость результатов работы.**

- Разработан комплекс унифицированных математических программ расчета параметров электротехнической системы мониторинга системы электропитания, который в процессе проектирования, эксплуатации, технического обслуживания позволяет оперативно проводить корректировку параметров цепей контроля.
- Даны рекомендации по выбору процедуры мониторинга работоспособности ЭКЭП АТО, а также параметров измерительных цепей и предвключенных элементов.
- Разработана методика выбора электротехнических схем контроля работоспособности ЭКЭП АТО исходя из требований к проектируемым аппаратным средствам.

**Достоверность** обеспечивается применением строгих математических методов исследований и подтверждается удовлетворительной сходимостью результатов, полученных при компьютерном моделировании в пакетах прикладных программ MATLAB и Electronic Workbench, а также результатами экспериментальных исследований.

Обоснованность и достоверность положений и выводов диссертации подтверждена положительными результатами внедрения работы в производственные организации ОАО РКЦ «Прогресс» и ПАО «КАМАЗ».

### **Реализация результатов работы**

Основные практические и теоретические результаты работы, реализованы при выполнении НИР ОКР 348/14 «Разработка методики и алгоритмов контроля сопротивления изоляции по шинам питания и математическое моделирование», которые проводились совместно с ОАО РКЦ «Прогресс» (г. Самара) и непосредственном участии автора.

Разработанные математические программы, а также имитационные модели, построенные на их основе, а также схемотехнические решения системы мониторинга работоспособности АТО, прошли апробацию и внедрены в практику ПАО «КАМАЗ», что подтверждается актом внедрения.

### **Апробация работы**

Основные положения работы доложены и обсуждены: на VIII Международной научно-технической конференции по автоматизированному электроприводу АЭП – 2014, Саранск; на VI Международной молодежной научно-технической конференции «Энергетика глазами молодежи»-2015, Иваново; на XIX Международной научно-технической конференции. Научное обозрение физико-математических и технических наук в XXI веке-2015, Москва; на научных семинарах кафедры «Теоретическая и Общая электротехника» Самарского Государственного Технического Университета.

**Связь работы с научными программами, темами, грантами.** Проведенные исследования являются частью научно-исследовательских и проектных работ, которые проводятся совместно с ОАО РКЦ «Прогресс» (г.

Самара) и реализованы в виде рекомендаций при создании систем мониторинга работоспособности космических аппаратов.

### **Публикации**

По теме диссертации опубликованы 9 печатных работ, в том числе 5 статей в ведущих изданиях из перечня ВАК РФ.

### **На защиту выносятся:**

1. Методика разработки и алгоритм функционирования электротехнической системы мониторинга ЭКЭП с оценкой критического состояния АТО.
2. Комплекс программно-технических решений реализации системы мониторинга работоспособности ЭКЭП АТО.
3. Методика параметрического синтеза электротехнической системы мониторинга ЭКЭП АТО.
4. Результаты расчетных и экспериментальных исследований.

### **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка и приложения. Основная часть работы изложена на 162 странице машинописного текста, иллюстрирована 57 рисунками, 72 формулами и 21 таблицей. Библиографический список содержит 93 наименований на 11 страницах. Приложения включают два акта внедрения научных результатов.

### **Содержание работы**

**Во введении** обоснована актуальность диссертационной работы; определены цель и задачи; отражена степень разработанности проблемы; изложены научная новизна и практическая ценность; сформированы основные положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** диссертационного исследования является обзорной. Материал главы посвящен анализу состояния разработок и определению перспектив развития электротехнических систем мониторинга работоспособности ЭМБ, АКЭУ, АТО.

Производится математическое моделирование перспективных вариантов, определенных из патентного анализа разработок в данной области, для определения достоинств и недостатков каждого из методов. На основе полученных результатов предлагается концепция нового научно-технического решения задачи мониторинга ЭКЭП АТО.

**Во второй главе** проведен анализ существующих и перспективных проектов ЭМБ, АКЭУ, АТО с точки зрения разработки и реализации электротехнической системы мониторинга ЭКЭП. Предложен метод мониторинга работоспособности ЭКЭП, разработана функциональная схема соответствующей электротехнической системы и проведено ее техническое обоснование.

Предложена функциональная электрическая схема электромотоцикла с соответствующей системой мониторинга ЭКЭП АТО. На основе научно-технической концепции мониторинга работоспособности ЭКЭП по критерию сопротивления изоляции, предлагается подход, заключающийся в контроле напряжения между шинами питания и корпусом, при различном состоянии ключей S.

Составлена схема замещения ЭКЭП АТО с интеграцией в ее структуру электротехнической системой мониторинга сопротивления изоляции.

**Третья глава** посвящена решению задачи по разработке и реализации комплекса математических и имитационных моделей электротехнической системы мониторинга работоспособности ЭКЭП АТО по критерию сопротивления изоляции.

В результате работы получен комплекс математических имитационных моделей системы мониторинга работоспособности ЭКЭП АТО с учетом возможных конфигураций источников питания, а также режимов эксплуатации.

Сделаны выводы по результатам моделирования электротехнических систем мониторинга работоспособности ЭКЭП АТО.

**Четвертая глава** посвящена экспериментальной части работы. Представлены результаты расчетных и реальных экспериментальных

исследований разрабатываемой системы мониторинга. Дана оценка адекватности полученных моделей.

Для подтверждения достоверности полученных ранее результатов, в работе, дополнительно проведено исследование работы системы мониторинга, в среде *Electronics Workbench*.

Дана оценка эффективности метода и определены требования к электротехнической системе мониторинга работоспособности ЭКЭП с критической оценкой состояния АТО.

**Приложение** содержит дополнительные материалы по требованиям к процедуре мониторинга, обработке результатов и алгоритм оценки значений сопротивления изоляции, форматы ввода исходных данных. А также замечания о задержке времени при коммутации измерительных шунтов и рассмотрены элементы для разработки, аппаратной реализации и эксплуатации электротехнических систем мониторинга работоспособности ЭКЭП АТО по критерию сопротивления изоляции.

# 1 АКТУАЛИЗАЦИЯ ПРОБЛЕМЫ РАЗРАБОТКИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА ЭКЭП АТО

## 1.1 Проблема диагностики ЭКЭП АТО

Тенденции развития мировой автомобильной промышленности, сегодня, обусловлены рядом факторов, ключевым образом влияющих на проектно-технологический облик современных автотранспортных средств [32,92]:

1. ужесточение конкуренции требует, от автопроизводителей, решений связанных с оптимизацией цены и качества новых продуктов;

2. повышается роль инновационной составляющей компонентной базы автомобилей, как одной из основных в формировании потребительских свойств продуктов.

3. системное ужесточение экологических норм и требований по безопасности, толкает автопроизводителей, развивать соответствующие технологии.



Рисунок 1.1 - Тенденции развития современной автомобильной промышленности

Все вышеизложенное, обеспечивает развитие новых направлений автотранспортной тематики, связанных с активной интеграцией в автомобильный транспорт новых компонентов электрооборудования и электроники [32]. В перспективе, это приведет к замещению целого ряда автомобильных систем, соответствующим электрооборудованием. А комплекс бортового электрооборудования автомобиля превратится в наиболее значимый комплекс АТС (рис. 1.1).

Рассматривая экологические причины, на передний план выходит тенденция уменьшения вредных выбросов в окружающую среду, а также непосредственного сжигания кислорода (рис.1.2).

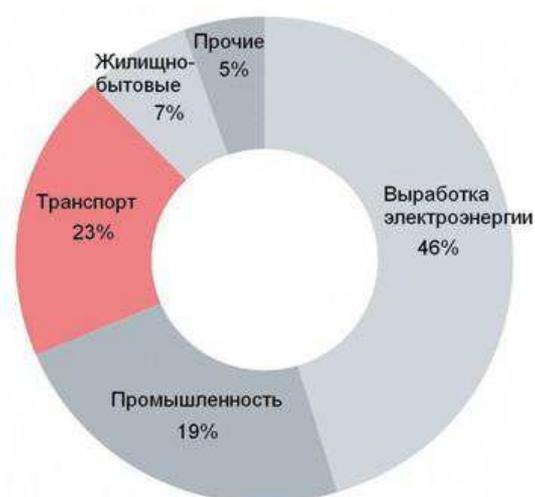


Рисунок 1.2 - Мировой выброс CO<sub>2</sub> по секторам



Рисунок 1.3 - Структура мировых выбросов CO<sub>2</sub> от транспортного сектора по данным ИЕА с 2011-2015 гг.

В свою очередь в структуре выбросов CO<sub>2</sub> от транспорта основную роль играют выбросы от легковых транспортных средств (43.3%) и выбросы от грузового транспорта (22.2%) (рис.1.3). Одним из решений в этом вопросе является совершенствование конструкций и рабочих процессов ДВС с применением комплексных электронных систем управления и нейтрализации отработанных газов [32,33]. В этом направлении при поддержке государства устанавливаются различные нормативы и стандарты, удерживающие применение расходного топлива в определенном коридоре. Так за время действия стандартов «Евро» с 1993 года количество вредных веществ в отработанных газах (ОГ) от автомобилей с ДВС снизилось более чем в 2 раза. Всего за последние 40 лет содержание токсичных компонентов в ОГ одного автомобиля уменьшилось на 70%. [24,86].

В нашей стране утверждена государственная программа «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности на период до 2020 года» (распоряжение Правительства РФ от 27.12.2010 г. №2446-р). В соответствии с целевыми индикаторами и показателями реализации подпрограммы «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности на транспорте» (Приложение №13) в 2012 г. доля легковых автомобилей с гибридной силовой установкой и электромобилей среди продаваемых новых автомобилей должна быть не менее 1,4% (не менее 35 000 шт. в год), а к 2020 г. увеличиться до 4,6% (138 000 шт. в год) [86].

Другим из решений поставленной задачи служит разработка, применение и внедрение альтернативной энергетики в автомобильной промышленности. Одной из дальних перспектив развития применения альтернативного вида топлива, служит водород, запасы которого практически неограниченны. К тому же по экологическим показателям автомобили с водородными двигателями имеют лидирующие позиции, благодаря чему может быть решена проблема токсичности отработавших газов, поскольку в результате сгорания водорода образуется вода. Однако, применение водорода сопряжено с энергетическими и экономическими

затратами на хранение, транспортировку и использование [65,88]. На сегодняшний день состояние вопроса таково, что говорить о скором применении водорода, не представляется возможным.

Конструкторско-технологический скачок в сфере технологии в области разработок высокоэнергетических материалов, используемых в качестве тяговых батарей (ТАБ), и тяговых электродвигателей (ТЭ), привел к созданию экологически безопасного, городского, бесшумного транспорта- перспективных электромобилей (ЭМБ) и автомобилей с комбинированной энергоустановкой (АКЭУ). Подробно об этих перспективных видах транспорта рассказано и рассмотрено в трудах [33, 32,73]. Развитие технологий в вопросах проектирования, производства, а также разработок применения солнечных батарей в автомобильной промышленности, а также быстрый рост электронных систем управления в том числе, дистанционных в виде систем GPS и Глонасс способствуют созданию инновационного продукта - автономного транспортного объекта (АТО) или беспилотного автомобиля.



Рисунок 1.4 - Необходимость внедрения электротехнической система мониторинга работоспособности ЭКЭП АТС

Разработка беспилотных автомобилей уже не первый год является мейнстримом в автомобильной отрасли. Над созданием полностью автономных машин работают Volkswagen, General Motors, Toyota, Daimler, Volvo, BMW и

другие крупнейшие мировые концерны. В России подобные технологии наиболее активно развивает «КАМАЗ» [72,92,93]. В 2015 году производитель грузовиков объявил о разработке беспилотного самосвала, а в 2016-м партнер ПАО «КАМАЗ» — компания Cognitive Technologies — испытала на полях Татарстана прототип беспилотного трактора. Помимо «КАМАЗ» в дорожной карте фигурируют и другие крупные российские производители: группа ГАЗ, «АВТОВАЗ», УАЗ (входит в «Соллерс»)[76].

Ужесточение конкуренции между автопроизводителями, требует сокращения времени вывода на рынок новых продуктов [77,79], при одновременном обеспечении высокого уровня качества и приемлемости стоимости, а также соответствующей организации процессов в сервисе. При этом, практика показывает, что качество и надежность автомобилей от отечественного производства еще далеки от соответствующих показателей иностранных конкурентов. При этом, исходя из решаемых в работе научно-технических задач, более подробно следует рассмотреть комплекс электрооборудования. И здесь, анализ уровня отказов в эксплуатации современных автомобилей российского производства, по основным системам, по данным за 2011-2015гг. показал, что на систему электроснабжения приходится около 32 % неисправностей от общего числа отказов [74].

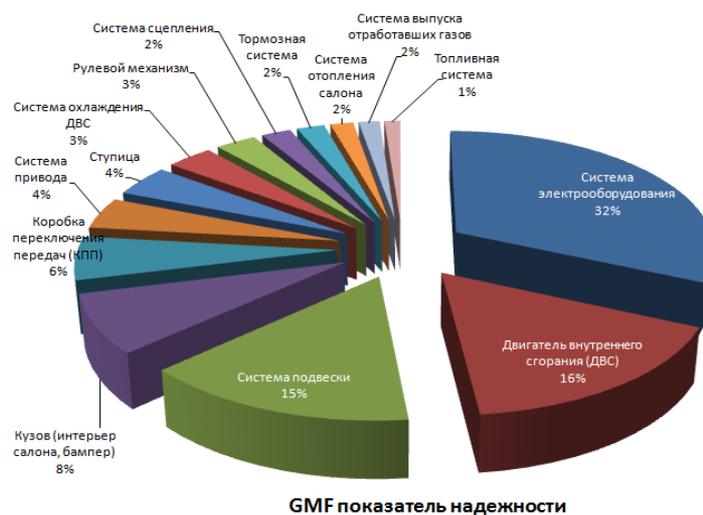


Рисунок 1.5- Анализ уровня отказов в эксплуатации современных автомобилей российского производства, по основным системам, по данным за 2011-2015г.г.

При всем при этом, с учетом требований инновационности современного АТС, следует подчеркнуть, что технические объекты электрооборудования и электроники, как раз являются основными в вопросах улучшения свойств автомобилей. Но с учетом недостаточной надежности, отечественной компонентной базы электрооборудования и электроники, встает вопрос, связанный с обеспечением приемлемого уровня работоспособности, в том числе за счет разработки и реализации соответствующих систем диагностики [80].

Все вышеизложенное, свидетельствует о необходимости проведения работ, направленных на научно-техническую разработку вопроса создания перспективных систем мониторинга работоспособности электротехнического комплекса АТС.

## **1.2 Анализ техникий требований к системам электропитания электромобилей и автомобилей с комбинированной энергоустановкой**

Как было показано выше, развитие ЭМБ и АКЭУ связано с решением задач по повышению надежности и качества функциональности эксплуатации, по улучшению работоспособности соответствующих транспортных средств. В традиционных АТС, исторически, решена часть выделенных задач, по средством внедрения таких систем как: система диагностики ДВС, антиблокировочная система тормозов (ABS), антипробуксовочная система (ASR), система курсовой устойчивости (ESP/ESC/DSC), система распределения тормозных усилий (EBD/EBV) и многие другие [81]. Своевременно проведенная диагностика АТС позволит устранить причину неполадки, и возможно предложить лучший способ ее устранения. Именно от качества и надежности диагностического оборудования зависит точность полученных данных. Современное диагностическое оборудование условно разделяют по проверяемым системам: трансмиссия, тормозная система, силовой агрегат, подвески и колеса, система электропитания и многое другое. Одной из наиболее значимых систем диагностики, на наш взгляд,

в любом транспортном средстве, является система электрооборудования и электроники.

Однако, первичный анализ научно-технической информации показывает, что выявленная тенденция роста доли электрооборудования, при постоянном увеличении потребляемой мощности и все более ужесточающихся требованиях к системам электропитания, как на традиционных АТС, так и на перспективных системах ЭМБ, АКЭУ не подкрепляется адекватным системным решением комплексных задач по диагностике систем электрооборудования и электроники в общем и системы ЭКЭП в частности.

Одним из вопросов, требующих комплексного подхода при эксплуатации и проектировании ЭКЭП, является вопрос мониторинга работоспособности АТО по критерию сопротивление изоляции шин питания относительно корпуса в процессе электрических испытаний.

На сегодняшний день, при разработке и проектировании электромобилей и автомобилей с комбинированной установкой, в связи со сложностью компонентных элементов в системе электропитания, для надежности и безопасности функционирования автотранспортных, необходимо соблюдать существующие нормативы:

1. Измерительные кабели от литий-ионных аккумуляторов в тяговой аккумуляторной батарее (ТАБ) к блоку контроля и выравнивания напряжения (БКВН) должны иметь сечение провода не менее 0,35 мм [14].

2. Кабели должны иметь изоляцию, рассчитанную на напряжение не менее 500 В [12].

3. Силовые кабели должны иметь сечение не менее 50 мм<sup>2</sup> [11].

4. Напряжение пробоя изоляции не ниже 3кВ.

5. Силовые провода должны соединять аккумуляторные ящики, ящики с инвертором, инвертор с электродвигателем, преобразователь и зарядное устройство [10,13].

6. Измерительные провода должны соединять аккумуляторные ячейки, входящие в батарею, с аккумуляторной батареей.

7. При использовании в целях измерения напряжения при постоянном токе, значение которого равно номинальному напряжению тяговой батареи, сопротивление изоляции между любой незащищенной токопроводящей частью и каждым полюсом батареи составляет 500 Ом/В номинального напряжения.

8. Сопротивление при выравнивании потенциалов между любыми двумя незащищенными токопроводящими частями составляет не менее 0,1 Ом. Это испытание проводится при силе тока не менее 0,2 А [8,75,78].

При всем, при этом обозначенные выше задачи, не в полной мере способны решить проблему безотказности новых типов автотранспортных средств. Встает проблема организации комплекса диагностики работоспособности основных систем ЭМБ и АКЭУ [33,82,87]. Перспективная система диагностики должна решать комплекс задач по оценке работоспособности АТС и естественно должна создаваться на основе электротехнических и электронных компонентов, обеспечивающих высокое быстродействие и достоверность полученных данных.

Рассматривая существующие области мониторинга работоспособности АТС, можно вскрыть уже существующую компонентную базу: При этом, видно, что при высокой значимости обеспечения работоспособности шин питания, соответствующие элементы бортового электрооборудования АТС, системой диагностики не охвачены. Понимая, высокий уровень проблемы обеспечения исправной работы изоляции в условиях глобального развития технологий ЭМБ и АКЭУ [38], непрерывного расширения спектра электрооборудования в соответствующих комплексах АТС, вскрывается важная научно-техническая проблема создания электротехнической и электронной диагностической системы мониторинга работоспособности, с целью обеспечения высоких показателей надежности современных АТС.

### **1.3. Анализ методов решения проблемы мониторинга работоспособности АТО**

Система мониторинга работоспособности сопротивления изоляции шин ЭКЭП относительно корпуса предназначена для контроля сопротивления

изоляции шин электропитания при нормальном функционировании АТО. Процесс электрических испытаний АТО является неотъемлемой частью технологического процесса подготовки и ввода их в эксплуатацию [4]. В процессе электрических испытаний производится комплексная электрическая проверка ЭКЭП АТО в режиме имитации функционирования и проверка работоспособности отдельных бортовых систем АТО в соответствии с технологическими инструкциями.

Существенной составляющей при решении задач по подготовке к эксплуатации АТО является достижение высокой надежности и качества подготовки и проведения всех технологических операций при минимизации затрат на их выполнение. [10,59] Объективность оценки состояния АТО на различных стадиях жизненного цикла обеспечивается испытательным оборудованием и контрольно-испытательной аппаратурой.

Первостепенной задачей при решении рассматриваемой проблемы является реализация в аппаратно-программных средствах, возможности для измерения сопротивления изоляции шин ЭКЭП относительно корпуса в реальном времени, а также возможности реализации автоматизированного контроля. В этом случае значительно сокращается действие фактора человеческих ошибок, сокращаются сроки проведения испытаний, а также повышается их качество.

Необходимость непрерывного мониторинга работоспособности электропитания ЭКЭП при проведении электрических испытаний связана с обеспечением надежности проводимых испытаний, а также с предотвращением выхода из строя ЭКЭП при возникновении замыкания шины питания на корпус. Процесс непрерывного контроля сопротивления изоляции позволяет выявить и оценить факт ухудшения качества изоляции, что необходимо для своевременного предотвращения отказов и неисправностей бортовых систем АТО.

Проблема системы мониторинга работоспособности ЭКЭП АТО связана с тем, что в контролируемых цепях присутствует постоянное напряжение, что не позволяет использовать классические методы измерения сопротивления изоляции связанные с подключением к контролируемым цепям источника опорного напряжения и измерением тока утечки изоляции. Система мониторинга должна

оказывать минимальное воздействие на объект контроля, т.е. в процессе проведения испытаний она не должна вносить в контролируемые цепи какие-либо посторонние сигналы и помехи, которые могут повлиять на работу систем АТО, а также на результаты испытаний.

Проведенный патентный анализ (за последние 20 лет) по вопросам теории, прикладным аспектам разработки и внедрения электротехнических систем мониторинга работоспособности транспортных объектов показал, что на данный момент существуют несколько методов мониторинга работоспособности АТС.

Анализ научных материалов по области объекта исследования показал, что методы и способы мониторинга сопротивления системы электропитания в значительной степени разработаны для космических аппаратов в работах: Лачина В. И., Бородянского М.Е., Бородянского И.М., Соломенцева Ю. М., Краснобаева Ю.В. Для летательных аппаратов в трудах: Серебрякова В.В, Абрамова И.И., Ванина В.К., Дунаева Б.Д., Капля Э.И., Кичаева В.В., Кононова С.В., Малафеева С.И., Марковской О.А., Покрашенко А.И., Серебренникова Н.В., Савельева В.А., Слезкина С.Н., Фейгина Л.З.

Более глубоко вопросы разработки и исследования мониторинга работоспособности в автотранспортных средствах изучаются в работах авторов С.В. Акимова, В.А. Балагурова, В.В. Болотина, Ю.А. Купеева, Б.И. Петленко, В.Е. Ютта, Fisher R.A., Sghleif F.R., Curdts E.B.

Первичный анализ выделенных подходов, проведенный с целью выбора наиболее перспективных из них для организации системы мониторинга, показывает некоторую неочевидность предпочтений при рассмотрении каждого из методов по отдельности. Например, при реализации системы на основе мостовых методов, возникают проблемы с быстродействием и значительной погрешностью оценки работоспособности комплекса. Динамический метод обладает важным достоинством – простотой реализации технических решений, но при этом у него те же недостатки, что и у мостовых методов.

Рассматривая методы непосредственной оценки работоспособности, к указанным выше недостаткам добавляется еще и сложность технической

реализации, а также необходимость введения компенсационного источника в систему, что делает невозможным применение данной группы методов.

Множество предложенных технических принципов и устройств для измерения сопротивления изоляции шин питания относительно корпуса и токов утечки указывает на сложность задачи. Это свидетельствует и о том, что в настоящее время не создано универсальных средств с приемлемыми характеристиками для данного класса объектов - низковольтных разветвлённых цепей постоянного тока и, частности ЭКЭП АТО с двумя изолированными от корпуса шинами питания [18,41].

Необходимо отметить, что большинство методов оценивается качественно, и для них, как правило, отсутствуют количественные оценки и абсолютные значения погрешностей и быстродействия. Это подтверждается и отсутствием аналитически выверенных методик для оценки погрешностей при подсчете сопротивлений по измеренным данным. Кроме того, функционал перечисленных методов не решает задачу оценки критического состояния АТО. С этой целью производилось имитационное моделирование ЭКЭП метода эталонного делителя напряжения (рис. 1.6) [34,37], путем интеграции в его структуру соответствующей схемы контроля работоспособности АТО, в программной среде Electronic Workbench [40,71]. Помимо этого имитационное моделирование проводилось при различных значениях  $R_d=100\text{кОм}$ , и  $R_d=640\text{кОм}$ , чтобы определить оптимальное значение сопротивления делителя при котором, погрешность измерений будет минимальной.

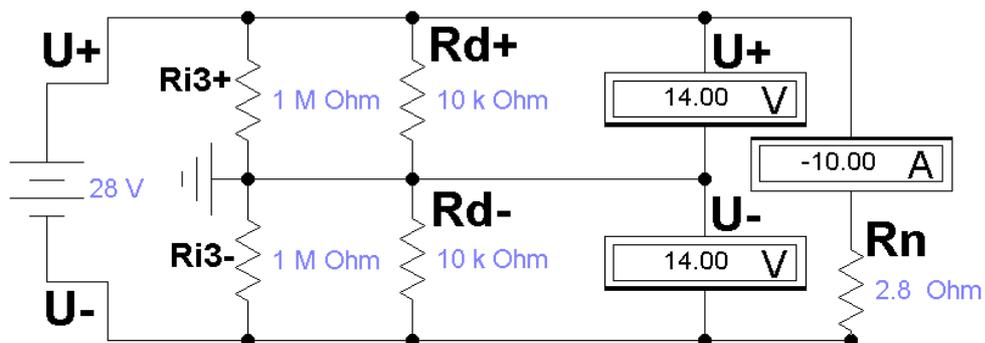


Рисунок 1.6- Модель системы МЭД одного луча радиальной ЭКЭП при симметрии сопротивлений  $R_{из.+}$  и  $R_{из.-}$ ,

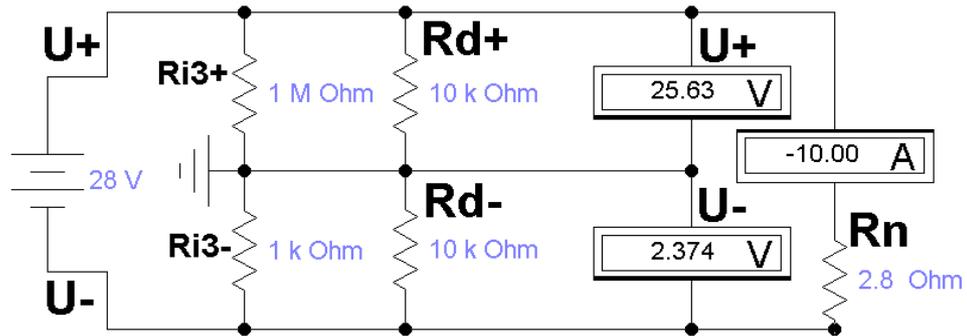


Рисунок 1.7- Модель системы МЭД одного луча радиальной ЭКЭП при асимметрии сопротивлений  $R_{из+}$  и  $R_{из-}$

На рисунках 1.6 и 1.7  $R_d$  - сопротивления делителя напряжения ( $R_{d+} = R_{d-}$ ),  $R_{из}$  - сопротивление изоляции между корпусом и шинами питания,  $R_n$  - сопротивление нагрузки с номинальным током 10 А.

При этом по заниженному показанию одного из вольтметров  $V_+$  или  $V_-$  можно определить неисправную шину, а, кроме того, по степени шунтирования плеч делителя  $R_{дел+}$  и  $R_{дел-}$  и её эквивалентное сопротивление изоляции относительно корпуса. Вольтметры  $V_+$  и  $V_-$  (рис. 1.7) показывают, что неисправность находится в шине питания «-», т. к.  $R_{из-}$  меньше, чем  $R_{из+}$ . Чем больше эквивалентное сопротивление изоляции  $R_{из}$  относительно корпуса, тем меньше оно шунтирует соответствующее плечо делителя  $R_{дел+}$  или  $R_{дел-}$  и тем больше напряжение на этом плече приближается к  $E/2$ , а  $R_{из}$  относительно корпуса приближается к принятому для штатного режима ЭКЭП  $R_{из-} = R_{из+} = 1$  Мом [36]. Если ЭКЭП функционирует нормально, то шунтирование обоих плеч симметрично и показания обоих вольтметров  $V_+$  и  $V_-$  равны, при этом  $R_{из-} = R_{из+} = 1$  МОм. Эта степень шунтирования (или асимметрия напряжений плеч), пропорциональна эквивалентному сопротивлению изоляции  $R_{из}$  относительно корпуса и определяется отношением показаний вольтметров  $U_+$  и  $U_-$ , что исключает зависимость результата измерений от возможных изменений напряжения питания.

Сопротивление  $R_{из.экр}$  можно задать, как функцию отношения некоторых фиксированных (реперных) напряжений  $U_+$  и  $U_-$  в виде таблицы, на основе

данных, полученных из модельного эксперимента, проведённого в моделирующей среде Electronic Workbench (рис. 1.7) [39].

В результате моделирования получим точку зависимости  $R_{из.-} = f(U_+/U_-)$ . Задавая различные значения  $R_{из.-}$  в диапазоне от 100 Ом до 1 МОм (верхняя граница диапазона  $R_{из+} = R_{из-} = 1\text{МОм}$ ), получаем для каждого из них отношение напряжений  $U_+/U_-$  и строим всю зависимость  $R_{из.-} = f(U_+/U_-)$ , а затем и  $R_{из+} = f(U_-/U_+)$  для принятых сопротивлений плеч делителя ( $R_{d+} = R_{d-} = 640\text{ кОм}$ ). Эти сопротивления  $R_{d+}$  и  $R_{d-}$  определяют диапазон измерения сопротивления изоляции. Очевидно, что текущие значения напряжений  $U_+$  и  $U_-$ , измеренные вольтметрами для конкретных значений  $R_{из}$ , и, соответственно, отношения  $U_+/U_-$  не всегда будут совпадать с реперными. В этом случае как отношения  $U_+/U_-$ , так и значения  $R_{из.ЭКВ}$  контроллер рассчитывает с помощью линейной, либо круговой интерполяции. Смоделируем зависимость  $R_{из.ЭКВ} = f(U_+/U_-)$  для следующих параметров измерительной схемы (таблиц 1.1,1.2).

Таблица 1.1- Зависимость  $R_{из-} = f(U_-/U_+)$  для сопротивлений делителя  $R_{d+} = R_{d-} = 100000\text{ Ом}$  с учётом  $R_{вх} = 9880,952\text{ Ом}$  АЦП (шунтируется  $R_{d-}$ )

№ эксперимента	Значение напряжения на «+» шине $U_+$ , В	Значение напряжения на «-» шине $U_-$ , В	Отношение напряжений, $U_+/U_-$	Значение сопротивления изоляции $R_{из.ЭКВ}$ , Ом
1	27,72	0,2826	98,089	100
2	26,69	1,308	20,405	500
3	25,61	2,393	10,702	1000
4	24,69	3,309	7,4615	1500
5	22,64	5,37	4,216	3000
6	20,88	7,121	2,9322	5000
7	18,54	9,456	1,96066	10000
8	15,90	12,10	1,314	30000
9	15,18	12,82	1,1841	50000
10	14,59	13,41	1,088	100000
11	14,07	13,93	1,01	500000
12	14,00	14,00	1,00	1000000

В результате имитационного моделирования установлена необходимость применения в качестве делителя величины  $R_d=640$  кОм [7,16,35].

Таблица 1.2- Зависимость  $R_{из-} = f(U-/U_+)$  для сопротивлений делителя  $R_{d+} = R_{d-} = 640$  кОм(шунтируется  $R_{d-}$ )

№ эксперимента	Значение напряжения на «+» шине $U_+$ , В	Значение напряжения на «-» шине $U_-$ , В	Отношение напряжений, $U_+/U_-$	Значение сопротивления изоляции $R_{из.экв-}$ , Ом
1	27,94	0,064	436,56	100
2	27,68	0,3149	87,90	500
3	27,38	0,6163	44,426	1 000
4	26,42	1,577	16,753	3 000
5	25,37	2,629	9,650	5 000
6	23,56	4,441	5,3051	10 000
7	21,52	6,478	3,332	20 000
8	18,09	9,908	1,8258	50 000
9	16,29	11,71	1,39	100 000
10	14,73	13,27	1,11	300 000
11	14,30	13,70	1,044	500 000
12	14,00	14,00	1,00	1000000

Результаты оценки погрешности в методе эталонного делителя представлены в таблице (1.3), где измерения  $R_{из.}$  при следующих значениях сопротивлений  $R_{из.+}$  и  $R_{из.-}$ , а также при их фиксированном отношении  $R_{из.+}/R_{из.-} = 0,5$ .

В приведённом примере  $R_{вх}$  - входное сопротивление вольтметра  $V_1$  принято равным 20 мОм. На основании моделирования разработана функциональная схема прибора для мониторинга работоспособности ЭКЭП АТО, по критерию сопротивление изоляции.

Достоинством данной модели является простота конструкций и быстрота измерений, а также возможность применения данной модели при различных значениях источника. Однако у данного метода есть и недостатки. Существенным недостатком является большая погрешность измерений, а также продолжительность цикла измерения сопротивлений изоляции.

Таблица. 1.3-Результаты оценки погрешности в методе эталонного делителя

№ эксперимента	Значение сопротивления изоляции, $R_{из.ЭКВ+}$ , кОм	Значение сопротивления изоляции, $R_{из.ЭКВ-}$ , кОм	Относительная погрешность, $\Delta$ %
1	1	2	2,22
2	10	20	2,23
3	50	100	2,3
4	100	200	2,33
5	500	1000	2,73
6	1000	2000	3,2
7	5000	10000	6,7
8	10000	20000	10

Предложен и рассмотрен модифицированный метод мониторинга работоспособности ЭКЭП с эталонным делителем в диагонали [37]. Проводилось имитационное моделирование (рис.1.8) моделей системы мониторинга работоспособности ЭКЭП АТО при симметрии и асимметрии значений сопротивления изоляции.

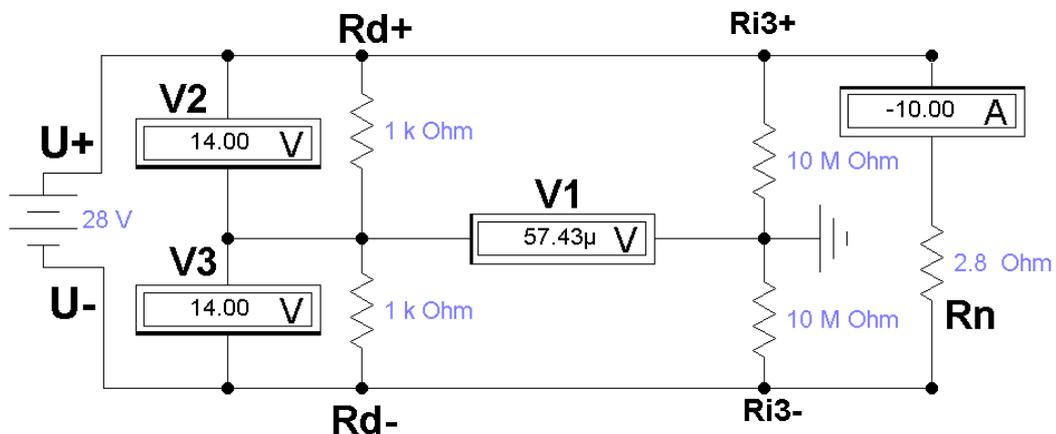


Рисунок 1.8- Модель системы мониторинга работоспособности АТО одного луча радиальной ЭКЭП при симметрии  $R_{из+}$  и  $R_{из-}$ .

Принцип действия данной модели, подробно рассмотрен в [19,20,37] и заключается в следующем, низкоомные сопротивления эталонного делителя  $R_{d+} = R_{d-}$  создают искусственный ноль между шинами питания  $U_-$  и  $U_+$ . Искусственный ноль между шинами питания  $U_-$  и  $U_+$  сохраняется независимо от режима схемы, т.е. от величины сопротивлений изоляции  $R_{из+}$  и  $R_{из-}$  между шинами питания и

корпусом. Поэтому при равенстве  $R_{из+}$  и  $R_{из-}$  вольтметр  $V1$  покажет ноль (рис.1.8) (на модели-десятки микровольт), а вольтметры  $V2$  и  $V3$  напряжения на сопротивлениях эталонного делителя. При асимметрии  $R_{из.ЭКВ+}$  и  $R_{из.ЭКВ-}$  потенциал корпуса смещается относительно искусственного нуля, т.к. определяется величинами сопротивлений изоляции  $R_{из.+}$  и  $R_{из.-}$  так, как это показано на модели рис.1.9.

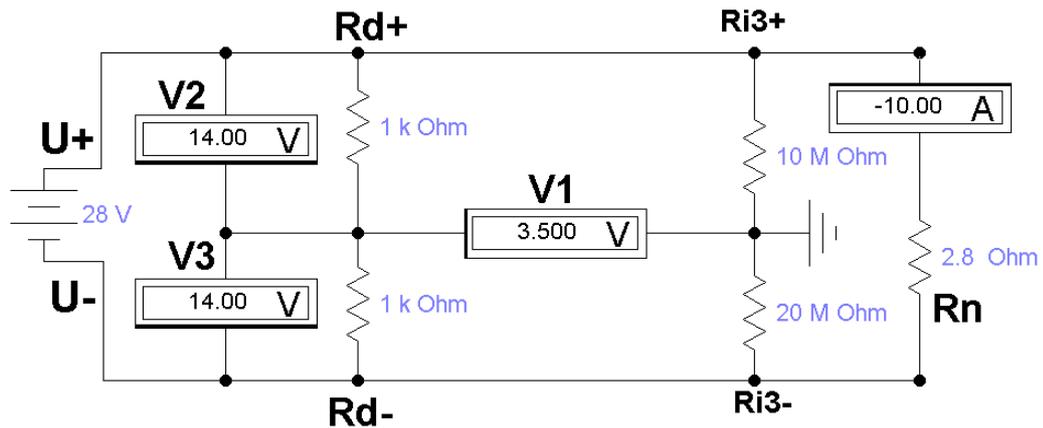


Рисунок 1.9- Модель системы мониторинга работоспособности АТО одного луча радиальной ЭКЭП при асимметрии  $R_{из+}$  и  $R_{из-}$ .

Очевидно, что вольтметр  $V1$  покажет полуразность между напряжениями на сопротивлениях изоляции  $R_{из.+}$  и  $R_{из.-}$ . Далее контроллер по знаку показаний вольтметра  $V1$  определяет неисправную шину, а по величине показаний её сопротивление относительно корпуса с помощью полученной из модели градуировочной таблицы  $R_{из.} = f(2U_{V1})$ .

На основе имитационного моделирования составлена схема замещения (рис.1.10)

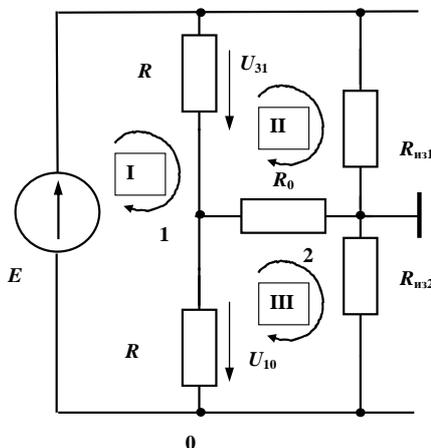


Рисунок 1.10- Упрощенная идеализированная схема замещения

На рисунке 1.10  $R$ -сопротивления низкоомного делителя,  $R_0$ -сопротивление делителя в диагонали,  $E$ -напряжение источника,  $R_{из1}$ ,  $R_{из2}$ -сопротивления изоляции.

В представленной схеме сопротивления  $R$  (2 шт.),  $R_{из1}$ ,  $R_{из2}$  образуют мост, к одной из диагоналей питания подключен источник напряжения  $E$ , в другую диагональ включен коммутируемый резистор  $R_0$ , для которого могут быть заданы два различных значения сопротивления. На этом этапе значения сопротивлений шин, внутреннего сопротивления источника питания приняты пренебрежимо малыми, потому ветвь, содержащую нагрузку, можно не рассматривать.

Уравнения по методу контурных токов [16,21] для рассматриваемой упрощенной схемы метода эталонного делителя в диагонали имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} R_{11} \cdot I_{11} - R_{12} \cdot I_{22} - R_{13} \cdot I_{33} &= E, \\ -R_{21} \cdot I_{11} + R_{22} \cdot I_{22} - R_{23} \cdot I_{33} &= 0, \\ -R_{31} \cdot I_{11} - R_{32} \cdot I_{22} + R_{33} \cdot I_{33} &= 0, \end{aligned} \quad (1.1)$$

где  $R_{11}=2R$ ,  $R_{22}=R+R_0+R_{из1}$ ,  $R_{33}=R+R_0+R_{из2}$ ,  $R_{12}=R_{21}=R$ ,  $R_{13}=R_{31}=R$ ,  $R_{23}=R_{32}=R_0$ .

Можно записать систему уравнений типа (1.1) для двух значений сопротивлений резисторов  $R_{01}$ ,  $R_{02}$ . Система уравнений содержит переменные, значения которых  $R_{из1}$ ,  $R_{из2}$  подлежат определению с использованием результатов измерений на объекте. Примем, что для каждого из режимов подлежат измерению напряжения  $U_{10}$ ,  $U_{21}$ ,  $U_{31}$ . Тогда для контуров II, III можно записать уравнения

$$\begin{aligned} R_{из1} \cdot I_{22} + U_{21} - U_{31} &= 0, \\ R_{из2} \cdot I_{33} - U_{10} - U_{21} &= 0, \end{aligned} \quad (1.2)$$

выражения для значений сопротивлений изоляции примут следующий вид:

$$R_{из1} = \frac{d_1 \cdot s_2 \cdot R_{01} - k \cdot d_2 \cdot s_1 \cdot R_{02}}{s_2 U'_{21} - k \cdot s_1 \cdot U''_{21}}, \quad (1.3)$$

$$R_{из2} = \frac{d_2 \cdot s_1 \cdot R_{01} - k \cdot d_1 \cdot s_2 \cdot R_{02}}{k \cdot d_1 \cdot U''_{21} - d_2 \cdot U'_{21}}, \quad (1.4)$$

где  $d_1=U'_{31} - U'_{21}$ ,  $d_2=U''_{31} - U''_{21}$ ,  $s_1=U'_{10} + U'_{21}$ ,  $s_2=U''_{10} + U''_{21}$ ,  $p=R_{01}/R_{02}$ .

Знаками (', ''), индексами 1, 2 обозначены переменные и их комплексы для режимов с резисторами  $R_0 = R_{01}$ ,  $R_0 = R_{02}$  соответственно.

Моделирование в MS Excel [22,23] при различных сочетаниях значений параметров схемы подтвердило правильность расчетных соотношений. Значительным разбросом значений сопротивлений резисторов и изоляции шин питания обусловлено существенное различие значений элементов матриц уравнений контурных токов, обратных матриц. В табл. 1.4 приведен пример расчета для схемы рисунка 8 с использованием формул (1.3-1.4).

Таблица 1.4.-Результаты моделирования для схемы с коммутируемым резистором в диагонали.

Без учета сопротивлений линии и источника

КОМ	R	R <sub>01</sub>	R <sub>02</sub>	R <sub>из1</sub>	R <sub>из2</sub>	E
	10,0	5,0	10,0	200,0	1 000,0	28,0

	20,0	-10,0	-10,0	28,0		
	-10,0	215,0	-5,0	0,0		
	-10,0	-5,0	1015,0	0,0		
R <sub>01</sub>	0,05146	0,00241	0,00052	I <sub>11</sub> = 1,4409		U <sub>10</sub> = 14,264
	0,00241	0,00476	0,00005	I <sub>22</sub> = 0,0674		U <sub>21</sub> = 0,264
	0,00052	0,00005	0,00099	I <sub>33</sub> = 0,0145		U <sub>31</sub> = 13,736

	20,0	-10,0	-10,0	28,0		
	-10,0	220,0	-10,0	0,0		
	-10,0	-10,0	1020,0	0,0		
R <sub>02</sub>	0,05144	0,00236	0,00053	I <sub>11</sub> = 1,4405		U <sub>10</sub> = 14,257
	0,00236	0,00466	0,00007	I <sub>22</sub> = 0,0661		U <sub>21</sub> = 0,514
	0,00053	0,00007	0,00099	I <sub>33</sub> = 0,0148		U <sub>31</sub> = 13,743

p	d <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>	s <sub>1</sub>	s <sub>2</sub>
0,500	13,472	13,229	14,528	14,771

R <sub>из1</sub> =	<b>200,00</b>
R <sub>из2</sub> =	<b>1000,00</b>

К достоинствам данного метода относится простота конструкции и точность измерения сопротивления изоляции. Однако есть и недостатки:

1. Высокие требования к входному сопротивлению вольтметра  $V_1$  (20 мОм и более), т.к. чем ниже входное сопротивление вольтметра  $V_1$ , тем больше погрешность измерения за счёт электрической связи между искусственным нулём и корпусом и тем больше эффект шунтирования  $R_{из.}$  сопротивлениями образцового делителя  $R_d$ .

2. Неравномерность распределения погрешности по диапазону измерения  $R_{из.}$  (чем выше сопротивление изоляции, тем больше погрешность измерения).

На основе имитационного моделирования [61] и результатов проведенных расчетов представим анализ предложенных методов по различным критериям.

Таблица 1. 5 -Анализ методов мониторинга работоспособности ЭКЭП АТО по критерию сопротивление изоляции

Наименование параметра	МЭД, $R_d=100$ кОм	МЭД, $R_d=640$ кОм	ММСКРД
Оценка погрешности измерений	-	+	-
Продолжительность цикла измерения сопротивлений изоляции	-	-	-
Наличие перечня критических требований к аппаратуре и комплектующим элементам для реализации	+	+	-
Возможность работы в эксплуатационном режиме с подключенным АФ	+	+	+
Возможность работы в эксплуатационном режиме с отключенным АФ	+	+	+
Возможность работы в отладочном режиме	+	+	+

Сводная таблица, определяющая достоинства и недостатки методов, вскрытые в ходе имитационного моделирования ЭКЭП, показывает, что наиболее эффективное научно-техническое решение задачи разработки и реализации

электротехнической системы мониторинга работоспособности АТО находится в области применения группы динамических методов, включающих МЭД. Однако для повышения эффективности мониторинга, требуется решение задачи по обеспечению быстрой реакции процесса мониторинга, а также комплексного учета оценки отражающей критическое состояние АТО.

Таким образом, можно сделать вывод, заключающийся в необходимости интеграции известных методов и подходов в рамках научно-технической концепции метода мониторинга сложного электротехнического комплекса, к числу которых относится комплекс электропитания АТО.

#### **1.4 Обзор автомобильных систем неисправности и мониторинга работоспособности.**

На сегодняшний день в системах управления автомобилями все больше и больше применения находит электроника. Из-за того, что современный автомобиль является сложным комплексом, его диагностика в целом без специализированных средств, в том числе и анализа работоспособности электронных систем управления, может быть не достаточно полной.

Существует три основных категории средств для диагностирования технического состояния электронных систем управления.

1. стационарные (стендовые) диагностические системы;
2. бортовое диагностическое программное обеспечение;
3. бортовое диагностическое программное обеспечение, для доступа к которому требуется специальное дополнительное считывающее устройство.

Стационарные (стендовые) диагностические системы. Подключение данных систем к бортовым электронным блокам управления отсутствует, в связи с чем, их работа не зависима от бортовых диагностических систем самого автомобиля. Их назначение, это диагностика отдельных механизмов и узлов двигателя, а также системы зажигания, поэтому их еще называют мотор-тестерами. [74]. Мотор-

тестер можно разделить на три части 1) датчики, 2) блок обработки информации, 3) блок визуализации результатов измерений получаемых сигналов. Соединение датчиков и регистраторов происходит через кабели с помощью зажимов и штекеров.

Мотор-тестеры выполняются на базе современных компьютеров со всеми необходимыми и вспомогательными органами управления. В комплектации присутствуют комплект проводов, стробоскопы и газоанализаторы выхлопных газов. Информация вводится в компьютер на основании полученных данных от анализатора, в состав которого входят аналогово-цифровые преобразователи, усилители и другие устройства первоначальной обработки сигналов [82]. Подключение анализатора к диагностируемым элементам происходит через штекеры с помощью комплекта проводов, подключаемых к аккумулятору и катушке зажигания.

Бортовое диагностическое программное обеспечение, определяет неисправность системы определенными кодами. Большинство автомобилей в мире снабженных данной системой имеют функцию считывание кодов неисправностей и оповещение с помощью индикации, например Check engine – проверь двигатель [81]. Данный вид бортового диагностирования является самым простым, суть его заключается в присвоении каждой неисправности свой код. После возникновения неисправности, соответствующей ей код заноситься в память электронного блока управления. Проведя определенные действия, коды можно визуализировать в виде длинных и коротких импульсов индикатора, после чего значения каждого сигнала можно расшифровать с помощью таблицы кодов ошибок.

Бортовые диагностические программы обеспечение, для доступа к которому требуется специальное дополнительное считывающее устройство. С данного программного обеспечения можно выполнить только специальным устройством называемым сканер. Параметры, которые контролируются и коды неисправности, считываются с электронного блока управления и распознаются предназначенными для этого сервисами. Прибором сканирования обычно

являются портативные компьютерные тестеры, с помощью которых происходит диагностирование электронных систем управления посредством снятия цифровых кодов с диагностического разъема автомобиля. Портативные сканеры обычно имеют небольшой размер, в связи с чем, имеют и не большой по размеру дисплей, поэтому считывать визуально полученную информацию не всегда удобно, в связи с чем, сканеры имеют возможность подключения к компьютеру через промежуточные порты. С помощью специального программного обеспечения можно просматривать полученные данные в табличном и графическом виде, а также сохранять и вести базу данных по техническому обслуживанию автомобиля.

Более широкими функциональными возможностями обладают специализированные сканеры, применяемые только для конкретной марки автомобиля. В связи с их узкой специализацией применение их ограничивается только лишь также специализированными автосервисами, ориентированными на определенные модели. Более широкое распространение получили сканеры, имеющие возможность диагностики систем впрыска, агрегатов и механизмов различных машин.

В памяти электронного блока управления находятся эталонные значения, которые в процессе работы автомобиля непрерывно сравниваются с текущими значениями. Кроме того, она отслеживает работоспособность исполнительных механизмов. Любые расхождения текущих параметров с эталонными, воспринимаются системой как неисправность каждая из которых имеет свой код. Более ранние диагностические системы могли распознать до 15 ошибок, возможности же современных систем позволяют им сравнивать одновременно до нескольких сотен кодов одновременно, тем самым выполнять функцию диагностики не только двигателя, но и других систем и агрегатов автомобиля, таких как автоматическая коробка передач, трансмиссия, и т.д.

Самодиагностика блоков управления позволяет регулировать зажигание, в автомобилях, где отсутствует нейтрализатор, есть возможность регулирования уровня оксида углерода в выхлопных газах. Также современные сканеры имеют

функцию так называемое тестовое диагностирование, то есть для проверки датчиков и реакции исполнительных механизмов в определенный момент подаются входные сигналы.

Сканеры фиксируют входные и выходные сигналы и информируют оператора об их величинах, тем самым он только лишь фиксирует и оповещает о наличии неисправности, в каком либо узле, но не выявляет причину ее возникновения.

Однако существующие системы самодиагностики не способны фиксировать критическое или предкритическое состояние АТО с приемлемой погрешностью и проводить мониторинг работоспособности ЭКЭП, по критерию сопротивления изоляции шин питания, а только сигнализируют о случившейся аварии.

### **1.5 Концепция создания электротехнической системы мониторинга работоспособности**

На сегодняшний день, в различных отраслях промышленности существует множество различных способов и методов контроля сопротивления изоляции [8,27,28]. Сама проблема мониторинга сопротивления изоляции на корпус в двухпроводной системе питания известна давно, однако не потеряла своей актуальности, так как необходимо разрабатывать новый комплексный подход мониторинга работоспособности АТО, по критерию сопротивление изоляции, которая позволит минимизировать влияние процесса контроля, а также повысить быстродействие.

Одним из вопросов, требующих комплексного подхода при проектировании ЭКЭП, является вопрос мониторинга работоспособности по критерию сопротивления изоляции шин электропитания относительно корпуса в процессе электрических испытаний. На данный момент существуют несколько методов измерения сопротивления изоляции. Классификация их весьма различна. Рассмотрим несколько из них.

В электромобилях, в силу различия систем питания разного напряжения, первоочередной задачей является обеспечение надежности и оценки работоспособности электротехнического комплекса электропитания (ЭКЭП), по критерию сопротивления изоляции.

Проведенный патентный анализ существующих методов и способов мониторинга работоспособности АТС, по критерию сопротивления изоляции показал, что по способу измерения их можно разделить на 3 группы методов.

Методы КСИ с поочередным контролем тока утечки между каждой шиной и корпусом с помощью измерителя тока.

Существует метод [42], где в сети с изолированной нейтралью измеряют напряжения между «землей» и полюсами источника постоянного тока (рис.1.11), а также измеряют токи, протекающие по присоединениям сети после подключения к одному из полюсов одного, а затем другого из резистивных элементов присоединения.

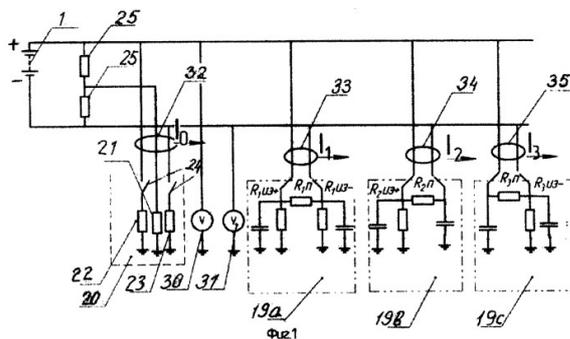


Рисунок 1.11-Схема КСИ с поочередным контролем тока утечки

При этом одновременно выравнивают напряжение на полюсах. По полученным значениям напряжений и токов вычисляют сопротивление изоляции. Для заявленного устройства предназначен дифференциальный датчик тока.

Измеряют напряжения  $U_{1+}$  и  $U_{2-}$  между «землей» и полюсами источника постоянного тока с помощью вольтметров 30 и 31. Последовательно измеряют с помощью дифференциальных датчиков 32, 33, 34, 35 токи, протекающие по присоединениям сети после подключения к одному из полюсов одного, а затем другого из резистивных элементов присоединения 20 (например, сначала 22,

затем 23). Одновременно выравнивают напряжение на полюсах путем включения параллельно полюсам источника постоянного тока двух последовательно соединенных одинаковых резисторов 25, общая точка которых через третий резистор 21 присоединения 20 соединена с «землей».

После замыкания ключа одного из ключей 24. Токи, протекающие по изоляции проводов, соединяющих шины «+» и «-» источника соответственно и нагрузку первого присоединения

$$I_{1+}=U_{1+}G_{1из+}, \quad (1.5)$$

$$I_{1-}=U_{1-}G_{1из-}. \quad (1.6)$$

При указанных способах и устройствах [1,43,51,59] вначале определяют отсутствие короткого замыкания цепей источников постоянного тока на корпус. По величине разницы токов судят о наличии короткозамкнутых цепей контролируемых источников постоянного тока с корпусом. При отсутствии короткого замыкания производят два измерения корпусного тока между общей минусовой шиной и корпусом с включением в цепь измерителя тока контрольного источника постоянного напряжения и без него. Вычисляют эквивалентное сопротивление изоляции по разнице измеренных токов и величине напряжения контрольного источника.

В известных методах, способах [2,44,53,58] к полюсам цепи постоянного тока подключают два резистора (рис.1.12). Другие два резистора 7 и 8 подключают параллельно нагрузке 9 . В месте соединения резисторов между собой подключают измерительную цепь, состоящую из последовательно включенных источника измерительного напряжения 5 и измерителя тока 3 . Источник напряжения подключают в поочередно изменяемой полярности полюсов.

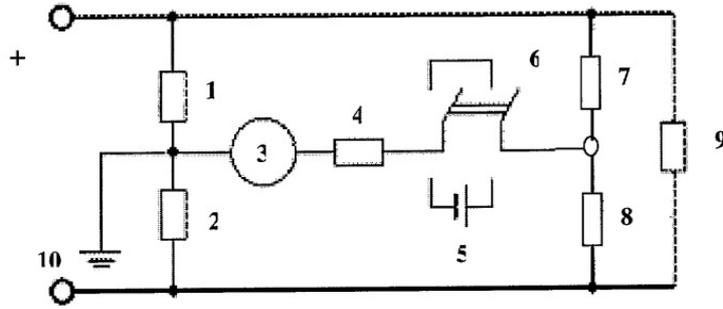


Рисунок 1.12-Схема КСИ с амперметром в диагонали

Определяют эквивалентный измерительный ток как половину суммы двух абсолютных по величине значений токов, измеренных последовательно по времени при разной полярности источника напряжения. Определяют сопротивление изоляции по формуле  $R = E/I_{\text{экв}} - 0,5r$ , где  $E$  - напряжение источника,  $I_{\text{экв}}$  - эквивалентный ток,  $r$  - сопротивление резисторов.

Также можно упомянуть и существующие способы [46,52]. Между одним из полюсов контролируемой цепи и шиной заземления подключают измерительную цепь, содержащую управляемый дополнительный источник постоянного тока формирующий однополярное двухступенчатое напряжение, при этом, с целью снижения измерительного напряжения дополнительного источника, с цепью заземления соединяют полюс дополнительного источника одноименный с подключенным полюсом контролируемой цепи.

При подключении к одному проводу, в соответствии с которым между одним из полюсов контролируемой цепи и шиной заземления подключают измерительную цепь, содержащую управляемый дополнительный источник постоянного тока. Затем производят измерение напряжения источника и тока в его цепи, усредняя их по  $n$  измерениям в интервале, кратном периоду наиболее вероятной помехи, затем повышают напряжение и вновь после определенной выдержки производят те же измерения, общее сопротивление изоляции контролируемой цепи вычисляют по формуле:

$$R_{\text{из}} = \frac{U_{02} - U_{01}}{I_{02} - I_{01}} - R_0 \quad (1.7)$$

где:  $U_{01}$ ,  $U_{02}$  - усредненные значения напряжения дополнительного источника на первом и втором этапах измерения;  $I_{01}$ ,  $I_{02}$  - соответствующие токи в измерительной цепи;  $R_0$  - суммарное сопротивление измерительной цепи, включающее ограничительный резистор, сопротивление шунта и внутреннее сопротивление дополнительного источника (в прямом направлении).

Существует метод [45] основанный, на подключении к нагрузке постоянного напряжения от основного источника питания и измеряют ток утечки в линии питания. Затем при включенном основном источнике напряжения питания прикладывают к линии напряжение питания от дополнительного источника питания и снова измеряют суммарный ток утечки в линии питания. Определяют разность произведенных замеров и сравнивают полученную величину с допустимым значением утечки.

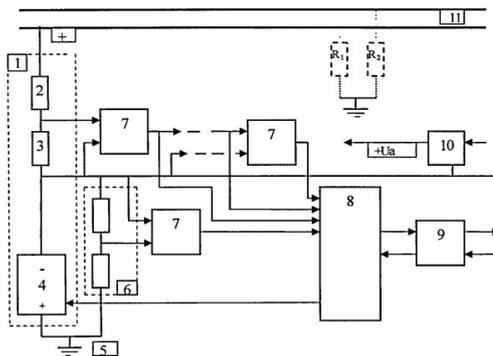


Рисунок 1.13-Схема КСИ при подключении к нагрузке постоянного напряжения

Эти методы имеют низкую периодичность измерений (применялись ранее на неавтоматизированных пультах управления и контроля нажатием кнопок оператором), из-за низкого внутреннего сопротивления измерителя тока при наличии замыкания одной из шин питания на корпус возможно протекание большого тока (на уровне тока короткого замыкания).

Методы контроля работоспособности АТС с поочередным контролем тока утечки между каждой шиной и корпусом с помощью заряда эталонного конденсатора и его последующего разряда на эталонное сопротивление.

Известно устройство [55,47], в котором основная идея функционирования заключается в том, что параллельно к измеряемой цепи подключается конденсатор известного номинала, измеряется постоянная времени переходного процесса и, с учетом измеренных начального и конечного значений напряжений, в контролируемых точках определяются параметры изоляции цепи. При этом обеспечивается гальваническая развязка измеряемой и измерительной цепей. Известен метод [50], где до начала измерения запоминается потенциал корпуса, а затем параллельно измеряемой цепи подключается конденсатор известного номинала. Затем измеряется постоянная времени переходного процесса и, с учетом измеренных начального и конечного значений напряжений, в контролируемых точках определяются параметры изоляции цепи. Далее с учетом измеренной емкости утечки на корпус подается напряжение с цифруправляемого источника напряжения, до тех пор, пока потенциал корпуса не восстановится до запомненного значения.

Однако существует и более новый метод контроля сопротивления изоляции в жгутах и кабелях [56]. Блок формирования сигнала на выходе ЦАП обеспечивает тестовый сигнал, который через конденсатор накачки воздействует на корпус объекта. Блок обеспечения процесса "накачки", переключая ключи, отклоняет потенциал корпуса от исходного значения на заданную величину. Величина скачка потенциала конденсатора накачки после первого подключения измеряется блоком измерения с помощью дифференциального усилителя. По величине скачка и экспоненциальному переходному процессу восстановления потенциала корпуса блок вычисления постоянной времени и блок измерения вычисляют значения сопротивлений утечки на корпус. Восстановление потенциала корпуса после измерения осуществляется блоком обеспечения процесса "накачки". Точность измерения возрастает за счет того, что во всем диапазоне измерений величина скачка находится в пределах верхней границы шкалы блока измерения.

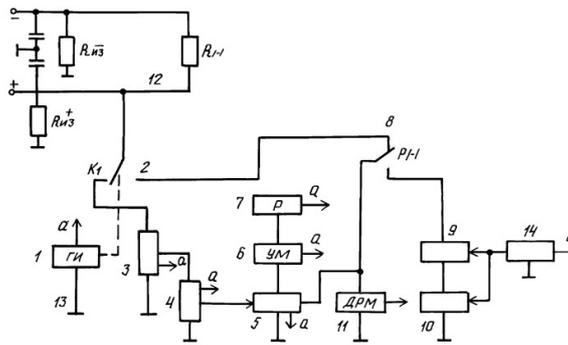


Рисунок 1.14- Схема КСИ с поочередным контролем тока утечки между шинами

В устройство, приведенное на рис.1.14 введены компаратор 5, усилитель мощности 6, реле с переключающей группой контактов P1-1, второе устройство выборки и хранения аналогового сигнала, омметр 10, управляемая ключами декодирующая резистивная матрица (ДРМ) 11.

Существуют способы [48,50,42] где один полюс контролируемой сети шунтируют резистором и изменяют шунт так, чтобы напряжение этого шунтирующего полюса относительно земли уменьшилось ровно в два раза по сравнению с величиной напряжения.

Известен способ измерения и контроля эквивалентного сопротивления изоляции изолированных от земли силовых электрических сетей постоянного тока, в том числе и тяговых сетей со статическими преобразователями под рабочим напряжением. Он заключается в том, что сначала измеряют напряжение относительно земли одного полюса контролируемой сети постоянного тока, а затем шунтируют этот же полюс относительно земли (корпуса) резистором. Способ отличается тем, что шунтирующий резистор изменяют по величине таким образом, чтобы напряжение этого полюса относительно земли уменьшилось точно в два раза по сравнению с величиной напряжения этого полюса относительно земли до шунтирования. Затем шунтирующий резистор отключают и измеряют его величину, которая будет численно равна эквивалентному сопротивлению изоляции контролируемой сети постоянного тока.

В рассмотренных выше способах имеется один общий недостаток - большая погрешность измерения, возникающая при наличии емкостных связей в первичном источнике и испытательном оборудовании между шинами питания и корпусом, в результате их перезаряда на эталонный конденсатор.

Методы вычисления сопротивления изоляции по измеренным напряжениям между шинами питания изделия и корпусом с подключением эталонного сопротивления в одну из цепей.

Существует метод [43,49] основанный, на измерении токов утечки двух шин отдельно при положительном напряжении на соответствующей шине и вычислении сопротивления изоляции в зависимости от напряжения сети и тока утечки с помощью микроконтроллера.

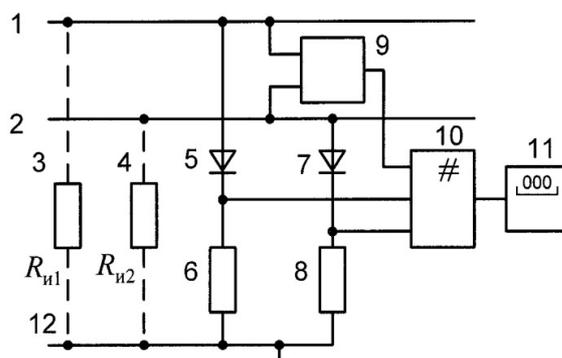


Рисунок 1.15- Схема КСИ по измеренным напряжениям между шинами изделия и корпусом с подключением эталонного сопротивления в одну из цепей.

Устройство работает следующим образом (рис.1.15). Вначале измеряются токи утечки двух шин отдельно при положительном напряжении на соответствующей шине, затем вычисляются сопротивления изоляции в зависимости от напряжения сети и тока утечки с помощью микроконтроллера.

Напряжение контролируемой электрической сети и преобразуется с помощью датчика напряжения 9, выходной сигнал которого поступает на первый вход микроконтроллера 10. При положительном потенциале шины 1 по цепи: шина 1 - первый диод 5 - измерительный резистор 6 - сопротивление изоляции  $R_{и2}$  - шина 2 протекает ток

$$I_1 = \frac{u}{R_0 + R_{и2} + R_d} \quad (1.8)$$

где  $R_0$  - сопротивление измерительного резистора;

$R_{и2}$  - сопротивление изоляции шины 2;

$R_d$  - сопротивление диода в открытом состоянии.

Так как  $R_d \ll R_0$ , то сопротивление изоляции шины 2 может быть вычислено по приближенной формуле:

$$R_{и2} \approx \frac{u - u_1}{u_1} R_0 \quad \text{при } u > 0 \quad (1.9)$$

Напряжение  $u_2$  поступает на второй вход микроконтроллера, который при  $u < 0$  по измеренным значениям  $u$  и  $u_2$  вычисляет сопротивление изоляции шины 2 по формуле

$$R_{и1} \approx \frac{-u - u_2}{u_2} R_0 \quad \text{при } u < 0 \quad (1.10)$$

Микроконтроллер 10 выполняет обработку измерительной информации: измерение напряжения  $u$  контролируемой сети, измерение напряжений на измерительных резисторах  $u_1$  и  $u_2$  и вычисление сопротивлений изоляции шин по формулам 1.9 и 1.10.

Известен также метод контроля двухпроводных сетей, находящихся под напряжением [57,51,2]. Устройство для измерения электрического сопротивления изоляции содержит первый и второй делители напряжения, ключ, резистор и последовательно соединенные мультиплексор, аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и блок управления. За счет введения второго делителя напряжения, выход которого связан с корпусом, и измерения напряжения на выходе делителей напряжения относительно нулевой шины питания достигается значительное повышение быстродействия при измерении электрического сопротивления изоляции двухпроводных сетей.

Существуют способы [44,1,58] основанные на сравнении вычисленных сопротивлений изоляции источников с контрольным сопротивлением. По результатам сравнения определяют шину с заниженным сопротивлением изоляции. Выдачу команд, запрос измеренных напряжений, вычисление и

формирование результатов контроля осуществляют посредством программного модуля.

В рассмотренной группе способов исключаются недостатки способов может учитываться наличие таких связей (за счет уменьшения периодичности опросов), но они могут давать большую погрешность при измерении сопротивления изоляции шин питания ЭКЭП, имеющих последовательный регулятор тока первичного источника питания.

Исходя из вышеизложенного, представляем концепцию решения научно-технической задачи по разработке системы мониторинга ЭКЭП АТО по параметрам электрического сопротивления изоляции шин (рис.1.16)

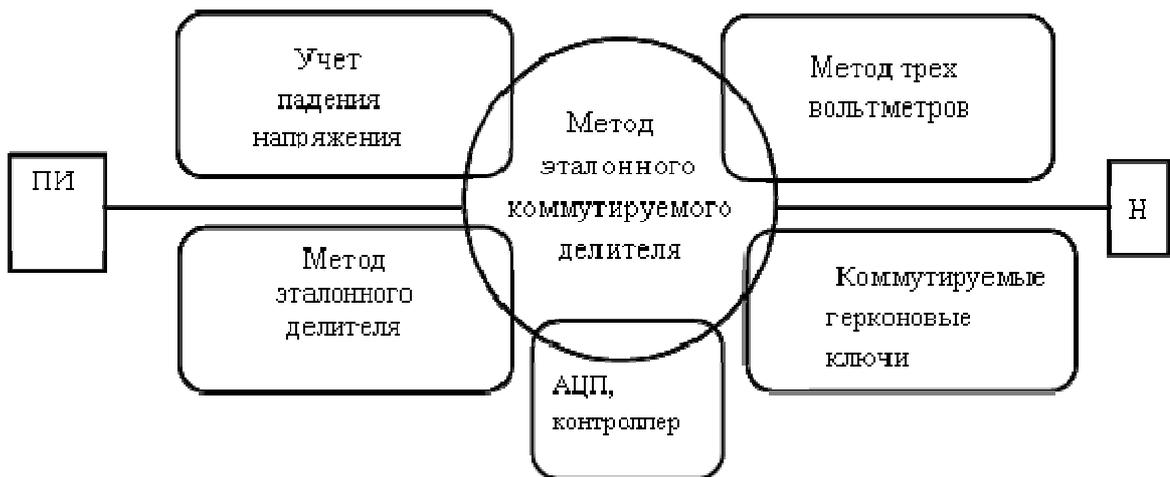


Рисунок 1.16- Концепция метода мониторинга сопротивления ЭКЭП АТО.

Научно-техническая идея нашей концепции основана на интеграции известных методах 3-х вольтметров и динамического метода, в которых используется включение в параллельную работу эталонного шунта. В предлагаемом методе используется 2 вольтметра.

## 1.6 Цели и задачи диссертационного исследования

На основе анализа научно-технической проблемы совершенствования новых типов автотранспортных средств ЭМБ, АКЭУ, АТО, вытекает цель,

связанная с повышением эффективности функционирования автономного транспортного объекта на основе мониторинга сопротивления системы электропитания. Обеспечение достижения цели, реализуется за счет решения комплекса научно-технических задач:

- 1) анализ электротехнических систем мониторинга ЭКЭП, для выбора наиболее эффективных из них в разработке, реализации и обслуживания АТО;
- 2) разработка методики и алгоритма мониторинга сопротивления ЭКЭП с реализацией оценки критического состояния АТО;
- 3) параметрический синтез и проектирование математической и имитационной моделей реализующих метод и алгоритм электротехнической системы мониторинга АТО;
- 4) техническая реализация предложенных моделей и технических решений.

Таким образом, можно сделать вывод о наличии проблемных областей безопасности, работоспособности и надежности ЭМБ и АКЭУ, начиная от процесса проектирования, заканчивая обеспечением эксплуатационной эффективности и утилизацией. Анализ методов мониторинга показывает, что решение проблем на системном уровне, должно основываться на создании новой научно-технической концепции системы диагностики работоспособности ЭКЭП АТО, по критерию сопротивление изоляции.

Соответственно, требуется разработка научно-технической концепции системы мониторинга работоспособности ЭКЭП АТО, а также ее реализация с использованием математического и имитационного моделирования при различных режимах работы, для выполнения требований по обеспечению качества и надежности компонентной и инфраструктурной областей проектирования, производства и эксплуатации ЭМБ и АКЭУ, с учетом текущих и перспективных требований.

## 2. АНАЛИЗ И РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА РАБОТОСПОСОБНОСТИ ЭКЭП АТО ПО КРИТЕРИЮ СОПРОТИВЛЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ШИН ПИТАНИЯ

### 2.1 Анализ существующих и перспективных проектов АТО с точки зрения разработки и реализации системы мониторинга работоспособности.

Рассматривая зарубежный сегмент патентов по заявленной области в автомобилестроении, можно отметить, что за последние 20 лет европейские страны патентуют не значительное количество, порядка 20 патентов, определяющих способы и устройства по данному направлению. Наиболее значимые из них, это 2 патента крупнейших Европейских автопроизводителей, более подробно рассматриваемых ниже.

Компания ФИАТ Авто в 2002 году запатентовала «Контроль изоляции в электрических транспортных средств» [84] рис.2.1.

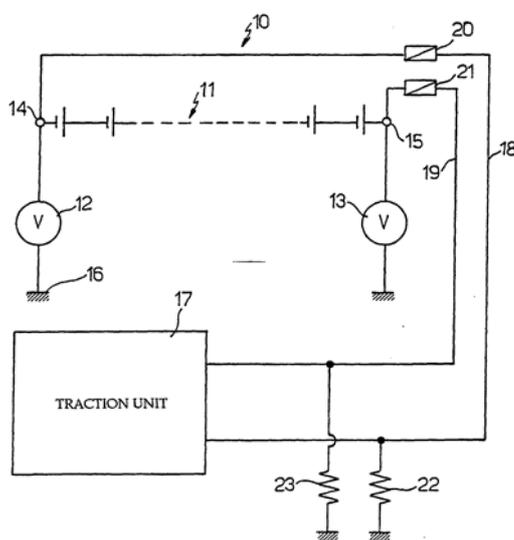


Рисунок 2.1- Упрощенная рабочая схема контроля работоспособности ЭКЭП по критерию сопротивление изоляции.

На рисунке 2.1 показано: 12, 13-вольтметры, 16-земля, 17-тяговая единица, 18, 19-линии, 20, 21-предохранители, 22, 23-сопротивление изоляции

Суть данной работы заключается в возможности акустической или визуальной сигнализации о наличии утечки или коротком замыкании между тяговой единицей и кузовом, чтобы иметь возможность вмешаться до того, как произойдет пробой между «+» и «-» и более серьезная неисправность.

Однако, у представленного способа один существенный недостаток: он не позволяет прогнозировать или предупреждать о возможной аварии, а только сигнализирует водителя о случившейся аварии.

В 2015 другой автомобильный концерн Фольксваген патентует «Способ и устройство для измерения одного или нескольких сопротивлений изоляции в автомобиле» [85] рис.2.2.

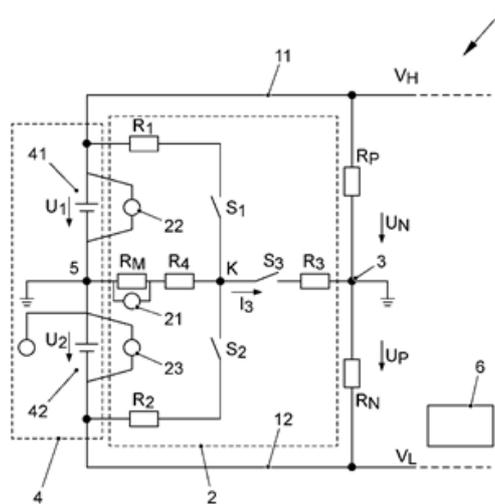


Рисунок 2.2- Расчетная схема для измерения сопротивление изоляции в системе электропитания ЭМБ И АКЭУ.

На рис. 2.2 1-система питания, 2-измерительные цепи, 3-корпус, 4-аккумулятор, S1,S2,S3-ключи, 21,22,23-вольтметры, Rm-резистор эталонный, R1,R2,R3,R4-резисторы, K-узел, Rp,Rn- сопротивление изоляции

Суть работы заключается в контроле сопротивления изоляции между шинами и массой. По расчетным формулам (2.1,2.2) производится расчет тока.

$$R_p = \frac{U_{N2} \cdot U_{P1} - U_{N1} \cdot U_{P2}}{I_{22} \cdot U_{N1} - I_{21} \cdot U_{N2}} \quad (2.1)$$

$$R_n = \frac{U_{N2} \cdot U_{P1} - U_{N1} \cdot U_{P2}}{I_{22} \cdot U_{P1} - I_{21} \cdot U_{P2}} \quad (2.2)$$

Рассматриваются два режима:  $S1=0, S2=0, S3=0$ , а также  $S1 = 1; S2 = 1; S3 = 1$ . При пересчете  $R_p, R_n$  в случае снижения сопротивления изоляции, контроллер б фиксируют неисправность шины и выдает сигнал на приборы индикации автомобиля. Данный способ и устройство для измерения одного или нескольких сопротивлений изоляции в автомобиле имеет сложную конструкцию и лишен какой-либо оценки точности измерения, поэтому о достоверности получаемых результатов можно только догадываться.

## **2.2 Интеграция электротехнической системы мониторинга в обобщенный электротехнический комплекс АТО (ЭМБ, АКЭУ). Разработка электротехнической системы мониторинга работоспособности ЭКЭП АТО**

Электромобиль - перспективный вид транспорта и на данный момент является почти единственным решением проблемы загрязнения атмосферы [15,17]. Поэтому в настоящее время многие автопроизводители тратят много сил на решение конструктивных проблем ЭМБ. Сегодня ведутся работы над созданием аккумуляторных батарей с малым временем зарядки (около 15 минут), в том числе и с применением наноматериалов.

Главные показатели, по которым электромобиль выигрывает перед простым автомобилем: эксплуатационные расходы у электромобиля ниже, чем у автомобиля с ДВС; двигатель внутреннего сгорания работает при высоких температурах, вибрациях, в химически активной среде, нуждается в жидкостном охлаждении, имеет многоподвижных частей.

Как следствие, силовой агрегат электромобиля служит намного дольше, чем двигатель внутреннего сгорания, сам электромобиль также значительно долговечнее, чем автомобиль с ДВС [89,91]. Аккумуляторная батарея — вот единственный проблемный элемент электромобиля, так как нуждается в интенсивном обслуживании.

Рассмотрим обобщенную структуру, определяющую основные взаимосвязи комплексов и систем перспективного АТС. Для большинства

современных электромобилей кузов, шасси и многие другие механические узлы и агрегаты позаимствованы от серийных автомобилей с ДВС. Лишь немногие модели с самого начала проектировались как электромобили, например, GM EV1 или Honda EV-plus. Но те и другие имеют примерно одинаковый состав взаимосвязей основных систем, показанных на рисунке 2.3.

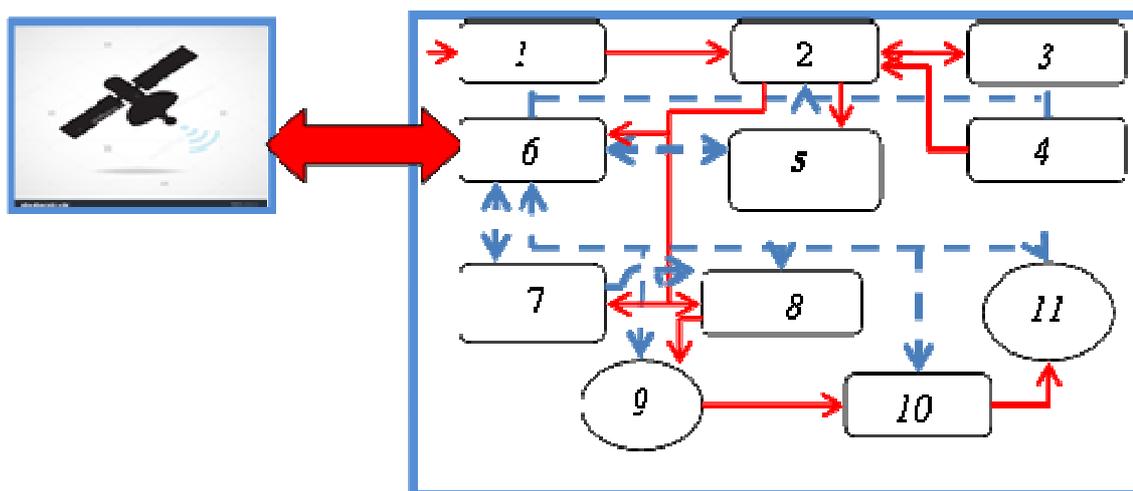


Рисунок 2.3- Обобщенная структура перспективного АТС

Обобщенная структура перспективного АТС (рис.2.3), наподобие ЭМБ и АКЭУ состоит из 1-зарядное устройство; 2-устройство защиты; 3-тяговая аккумуляторная батарея; 4-солнечная батарея; 5- бортовые вспомогательные системы контроля; 6- бортовой компьютер, имеющий связь со спутниковыми системами; 7- водительские органы управления электромобилем; 8- электронный контроллер электродвигателя; 9- электродвигатель; 10- механическая трансмиссия; 11- колеса электродвигателя. Сплошная линия - силовые цепи, пунктирная линия- цепи управления.

Проведенные в первой главе исследования, позволяют сделать важный вывод, заключающийся в том, что на современном этапе научно-технологического развития созданы предпосылки для разработки и реализации электротехнических и электронных систем мониторинга АТС.

При этом, выполненный патентный анализ показывает, что комплексных технических решений, в этой области достаточно, однако не найдена универсальная комплексная концепция, обладающая достаточным быстродействием и высокой точностью измерений. Анализ же функциональной электрической схемы перспективного АТС (рис.2.4) показывает конкретные возможности для интеграции электротехнических и электронных систем контроля работоспособности в бортовую сеть автомобиля.

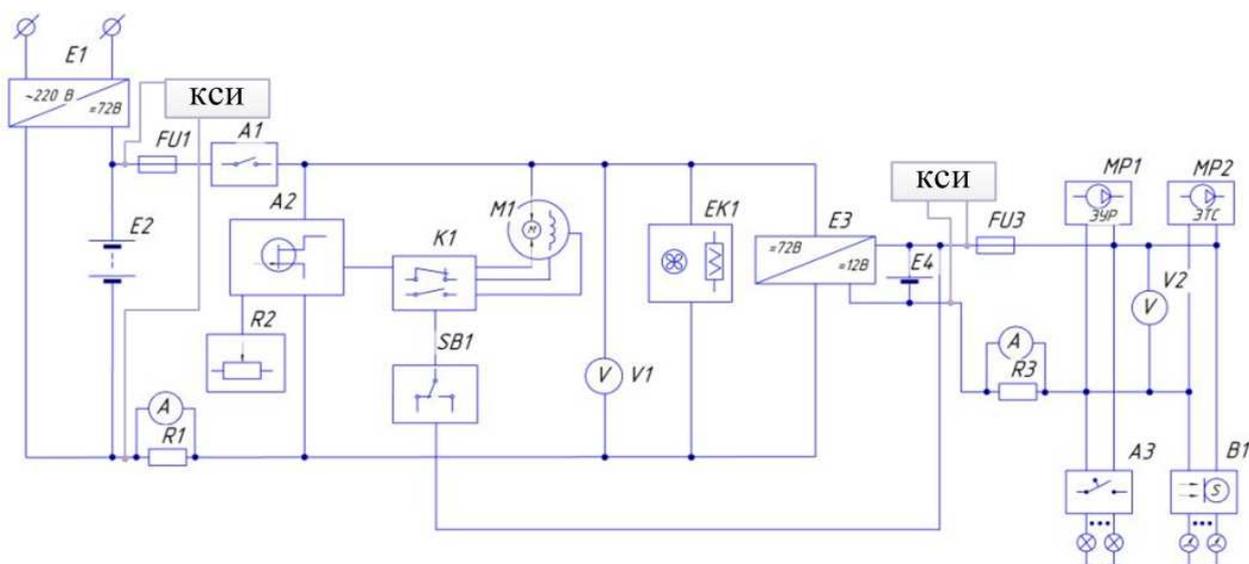


Рисунок 2.4- Функциональная электрическая схема электроавтомобиля.

На рис. 2.4 E2-тяговая батарея, FU1-FU3 – предохранители, R1(R3)- стандартный промышленный шунт, A1-совокупность контактов силовых контакторов, A2- регулятор оборотов электродвигателя, R2-датчик положения дроссельной заслонки, K1-блок контактов, SB1-переключает клок контактов K1, M1-двигатель электроавтомобиля, EK1-устройство климат-контроля, E3-преобразователь напряжения, E4-аккумуляторная батарея для бортовых приборов, КСИ - контроль сопротивления изоляции.

### 2.3 Метод оценки работоспособности электротехнического комплекса с использованием эталонного коммутируемого делителя, при разработке и реализации системы мониторинга ЭКЭП АТО

В соответствии с предложенной концепцией метода мониторинга работоспособности электротехнического комплекса системы электропитания по критерию сопротивления изоляции, предлагаемый подход заключается в контроле напряжения между шинами питания и корпусом, при различном состоянии ключей S.

По заниженному показанию одного из вольтметров  $V_+$  или  $V_-$  можно определить неисправную шину, а, кроме того, по степени шунтирования плеч делителя  $R_{дел+}$  и  $R_{дел-}$  и её эквивалентное сопротивление изоляции относительно корпуса. Вольтметры  $V_+$  и  $V_-$  (рис. 2.5) показывают, что неисправность находится в шине питания «-», т. к.  $R_{из-}$  меньше, чем  $R_{из+}$ . Чем больше эквивалентное сопротивление изоляции  $R_{из}$  относительно корпуса, тем меньше оно шунтирует соответствующее плечо делителя  $R_{дел+}$  или  $R_{дел-}$  и тем больше напряжение на этом плече приближается к  $E/2$ , а  $R_{из}$  относительно корпуса приближается к принятому для штатного режима ЭКЭП  $R_{из-} = R_{из+} = 1$  МОм.

Если ЭКЭП функционирует нормально, то шунтирование обоих плеч симметрично и показания обоих вольтметров  $V_+$  и  $V_-$  равны, при этом  $R_{из-} = R_{из+} = 1$  МОм. Эта степень шунтирования (или асимметрия напряжений плеч), пропорциональна эквивалентному сопротивлению изоляции  $R_{из}$  относительно корпуса и определяется отношением показаний вольтметров  $V_+$  и  $V_-$ , что исключает зависимость результата измерений от возможных изменений напряжения питания [25,29].

Упрощенная схема замещения ЭКЭП на постоянном токе для рассматриваемого варианта измерений с коммутацией приведена на рис.2.5.

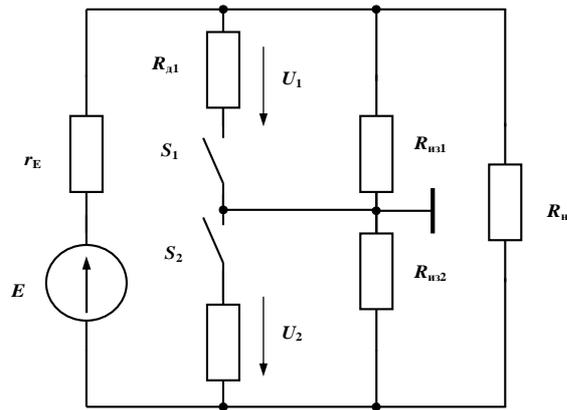


Рисунок 2.5- Упрощенная расчетная схема ЭКЭП с эталонным коммутируемым делителем,

На рис.2.5  $E$ - аккумуляторная батарея,  $r_E$  –внутреннее сопротивление источника,  $R_n$  –нагрузка,  $R_{д1}$ ,  $R_{д2}$  –сопротивление делителя,  $R_{из1}$ ,  $R_{из2}$ – сопротивления изоляции между шинами.

Плечи эталонного делителя напряжений подключаются между шинами питания и корпусом с помощью ключей  $S_1$ ,  $S_2$  (рис.2.5). Измерения напряжений  $U_1$ ,  $U_2$  производятся одновременно; возможны четыре различных состояния схемы:

- 1)  $S_1$  замкнут,  $S_2$  разомкнут;
- 2)  $S_1$  разомкнут,  $S_2$  замкнут;
- 3)  $S_1$ ,  $S_2$  замкнуты; соответствует методу эталонного делителя;
- 4)  $S_1$ ,  $S_2$  разомкнуты; не информативен.

В случае 1 ( $S_1 = 1$ ,  $S_2 = 0$ ) напряжения  $U_1$ ,  $U_2$  при  $r_E \ll R_{из}$ ,  $r_E \ll R_d$  имеют следующие значения: Здесь и далее символ  $\parallel$  -обозначает параллельность цепей.

$$U_{11} = \frac{R_{из1} \parallel R_{д1}}{R_{из2} + R_{из1} \parallel R_{д1}} E, \quad (2.3)$$

$$U_{21} = \frac{R_{из2}}{R_{из2} + R_{из1} \parallel R_{д1}} E. \quad (2.4)$$

В случае 2 ( $S_1 = 0$ ,  $S_2 = 1$ ) напряжения  $U_1$ ,  $U_2$  при  $r_E \ll R_{из}$ ,  $r_E \ll R_d$  имеют следующие значения:

$$U_{12} = \frac{R_{из1}}{R_{из1} + R_{из2} \parallel R_{д2}} E, \quad (2.5)$$

$$U_{22} = \frac{R_{из2} \parallel R_{д2}}{R_{из1} + R_{из2} \parallel R_{д2}} E. \quad (2.6)$$

Обозначая отношения

$$U_{11}/U_{21} = K_1, (S_1 = 1, S_2 = 0) \quad (2.7)$$

$$U_{12}/U_{22} = K_2, (S_1 = 0, S_2 = 0) \quad (2.8)$$

и, принимая во внимание, что

$$R_{д1} = R_{д2} = r, \quad (2.9)$$

получим систему уравнений

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{R_{из1}}{R_{из2}} \frac{r}{R_{из1} + r} = K_1, \\ \frac{R_{из1}}{R_{из2}} \frac{R_{из2} + r}{r} = K_2. \end{array} \right. \quad (2.10)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{R_{из1}}{R_{из2}} \frac{R_{из2} + r}{r} = K_2. \end{array} \right. \quad (2.11)$$

Значения  $R_{из1}$ ,  $R_{из2}$  из системы (2.8), (2.9) имеют следующий вид:

$$R_{из1} = \frac{K_2 - K_1}{1 + K_1} r,$$

$$R_{из2} = \frac{K_2 - K_1}{K_1(1 + K_2)} r.$$

Математические модели (2.12, 2.13) являются начальными моделями для расчета сопротивления линии. Как видно из моделей, сопротивление изоляции будет зависеть только от напряжений в плечах делителя и от самого делителя. Во многом значение сопротивления изоляции будет, зависит от внутреннего сопротивления измеряемых вольтметров. Поскольку значение это не всегда точно регламентировано, то в связи с этим возникают дополнительные погрешности.

## 2.4 Расчетные методы разработки и реализации электротехнической системы мониторинга работоспособности ЭКЭП АТО.

Реальный электротехнический комплекс электропитания электромотоцикла или автомобиля с комбинированной установкой, представляют собой сложную совокупность двухполюсников (модулей) разнообразной структуры, каждый из которых может быть представлен множеством обобщенных ветвей с зависимыми источниками ЭДС и тока [16,30,31].

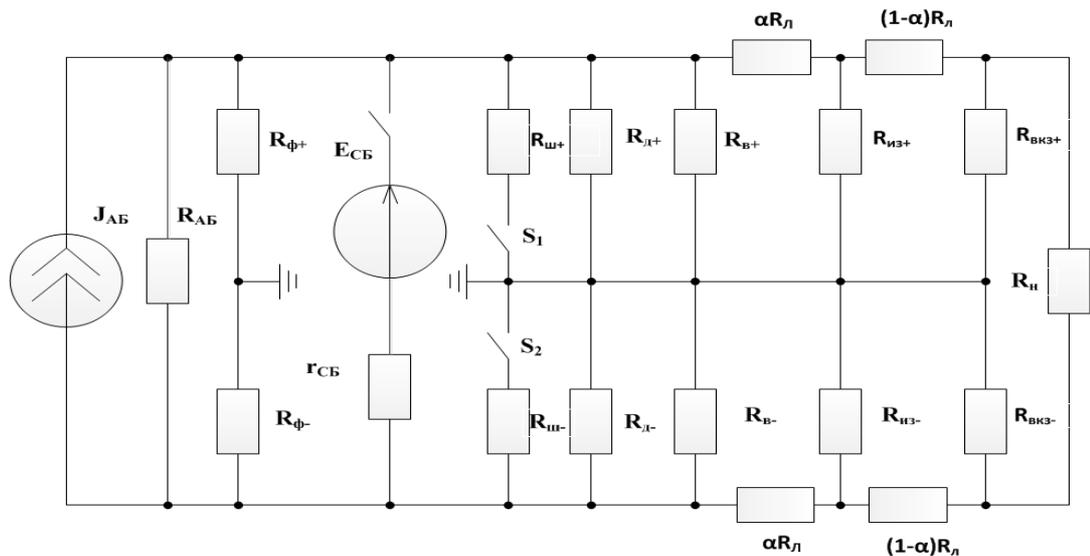


Рисунок 2.6- Схема замещения ЭКЭП АТО с интеграцией электротехнической системой мониторинга сопротивления изоляции,

На рис. 2.6  $E_{сб}$  – напряжение СБ,  $J_{аб}$ - источника тока,  $R_{аб}$  – сопротивление АБ,  $R_{сб}$  – внут. сопротивление E,  $R_{ф+}$  и  $R_{ф-}$  - сопротивления цепей АФ (100 кОм),  $J_{АБ}$ - аккумуляторная батарея,  $R_{из+}$  и  $R_{из-}$  - сопротивления изоляции АТО,  $R_{в+}$ ,  $R_{в-}$ ,  $R_{вкз-}$ ,  $R_{вкз+}$ -сопротивление вольтметров (830кОм) ,  $R_{д+}$  и  $R_{д-}$  - сопротивления делителя напряжения (640 кОм),  $R_{ш+}$  и  $R_{ш-}$  - сопротивления цепей шунта КШП (10 кОм),  $R_{н}$  - сопротивление нагрузки СЭП,  $S_1$ ,  $S_2$  - ключи коммутации,  $R_{л}$  – сопротивления линии,  $\alpha$ - коэффициент, учитывающий распределительный характер, в пределах от 0 до 1.

При этом напряжение на зажимах  $m, n$  выделенной  $k$ -й обобщенной ветви с эквивалентными источниками ЭДС и тока можно представить как:

$$U_{mn} = U_k = I_{Rk} R_k - E_k \quad (2.14)$$

Определяя ток  $I_{Rk}$  как сумму токов  $k$ -й ветви и источника тока [16]

$$I_{Rk} = I_k + J_k \quad (2.15)$$

получим с учетом (2.15) выражение (2.14) в виде

$$U_k = R_k (I_k + J_k) - E_k \quad (2.16)$$

Выражение (2.16) справедливо для обобщенной ветви с зависимыми (управляемыми) источниками ЭДС и тока.

Математическую модель для  $n$  ветвей разветвленной электрической цепи [66,83] с обобщенными ветвями соотношение (2.16) можно представить в виде матричного равенства

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \dots \\ U_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 & & & \\ & R_2 & & \\ & & \dots & \\ & & & R_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 + J_1 \\ I_2 + J_2 \\ \dots \\ I_n + J_n \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \dots \\ E_n \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

или в сокращенной записи

$$U = R(I + J) - E \quad (2.18)$$

где  $R$  – диагональная квадратная (размерностью  $n \times n$ ) матрица сопротивлений ветвей, все элементы которой за исключением элементов главной диагонали, равны нулю.

Если обе части равенства (2.18) умножить слева на контурную матрицу  $B$  и учесть матричную форму записи второго закона Кирхгофа в виде  $BU = 0$ , тогда

$$BR(I+J) = BE, \quad (2.19)$$

что является матричной формой записи уравнений электрического равновесия для разветвленной электрической цепи с  $n$  обобщенными ветвями.

На основании полученного соотношения (2.19), представляющего собой, матричную запись уравнений электрического равновесия, запишем следующее матричное выражение:

$$I = G(U + E) - J \quad (2.20)$$

где

$$G = R^{-1} = \begin{bmatrix} g_1 & & & \\ & g_2 & & \\ & & \dots & \\ & & & g_n \end{bmatrix}$$

- диагональная матрица проводимостей ветвей, все ячейки которой, за исключением элементов главной диагонали, равны нулю, причем матрицы  $R$  и  $G$  являются взаимно обратными.

Умножив обе части равенства (2.20) на узловую матрицу  $A$ , учитывая первый закон Кирхгофа в матричной форме записи, согласно которому

$$AI = 0 \quad (2.21)$$

и, преобразуя уравнения МУН к матричной форме, получим

$$AG(U + E) = AJ \quad (2.22)$$

В дальнейшем выражение (2.22) преобразуется к виду:

$$AGU = AJ + AGE \quad (2.23)$$

Принимая потенциал узла, для которого отсутствует строка в матрице  $A$ , равным нулю, определим напряжения на зажимах обобщенных ветвей:

$$U = A^T \varphi \quad (2.24)$$

Тогда получаем матричное уравнение метода узловых напряжений

$$AGA^T \varphi = AJ - AGE \quad (2.25)$$

Уравнения МУН для узловых токов можно сформировать, если ввести следующие обозначения в новом координатном базисе:

для матрицы узловых проводимостей

$$G_y = AGA^T \quad (2.26)$$

и для матрицы узловых токов

$$J_y = AJ - AGE \quad (2.27)$$

В итоге получаем уравнения МУН для узловых токов в виде:

$$G_y \varphi = J_y \quad (2.28)$$

В развернутом виде соотношение (2.28) согласно [16] можно записать, как

$$\begin{bmatrix} g_{11} & -g_{12} & \dots & -g_{1(m-1)} \\ -g_{21} & g_{22} & \dots & -g_{2(m-1)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ -g_{(m-1),1} & -g_{(m-2),2} & \dots & g_{(m-1)(m-1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \dots \\ \varphi_{m-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{y1} \\ J_{y2} \\ \dots \\ J_{y(m-1)} \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

На основании полученных соотношений запишем алгоритм определения сопротивлений изоляции шин для расчетного модуля с использованием метода двух узлов [90]. Упрощенная схема замещения расчетного модуля для определения сопротивления изоляции представлена на рис.2.7.

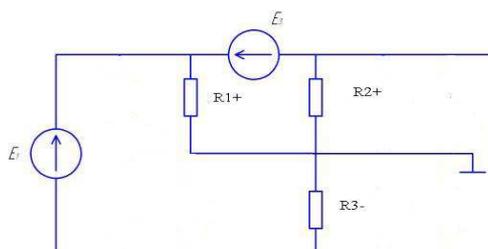


Рисунок 2.7 - Упрощенная схема замещения расчетного модуля для определения сопротивлений изоляции шин

Для упрощенной схемы замещения сопротивление изоляции АБ очень велико и можно исключить  $E_{3y}$ ,  $E_{aб}$  и  $R_{из\ aб}$ . При необходимости сопротивлением изоляции ИБС тоже можно пренебречь.

По данной схеме необходимо составить систему уравнений для определения неизвестных  $R_{2+}$  и  $R_{3-}$ , используя результаты измерений  $E_1$ ,  $E_2$  и напряжений между шинами и корпусом (с подключенным или отключенным шунтом).

После определения  $R_{2+}$  и  $R_{3-}$  ( $R_{1+}$ ) по схеме замещения (рис.2.7.) необходимо вычислить сопротивления изоляции  $R_{из+}$ ,  $R_{из-}$ .

Предполагается, что заданы или известны  $E_1$  и  $E_3$ , а также входное сопротивление АЦП ( $R_0 = 800$  кОм) [4].

Кроме того, полагаем известными параллельно соединенные сопротивление фильтра антистатического  $R_{\Phi A+}$  и сопротивление изоляции плюсовой цепи ИБС (100 кОм).

При измерении потенциалов узлов  $\varphi_2$  и  $\varphi_3$  сопротивления  $R_{2+}$  и  $R_{3+}$  шунтируются входными сопротивлениями АЦП

$$\varphi_2 = \varphi_1 - E_3 \quad \varphi_3 = \varphi_1 - E_1 \quad (2.30)$$

При измерении  $\varphi_2$  в соответствии с методом двух узлов

$$\varphi_1 = \frac{E_1 g_3 + E_3 g_2 + E_3 g_0}{g_0 + g_1 + g_2 + g_3} \quad \text{или} \quad \varphi_1 = \varphi_0 + \frac{E_3 g_0}{g_0 + g_1 + g_2 + g_3} = \varphi_0 + \frac{E_3 g_0}{\sum_0^3 g_i} \quad (2.31)$$

$$\text{где} \quad \sum_0^3 g_i = g_0 + g_1 + g_2 + g_3, \quad \text{причем} \quad g_i = \frac{1}{R_i}$$

$$\text{по аналогии} \quad \varphi_2 = \varphi_0 + \frac{E_3 g_0}{\sum_0^3 g_i} - E_3 \quad (2.32)$$

$$\varphi_3 = \varphi_0 + \frac{E_1 g_0}{\sum_0^3 g_i} - E_1$$

Тогда из теории цепей [60] и согласно рис.2.7 разность потенциалов узлов будет равна:

$$\Delta \varphi = \varphi_3 - \varphi_2 \quad \text{или} \quad \Delta \varphi = \frac{E_1 g_0 - E_3 g_0}{\sum_0^3 g_i} - E_1 + E_3 \quad (2.33)$$

Сумма узловых проводимостей [60], выраженная через параметры схемы будет равна:

$$\sum_0^3 g_i = \frac{E_1 g_0 - E_3 g_0}{\varphi_3 - \varphi_2 + E_1 - E_3}, \quad g_3 = k - g_2 \quad (2.34)$$

$$g_3 = \left[ \frac{E_1 g_0 - E_3 g_0}{\varphi_3 - \varphi_2 + E_1 - E_3} - g_0 + g_1 \right] - g_2$$

С учетом обозначения (2.35)

После подстановки выражения (2.35) для  $g_3$  в выражение (2.33) для  $\varphi_3$

$$\varphi_3 = \frac{E_1(k - g_2) + E_3g_2 + E_1g_0}{g_1 + g_2 + (k - g_2) + g_0} - E_1 \quad (2.36)$$

или

$$\varphi_3 = \frac{g_2(E_3 - E_1) + E_1g_0 + E_1k}{g_0 + g_1 + k} - E_1 \quad (2.37)$$

Выражая  $g_2$  через остальные компоненты, получим

$$g_2 = \left[ (\varphi_3 + E_1) - \frac{E_1g_0 + E_1k}{g_0 + g_1 + k} \right] \frac{g_0 + g_1 + k}{E_3 - E_1} \quad \text{тогда} \quad R_2 = \frac{1}{g_2} \quad (2.38)$$

На основании приведенной последовательности и пошаговых соотношений составлен алгоритм определения сопротивления изоляции (рис.2.8)

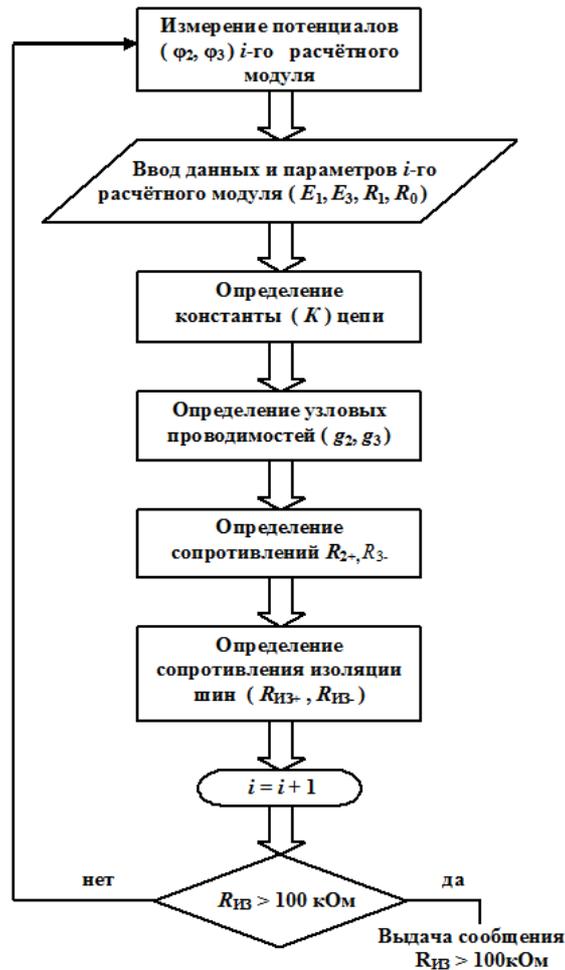


Рисунок 2.8 - Алгоритм определения сопротивления изоляции на основе метода двух узлов

Алгоритм имеет циклический характер, расчет повторяется непрерывно и при достижении критического значения 100кОм система на табло выпускает визуальный или акустический сигнал.

## 2.5 Расчет падения напряжения на линии питания ЭКЭП АТО.

Для полноценного решения задачи расчета сопротивления изоляции между шинами, необходимо обеспечить учет сопротивления линии  $r_{л}$  ЭКЭП, которое существенно влияет на конечное значение сопротивления изоляции. Распределенный характер сопротивления шин и их изоляции относительно корпуса учтен коэффициентами  $\alpha$  и  $\beta=1-\alpha$ . Именно с этой целью в работе проводится расчет падения напряжения на линиях питания ЭКЭП АТО.

Существенной особенностью ЭКЭП является заметное значение падения напряжения на шинах: например, при токе 50 А и сопротивлении шины 0,05 – 0,10 Ом падение напряжения составит 0,25 – 0,5 В, или 0,9 – 1,8% от напряжения питания 28 В. Это обстоятельство может значительно повлиять на оценки сопротивления изоляции при проведении измерений на постоянном токе.

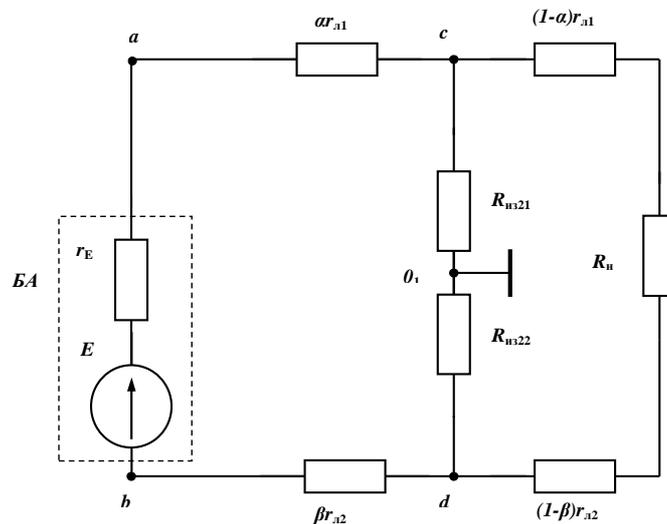


Рисунок 2.9 - Схема замещения ЭКЭП на постоянном токе с учетом сопротивления шин питания

На рис.2.9. приведена схема замещения ЭКЭП для проведения расчетных оценок влияния сопротивления шин на режим цепи. Сопротивление шин питания учтено введением сопротивлений  $r_{л1}$  и  $r_{л2}$ . Распределенный характер сопротивления шин и их изоляции относительно корпуса учтен коэффициентами  $\alpha$  и  $\beta$ .

Значение напряжения  $U_{a01}$  для идеального случая шин без потерь и пренебрежимо малого значения сопротивления источника составляет

$$U_{a01} = \frac{R_{из1}}{R_{из2} + R_{из1}} E \quad (2.39)$$

С учетом конечного значения сопротивлений шин значение напряжения  $U_{a01}$  составляет

$$U_{a01} = \left[ \alpha r_{л1} + \frac{R_{из1}}{R_{из2} + R_{из1}} (R_{н} - (\alpha r_{л1} + \beta r_{л2})) \right] \frac{E}{R_{н} + r_{л1} + r_{л2}} \quad (2.40)$$

Примем допущения

$$r_{л1} / R_{н} = r_{л2} / R_{н} = 0,05; \quad (2.41)$$

обозначим

$$\frac{R_{из2}}{R_{из1}} = \lambda, \quad \frac{R_{из1}}{R_{из2} + R_{из1}} = \frac{1}{1 + \lambda} \quad (2.42)$$

Тогда выражение (2.40) для напряжения  $U_{a01}$  принимает вид:

$$U_{a01} = \left[ 0,05\alpha + \frac{1}{1 + \lambda} (1 - (0,05\alpha + 0,05\beta)) \right] \frac{E}{1,1} \quad (2.43)$$

Выполним модельные расчеты для схемы с эталонным коммутируемым делителем напряжения (рис.2.10) с использованием метода узловых потенциалов. При этом необходимо учитывать следующие положения:

- 1) использованы расчетные соотношения для  $R_{из1}$ ,  $R_{из2}$ , полученные для схемы без учета сопротивлений линии;
- 2) определены расчетные соотношения для схемы с учетом сопротивления линии ( $r_{л} = kR_{н}$ );

3) числовые значения для различных сочетаний параметров схемы получены в MS Excel.

Контрольные расчеты показали, что модель обеспечивает незначительные значения погрешностей при равенстве сопротивлений изоляции ( $R_{из1} \approx R_{из2}$ ). Естественно, что значения параметров  $\alpha$ ,  $\beta$  неизвестны. С целью учета их влияния на расчетные значения сопротивлений изоляции проведено моделирование на расчетной модели с использованием следующего алгоритма:

- задаются значения параметров схемы рис. 2.10;
- с использованием метода узловых напряжений проводится расчет переменных в узлах модели для двух вариантов: первый –  $S_1 = 1$ ,  $S_2 = 0$ ; второй –  $S_1 = 0$ ,  $S_2 = 1$ ;
- производится расчет напряжений  $U_{11}$ ,  $U_{12}$  и параметра  $K_1$  для первого варианта,  $U_{12}$ ,  $U_{22}$  и параметра  $K_2$  - для второго варианта;
- вычисляются значения сопротивлений  $R_{из1}$  и  $R_{из2}$ ;
- проводится расчет погрешностей для сопротивлений изоляции;
- расчеты повторяются для различных комбинаций параметров модели.

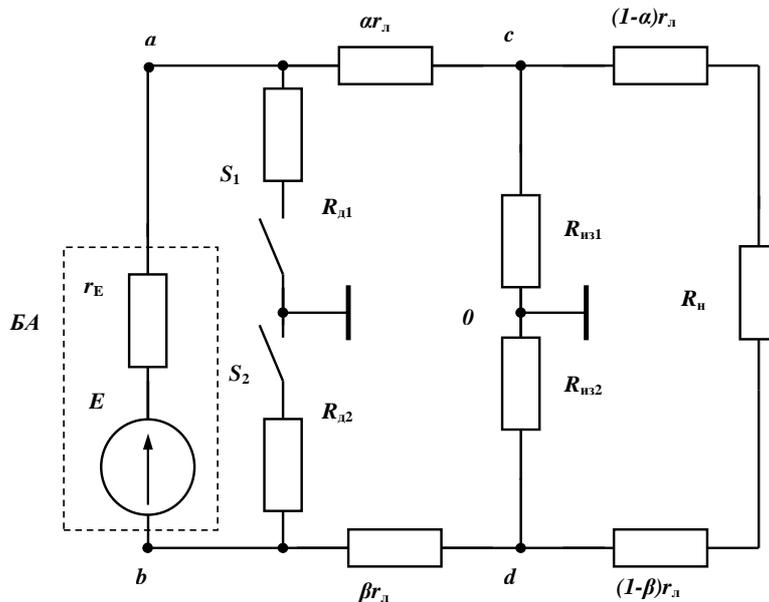


Рисунок 2.10 - Схема замещения СЭП на постоянном токе с учетом сопротивления шин питания

## 2.6 Разработка функциональной схемы и алгоритма электротехнической системы мониторинга работоспособностиЭКЭП АТО

Проведенные ранее исследования позволяют синтезировать функциональную схему электротехнической системы мониторинга сопротивленияЭКЭП АТО. Для чего необходимо принять следующие допущения:

1. Прибор соединяется с исследуемой цепью тремя щупами, между которыми включены фильтры-ограничители помех.
2. Сопротивления шунтов-делителей  $R_{ш+}$  и  $R_{ш-}$ , включённых между шинами питания, подобраны с погрешностью 0,2% и могут изменяться в диапазоне от 10 до 100 кОм. Напряжения с шунтов являются входными сигналами быстродействующих АЦП [56], расположенных в контроллере (рис.2.11.).

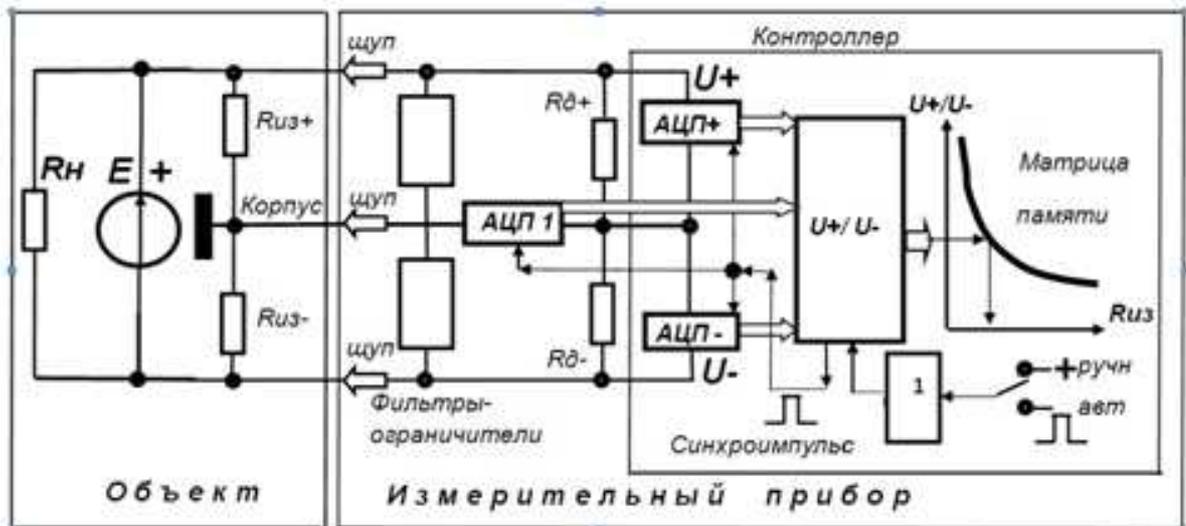


Рисунок 2.11 - Функциональная схема модифицированного варианта измерения  $R_{из.экв}$  шинЭКЭП с быстродействующим 10- разрядным АЦП.

Схема состоит элементов описанных в схеме замещения, а также быстродействующим 10-разрядном АЦП и контроллере [3,4,26]. Прибор АЦП соединяется с исследуемой цепью тремя щупами, между которыми включены фильтры-ограничители помех. Напряжения с шунтов являются входными сигналами быстродействующих АЦП, расположенных в контроллере.

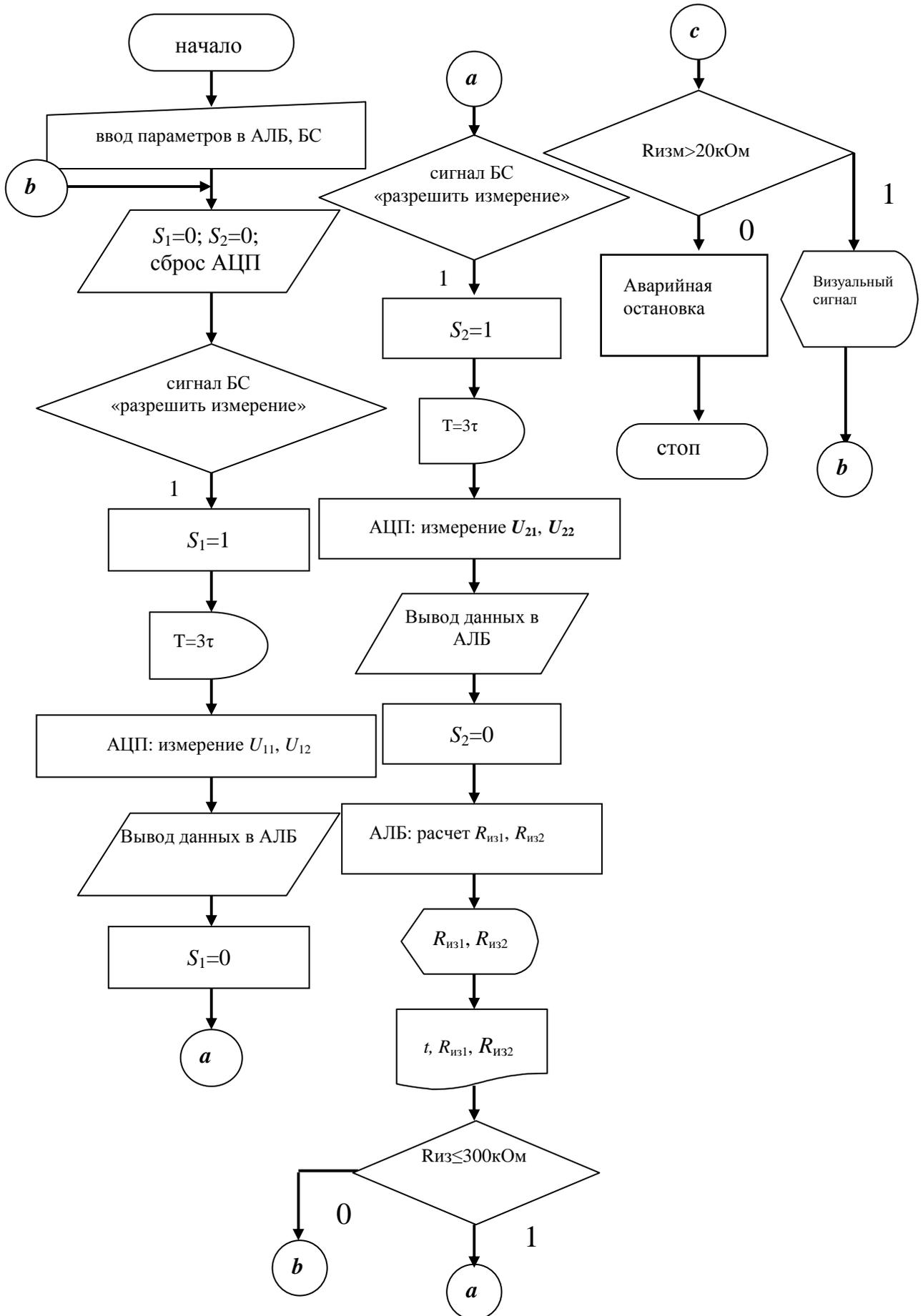


Рисунок 2.12 - Блок-схема алгоритма функционирования электротехнической системы мониторинга сопротивления изоляции.

Идентичность помех, действующих на обе шины питания достигается запуском АЦП одним синхроимпульсом, так что измерения двух напряжений между шинами питания и корпусом производятся одновременно. По результатам измерений контроллер подсчитывает отношение  $U_+/U_-$  и определяет неисправную шину питания, а затем и эквивалентное сопротивление шины  $R_{\text{экв}}$  относительно корпуса, как функцию  $f(U_-/U_+)$ , при необходимости используя два соседних (реперных) значения для линейной, либо круговой интерполяции.

При резком снижении сопротивления изоляции хотя бы одной из шин, контроллером обеспечивается сигнал о неисправности. На основе предложенной функциональной схемы, разработан алгоритм работы проектируемой системы мониторинга, с комплексным учетом оценки критического состояния ЭКЭП АТО.

Порядок функционирования работы проектируемой системы мониторинга, с комплексным учетом оценки критического состояния ЭКЭП АТО выглядит следующим образом:

- 1) ключи  $S_1$  и  $S_2$  устанавливаются в состояние  $S_1 = 1, S_2 = 0$ ;
- 2) производятся измерения напряжений  $U_{11}$  и  $U_{12}$  с выходов низкочастотных фильтров, обеспечивающих подавление высокочастотных шумов;
- 3) производится запись кодов  $U_{11}$  и  $U_{12}$  в регистры арифметико-логического блока;
- 4) ключи  $S_1$  и  $S_2$  устанавливаются в состояние  $S_1 = 0, S_2 = 1$ ;
- 5) производятся измерения напряжений  $U_{21}$  и  $U_{22}$  с выходов низкочастотных фильтров, обеспечивающих подавление высокочастотных шумов;
- 6) производится запись кодов  $U_{21}$  и  $U_{22}$  в регистры арифметико-логического блока;
- 7) производятся вычисления коэффициентов  $K_1 = U_{11}/U_{12}$ ,  $K_2 = U_{21}/U_{22}$ , сопротивлений изоляции  $R_{\text{из1}}$ ,  $R_{\text{из2}}$ .

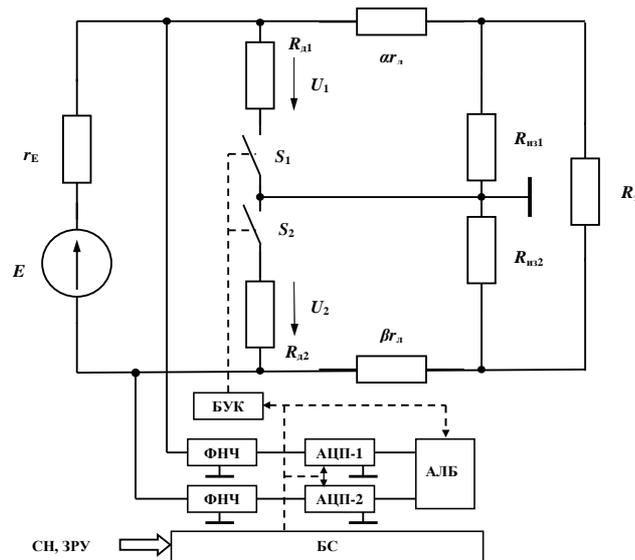


Рисунок 2.13 - Функциональная схема системы контроля сопротивления изоляции

На рис. 2.13-  $R_{д1}$ ,  $R_{д2}$  – эталонный делитель напряжения,  $S_1$ ,  $S_2$  – ключи (рекомендуемое исполнение – герконы), БУК – блок управления ключами  $S_1$  и  $S_2$ , ФНЧ – низкочастотные фильтры, АЦП – аналого-цифровые преобразователи, АЛБ – арифметико-логический блок, БС – блок синхронизации

Блок синхронизации обеспечивает согласование во времени работы узлов комплексной системы мониторинга работоспособности автономного транспортного объекта с коммутаторами ЭКЭП. Предлагаемая к технической реализации функциональная схема системы мониторинга работоспособности ЭКЭП АТО по критерию сопротивление изоляции шин питания приведена на рис 2.13.

## 2.7 Выводы по главе 2

Проведен анализ существующих и перспективных проектов ЭМБ, АКЭУ, АТО с точки зрения разработки и реализации электротехнической системы мониторинга ЭКЭП. Предложен метод мониторинга работоспособности ЭКЭП, разработана функциональная схема соответствующей электротехнической системы и проведено ее техническое обоснование.

Предложена функциональная электрическая схема электромобиля. В соответствии с предложенной концепцией системы мониторинга работоспособности ЭКЭП по критерию сопротивления изоляции, предлагаемый подход заключается в контроле напряжения между шинами питания и корпусом, при различном состоянии ключей S.

Разработанный алгоритм системы мониторинга работоспособности ЭКЭП дает возможность анализировать рабочее и критическое состояние АТО.

Составлена схема замещения ЭКЭП АТО с интеграцией электротехнической системой мониторинга сопротивления изоляции.

Достоверность предложенной схемы ЭКЭП АТО будет подтверждена математическим имитационным моделированием в следующей главе.

### 3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА РАБОТОСПОСОБНОСТИ ЭКЭП АТО

#### 3.1 Постановка задачи моделирования

Целью моделирования ЭКЭП АТО является уточнение и проверка на имитационных и математических моделях методов контроля сопротивления изоляции.

С учётом поставленных целей можно ввести следующие допущения:

1. Первичный источник энергии (солнечная батарея) моделируется источником напряжения с периодическим законом его изменения.
2. Зарядное устройство (ЗУ) моделируется путем введения противоЭДС стабилизирующего напряжение заряда аккумуляторной батареи (АКБ).
3. Стабилизатор напряжения (СН) так же моделируется путем введения противоЭДС стабилизирующего напряжение на шинах питания нагрузки.
4. Система управления СН построена на основе ПИД регулятора.
5. Сопротивление изоляции принимается сосредоточенным.
6. Нагрузка ЭКЭП АТО рассматривается как имеющая активную, индуктивную и ёмкостную составляющие проводимости. Схема замещения или её модель может быть представлена как параллельная или последовательная  $RLC$  – цепь.

Моделирование ЭКЭП проводится с помощью системы *Matlab 6.5* с использованием библиотеки блоков *SimPowerSystems*. [63,64] Несомненным достоинством *SimPowerSystems* является то, что сложные электроэнергетические комплексы ЭКЭП АТО можно моделировать, сочетая методы имитационного и структурного моделирования. Так модель силовой части параллельной схемы ЭКЭП АТО с коммутатором солнечной батареи (БС) (рис.3.1) выполняется с использованием имитационных блоков *SimPowerSystems* [40,71,72], а система управления с помощью обычных блоков *Simulink*, отражающих лишь алгоритм ее работы, а не ее принципиальную электрическую схему. В процессе нормального

функционирования данной схемы фильтр помехоподавления антистатический (ФА) не оказывает влияния на работу СЭП, поэтому на данном этапе проводится моделирование без его учёта.

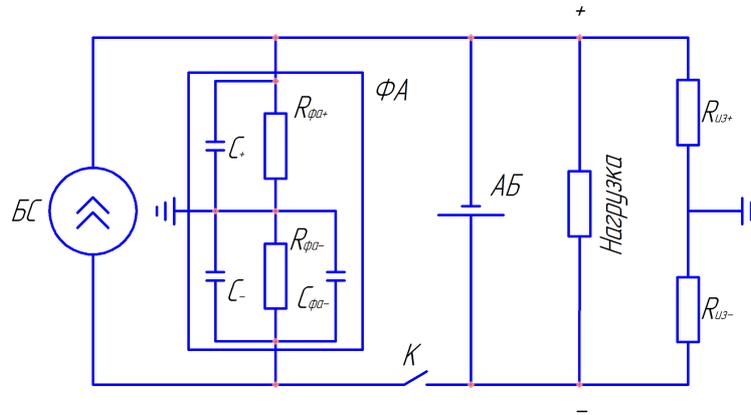


Рисунок 3.1- Параллельная схема ЭКЭП с коммутатором БС

### 3.2 Математическое моделирование электротехнической системы ЭКЭП с питанием только от АКБ

Для наиболее полного учета возможных режимов работы АТО, в процессе моделирования, необходимо провести исследования всех основных вариантов конфигурации схемы ЭКЭП. С этой точки зрения, основные конфигурации включают в себя: питание АТО только от АКБ (рис.3.2, расчетная модель (3.1)). Моделирование проводится для трех режимов эксплуатации: нормальный режим, пробой на одной из шин, пробой на двух шинах.

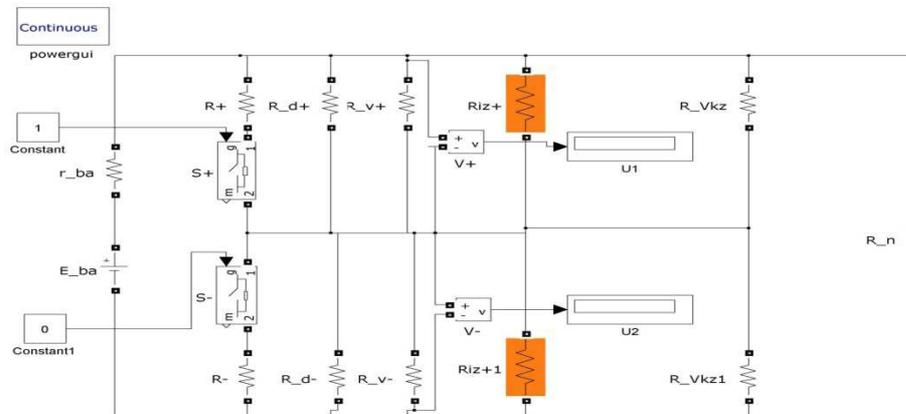


Рисунок 3.2- Имитационная модель схемы замещения ЭКЭП АТО при питании от АКБ в среде *Matlab/ Simulink*

На рис. 3.2.  $S_+$ ,  $S_-$  - ключи коммутации,  $E_{БА}$  - аккумуляторная батарея,  $r_{ба}$  - внутреннее сопротивление аккумуляторной батареи,  $BС$  - солнечная батарея,  $s_+$  - ключ,  $R_+$ ,  $R_-$  - сопротивление коммутируемого эталонного шунта,  $R_{d+}$ ,  $R_{d-}$  - сопротивление делителя,  $R_{v+}$ ,  $R_{v-}$  - сопротивление измерительного вольтметра,  $R_{iz+}$ ,  $R_{iz-}$  - сопротивление изоляции,  $R_{vkz+}$ ,  $R_{vkz-}$  - сопротивление сигнализируемого вольтметра,  $R_n$ , сопротивление нагрузки.

По представленной методике (2.44), получена расчетная модель схемы электропитания АТО только от АКБ (3.3). Однако, для оценки адекватности упрощенной модели (3.2), которая не учитывает падение напряжения на линии, необходимо провести более сложные исследования. Для этого, нами проведена разработка и исследование имитационной модели, аналогичной (рис.3.2), учитывающей сопротивления линии шин питания, представленной на рис. 3.3.

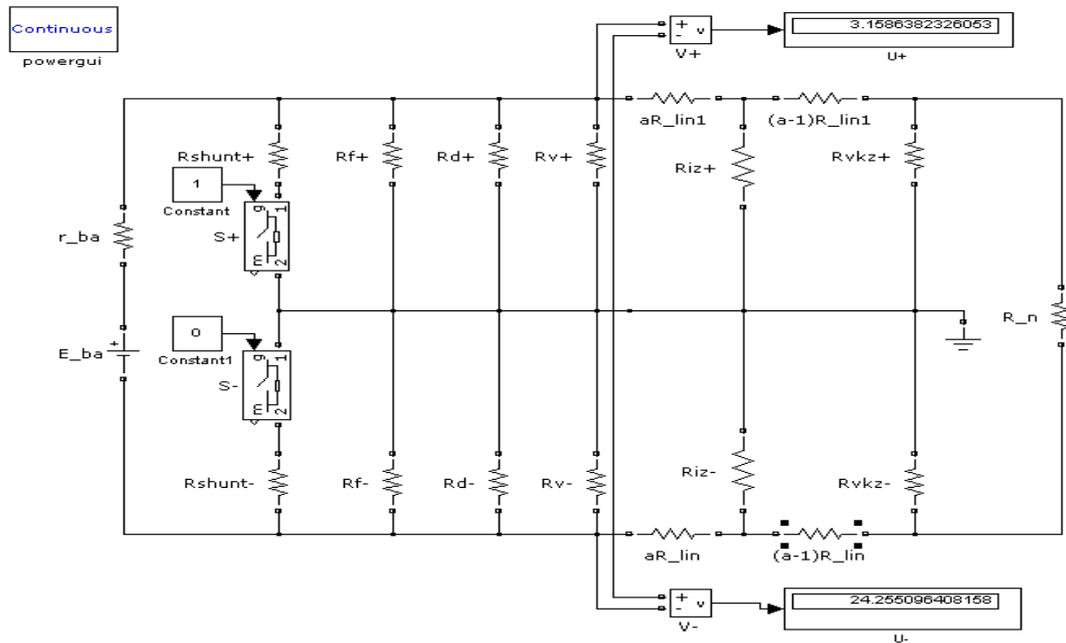


Рисунок 3.3- Схема замещения ЭКЭП АТО на постоянном токе с учетом сопротивления шин питания.

Показано на рисунке 3.3  $BС$  - солнечная батарея,  $S_+$ ,  $S_-$  - ключи коммутации,  $E_{БА}$  - аккумуляторная батарея,  $r_{ба}$  - внутреннее сопротивление аккумуляторной

батареи,  $B_S$ -солнечная батарея,  $s_1$ - ключ,  $R_+$ ,  $R_-$  - сопротивление коммутируемого эталонного шунта,  $R_{d+}$ ,  $R_{d-}$  - сопротивление делителя,  $R_{f+}$ ,  $R_{f-}$  сопротивление фильтра,  $R_{v+}$ ,  $R_{v-}$  - сопротивление измерительного вольтметра,  $R_{iz+}$ ,  $R_{iz-}$  - сопротивление изоляции,  $R_{vkz+}$ ,  $R_{vkz-}$  - сопротивление сигнализируемого вольтметра,  $R_n$ , сопротивление нагрузки,  $aR_{lin1}$ ,  $(a-1)R_{lin1}$ - учет сопротивления линии.

С учетом специфики схемы (наличие ИБС с изменяющимися параметрами напряжения холостого хода и внутреннего сопротивления, ШР РИМ) целесообразно провести замену двух источников и регулятора эквивалентным источником. Очевидно, что для нормальной эксплуатации его напряжение холостого хода и внутреннее сопротивление эквивалентного источника близки к соответствующим параметрам БА, которые практически не влияют на оценки значений сопротивлений изоляции при выбранных для измерения переменных. Это можно использовать в процессе моделирования численными методами расчетной схемы с учетом неконтролируемых значений параметров линии. Сохраним для эквивалентного источника обозначение АКБ.

Анализ модели проведен двумя способами:

- 1) для вычисления значений  $R_{из+}$ ,  $R_{из-}$  выполнен расчет схемы в предположении малости влияния неизвестных параметров ( $\alpha = 0$ ,  $(1 - \alpha) r_l = 0$ ,  $r_{БА} = 0$ ).
- 2) выполнен расчет схемы по методу контурных токов в предположении, что все параметры, включая значения сопротивления линии, внутреннего сопротивления БА, места утечки ( $\alpha$ ) известны; найдены значения напряжений  $U_1$ ,  $U_2$  (показания вольтметров);

Полученные значения сравнивались со значениями, принятыми при выполнении расчетов (приложение 2). Различие результатов позволяет оценить погрешность метода. Оценки погрешностей производились при различных сочетаниях параметров цепи. Это позволяет оценить практическую приемлемость метода.

Рассмотрим сначала анализ идеализированной модели в соответствии с условиями  $r_{БА} = 0$ ,  $r_{Л} = 0$ . Расчетная схема модели принимает вид, представленный на рис.3.3. При расчете цепи с целью получения выражений для  $R_{из+}$ ,  $R_{из-}$  в зависимости от показаний вольтметров  $U_1$ ,  $U_2$  целесообразно использовать метод узловых напряжений. Расчетные схемы для комбинаций  $S_+ = 1, S_- = 0$  и  $S_+ = 0, S_- = 1$  приведены на рис. 3.4. а,б.

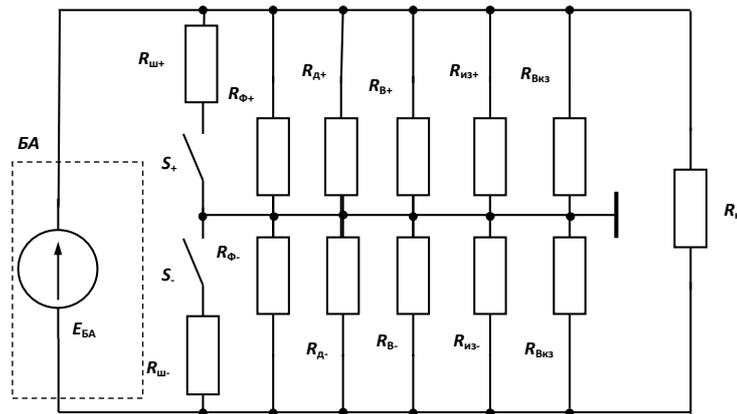


Рисунок 3.4- Идеализированная расчетная схема ЭКЭП при питании только от АКБ

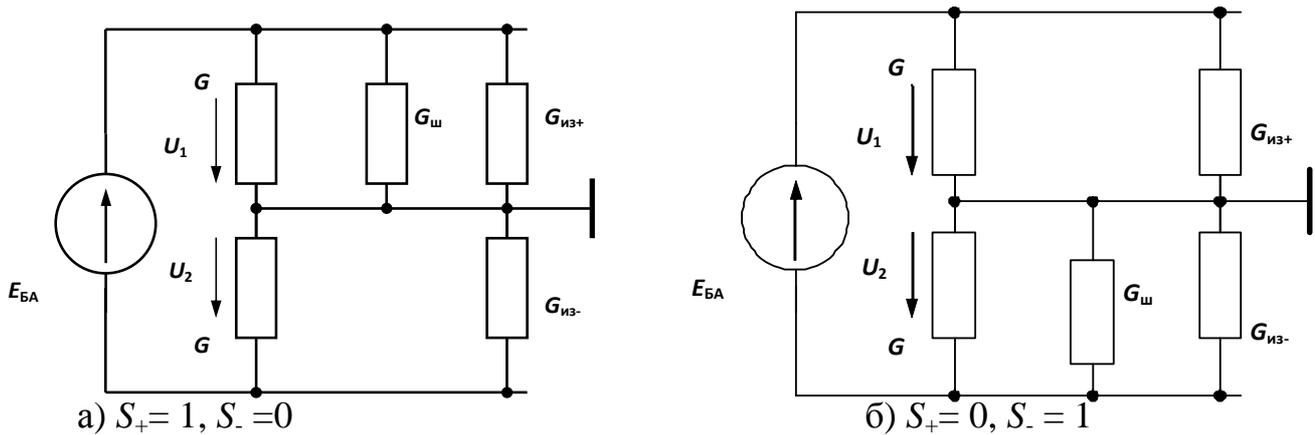


Рисунок 3.5- Расчетные схемы ЭКЭП при питании от АКБ для записи уравнений по 1-му закону Кирхгофа,

где  $G=1/R_{\phi}+1/R_{В}+1/R_{Д}+1/R_{ВКЗ}$ ;  $G_{ш}=1/R_{ш}$ ;  $G_{из+}=1/R_{из+}$ ;  $G_{из-}=1/R_{и}$

При проведении вычислений принято, что значения сопротивлений делителя, фильтра, вольтметров, шунтов в цепях с индексами (+) и (-) равны. Анализ проведен для двух сочетаний состояний ключей  $S_+$  и  $S_-$ :  $S_+ = 1$ ,  $S_- = 0$  и  $S_+ = 0$ ,  $S_- = 1$ . Предполагается, что измерения напряжений  $U_1$ ,  $U_2$  проводятся одновременно для каждой пары состояний ключей  $S_+$  и  $S_-$ . Чтобы исключить влияние возможного изменения напряжения источника электроэнергии при переходе от одной пары измерений к другой, каждая из пар измерений заменяется отношением  $U_1/U_2$ .

Относительно узла «корпус» уравнения по первому закону Кирхгофа для случаев  $S_+ = 1$ ,  $S_- = 0$  и  $S_+ = 0$ ,  $S_- = 1$  имеют соответственно вид:

$$\begin{aligned} U_{11}(G + G_{\text{ш}} + G_{\text{из}+}) &= U_{21}(G + G_{\text{из}-}), \\ U_{12}(G + G_{\text{из}+}) &= U_{22}(G + G_{\text{ш}} + G_{\text{из}-}). \end{aligned} \quad (3.1)$$

Тогда выражения для вычислений  $G_{\text{из}+}$ ,  $G_{\text{из}-}$  и математическая модель для расчета сопротивления изоляции в комплексной системе мониторинга работоспособности ЭКЭП АТО с оценкой критического состояния представлена в виде:

$$\begin{aligned} G_{\text{из}+} &= \frac{1 + K_1}{K_2 - K_1} G_{\text{ш}} - G, \\ G_{\text{из}-} &= \frac{K_2 + 1}{K_2 - K_1} K_1 G_{\text{ш}} - G, \end{aligned} \quad (3.2)$$

где

$$\begin{aligned} R_{\text{из}+} &= 1/G_{\text{из}+}; R_{\text{из}-} = 1/G_{\text{из}-}; \\ K_1 &= \frac{U_{11}}{U_{21}}; K_2 = \frac{U_{12}}{U_{22}}; G = G_{\Phi} + G_{\text{д}} + G_{\text{в}} + G_{\text{вкз}}; \\ G_{\Phi} &= 1/R_{\Phi}; G_{\text{д}} = 1/R_{\text{д}}; G_{\text{в}} = 1/R_{\text{в}}; G_{\text{вкз}} = 1/R_{\text{вкз}}. \end{aligned}$$

Напряжения  $U_{11}$ ,  $U_{21}$  получены для комбинации  $S_+ = 1$ ,  $S_- = 0$ , напряжения  $U_{12}$ ,  $U_{22}$  – для комбинации  $S_+ = 0$ ,  $S_- = 1$ .

Таблица 3.1- Сравнительная таблица полученных значений сопротивления изоляции

Заданные в модели значения сопротивления изоляции, кОм		Полученные значения без учета сопротивления линии, кОм		Погрешность, %		Полученные значения с учетом сопротивления линии, кОм		Погрешность, %	
R <sub>из+</sub>	R <sub>из-</sub>	R <sub>из+</sub>	R <sub>из-</sub>	δ+, %	δ-, %	R <sub>из+</sub>	R <sub>из-</sub>	δ+, %	δ-, %
1000	1000	998,688	998,68	0,13	0,13	1000	1000	0	0
1000	100	886,128	101,28	11,39	1,28	951,526	100,512	4,85	0,51
1000	10	416,299	10,142	58,37	1,42	640,871	10,056	58,51	1,43

Для проведения расчетов с учетом неидеальностей эквивалентного источника и линии принята упрощенная схема замещения (рис. 3.5, 3.6). Для состояний ключей  $S_+ = 1, S_- = 0$  и  $S_+ = 0, S_- = 1$  использованы эквивалентные схемы замещения; используемые обозначения приведены в подрисуночной подписи. Значения сопротивлений аккумуляторной батареи и сопротивления линии в отсутствие опытных данных выбираются условно (например,  $r_{БА} = 0,01R_H, r_L = 0,03R_H$ ); эти значения в процессе выполнения расчетов можно изменять, анализируя степень их влияния на погрешности определения сопротивлений изоляции.

Система уравнений по методу контурных токов для схемы замещения рис. 3.6 имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}
 R_{11}I_{11} + R_{12}I_{22} + R_{13}I_{33} + R_{14}I_{44} + R_{15}I_{55} + R_{16}I_{66} &= E_{БА}, \\
 R_{21}I_{11} + R_{22}I_{22} + R_{23}I_{33} + R_{24}I_{44} + R_{25}I_{55} + R_{26}I_{66} &= 0, \\
 R_{31}I_{11} + R_{32}I_{22} + R_{33}I_{33} + R_{34}I_{44} + R_{35}I_{55} + R_{36}I_{66} &= 0, \\
 R_{41}I_{11} + R_{42}I_{22} + R_{43}I_{33} + R_{44}I_{44} + R_{45}I_{55} + R_{46}I_{66} &= 0, \\
 R_{51}I_{11} + R_{52}I_{22} + R_{53}I_{33} + R_{54}I_{44} + R_{55}I_{55} + R_{56}I_{66} &= 0, \\
 R_{61}I_{11} + R_{62}I_{22} + R_{63}I_{33} + R_{64}I_{44} + R_{65}I_{55} + R_{66}I_{66} &= 0.
 \end{aligned} \tag{3.3}$$

В системе (3.3) приняты следующие обозначения с учетом обозначений, приведенных в подрисуночной надписи:

$$R_{11}=r_E+R_++R_-, R_{12}=R_{21}=-R_+, R_{13}=R_{31}=-R_-, R_{14}=R_{41}=0, R_{15}=R_{51}=0, R_{16}=R_{61}=0,$$

$$R_{22}=R_++\alpha r_{л}+R_{из+}, R_{23}=R_{32}=0, R_{24}=R_{42}=-R_{из+}, R_{25}=R_{52}=0, R_{26}=R_{62}=0,$$

$$R_{33}=R_++\alpha r_{л}+R_{из-}, R_{34}=R_{43}=0, R_{35}=R_{53}=-R_{из-}, R_{36}=R_{63}=0,$$

$$R_{44}=R_{из+}+(1-\alpha)r_{л}+R_{Вкз}, R_{45}=R_{54}=0, R_{46}=R_{64}=-R_{Вкз},$$

$$R_{55}=R_{из-}+(1-\alpha)r_{л}+R_{Вкз}, R_{56}=R_{65}=-R_{Вкз},$$

$$R_{66}=R_{Вкз}+R_{Вкз}+R_H.$$

С учетом значений  $R_+$  и  $R_-$  для двух комбинаций ключей ( $S_+ = 1, S_- = 0$  и  $S_+ = 0, S_- = 1$ ) формируются две системы линейных алгебраических уравнений с постоянными коэффициентами относительно напряжений  $U_1$  и  $U_2$ .

В табличном процессоре MS Excel производилось задание известных параметров системы КСИ, неконтролируемых значений  $\alpha$  и значений сопротивлений изоляции. Из решения систем линейных алгебраических уравнений вида (3.3) для случаев  $S_+ = 1, S_- = 0$  и  $S_+ = 0, S_- = 1$  вычислялись значения контурных токов и напряжений вольтметров  $U_1$  и  $U_2$ :  
 $U_1 = R_+(I_{11} - I_{22}), U_2 = R_-(I_{11} - I_{33}).$

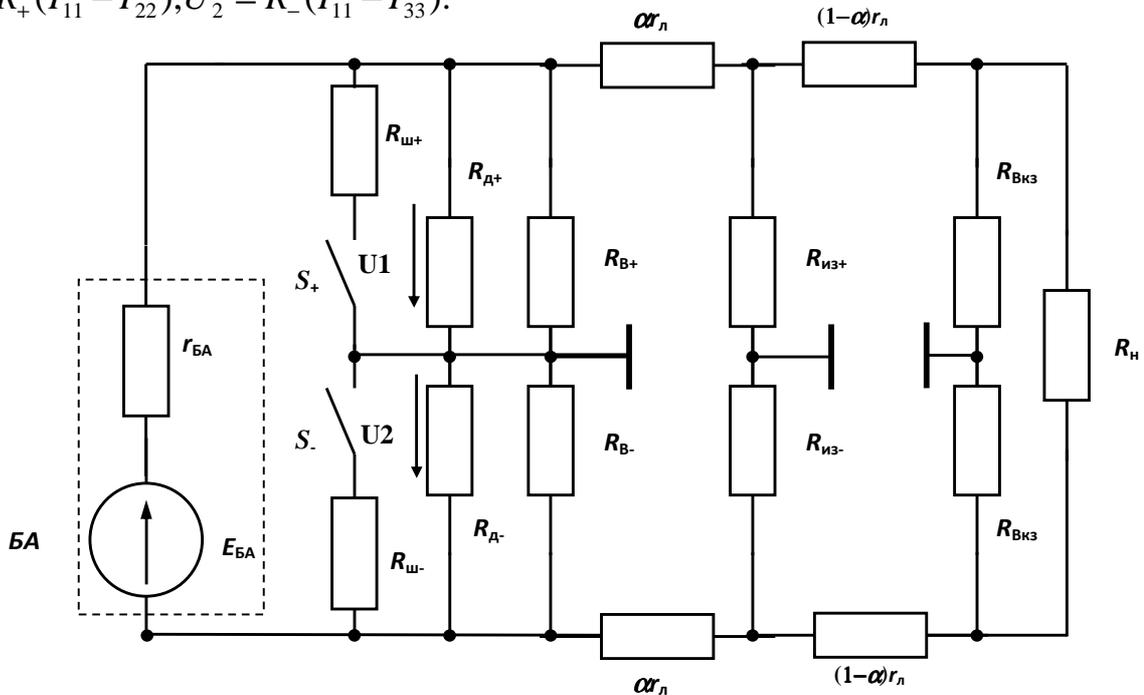


Рисунок 3.6- Упрощенная схема замещения параллельной схемы ЭКЭП АТО с шунтовым регулятором.

Затем по полученным значениям с использованием формул (3.2) – (3.3) вычислялись значения сопротивлений изоляции. Сопоставление задаваемых для метода контурных токов и вычисляемых по соотношениям (3.2) значений сопротивлений изоляции позволило произвести оценку погрешности метода и возможность его применения для реализации в системе мониторинга сопротивления изоляции.

В таблицах 3.2 приведена форма для ввода исходных данных при расчете модели, расширенные матрицы систем уравнений по методу контурных токов для случаев  $S_+ = 1, S_- = 0$  и  $S_+ = 0, S_- = 1$ .

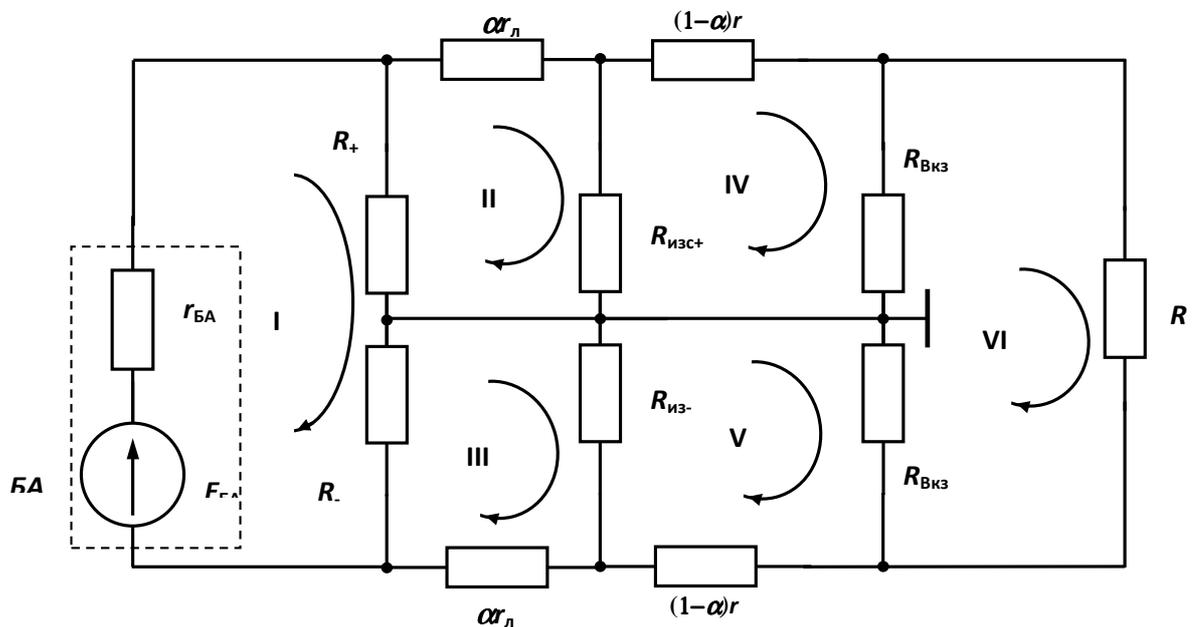


Рисунок 3.7- Схема замещения ЭКЭП для расчета методом контурных токов  $S_+ = 1, S_- = 0, R_+ = R_\Phi || R_{III} || R_D || R_B, R_- = R_\Phi || R_D || R_B$ , вычисляются значения  $U_{11}, U_{21}$ ,  $S_+ = 0, S_- = 1, R_+ = R_\Phi || R_D || R_B, R_- = R_\Phi || R_{III} || R_D || R_B$ , вычисляются значения  $U_{12}, U_{22}$ .

Расчет сопротивления изоляции был проведен из матриц, составленных по МКТ решенных в табличном процессоре *MS Excel*. Результаты расчетов представлены в таблице 3.3. Анализ представленной таблицы показывает, что значения сопротивления изоляции, найденные различными методами, с помощью различных моделей, имеют значительные расхождения. Поэтому можно сделать

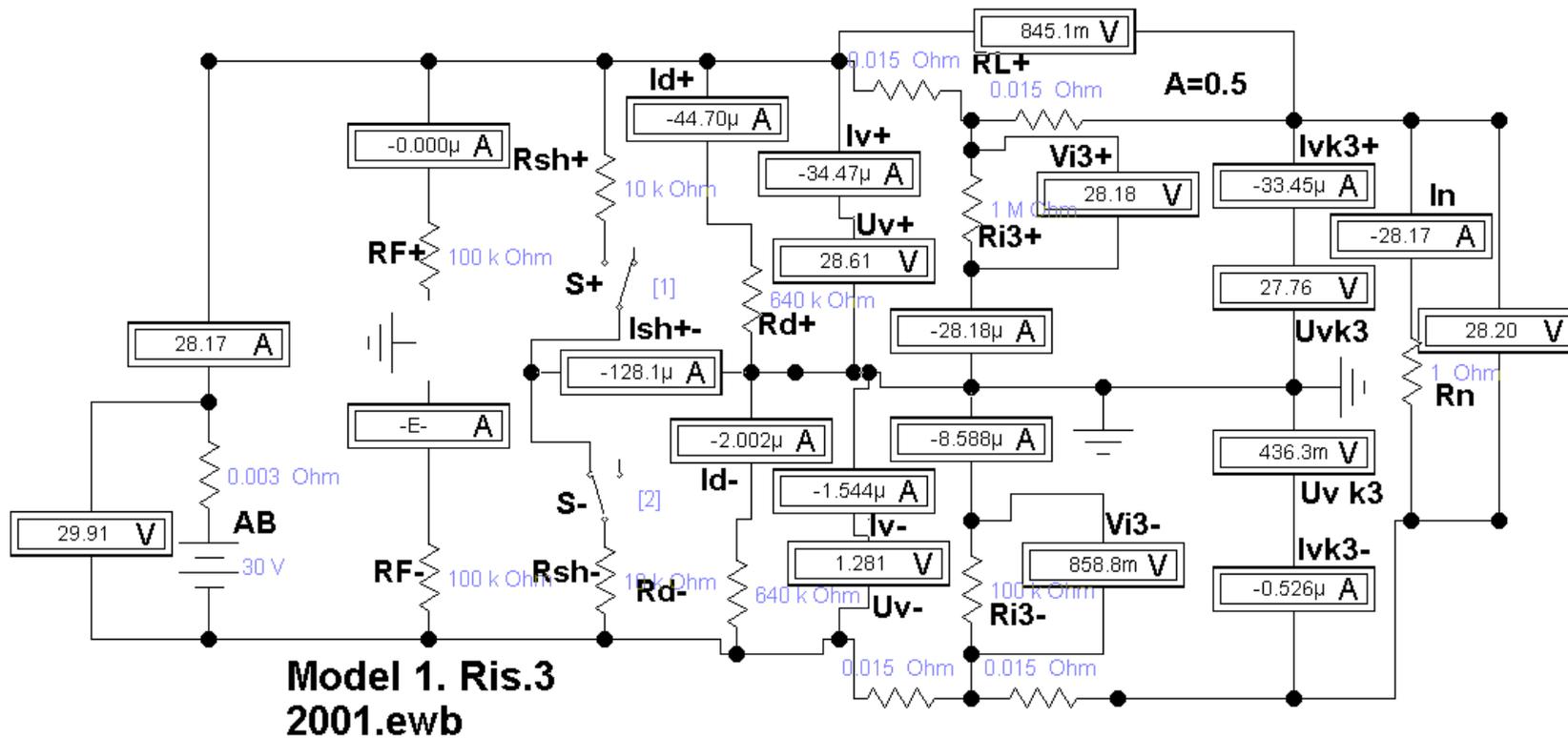


Рисунок 3.8 - Схема реализации системы мониторинга работоспособности ЭКЭП АТО при питании от АКБ в среде Electronics Workbench.

вывод об адекватности упрощенной (3.1) и более сложной учитывающей падение напряжение в шинах питания моделей, друг другу. Дальнейшие исследования проводятся на моделях с учетом сопротивления линии. Начальные параметры системы представлены в таблицы 3.2 Реализация системы мониторинга работоспособности ЭКЭП ААТО при питании от аккумуляторной батареи при учете всех элементов схемы имитирована в среде Electronics Workbench показано на рисунке 3.8.

Таблица 3.2- Начальные параметры системы электропитания АТО

Параметры	R <sub>ф</sub>	R <sub>д</sub>	R <sub>в</sub>	R <sub>ш</sub>	R <sub>вкз</sub>	R <sub>н</sub>	E	rE
кОм	100	640	830	10	830	0,001	30	0,0001

Таблица 3.3- Результаты математического моделирования имитационная схемы замещения ЭКЭП АТО при питании от АКБ.

Заданные значения, кОм		Полученные данные в ходе эксперимента, В						Полученные значения, кОм		Отн. погрешность	
R <sub>из+</sub>	R <sub>из-</sub>	U11	U21	k1	U12	U22	k2	R <sub>из+</sub>	R <sub>из-</sub>	д+,%	д-,%
10000,000	10000,000	3,010807	24,40311	0,123378014	24,40311	3,010807	8,105171803	6590,9	6593	43,86	43,34
1000,000	1000,000	3,158815	24,25492	0,130233995	24,25492	3,158815	7,678486711	421,898	620,8	90,91	61,06
100,000	100,000	4,442205	22,97159	0,193378229	22,97159	4,442205	5,171212945	497,996	490,9	50,00	0,0
10,000	10,000	9,527243	17,88636	0,532654041	17,88636	9,527243	1,877391182	9,091	9,091	9,09	1,01
1,000	1,000	13,06216	14,35038	0,910230924	14,35038	13,06216	1,09862231	0,990	0,990	0,99	0,0
0,100	0,100	13,63287	13,76903	0,990111355	13,76903	13,63287	1,009987407	0,100	0,100	0,09	0,0
1000,000	100,000	4,704738	22,70898	0,207175205	24,43445	2,979312	8,20137233	659,859	96,31	51,55	0,69
1000,000	10,000	13,47927	13,93439	0,967338216	25,45313	1,960623	12,98216179	725,631	9,808	37,84	1,95
1000,000	1,000	24,27843	3,135115	7,744030442	26,70689	0,706869	37,78194687	820,781	1,004	21,83	0,39
1000,000	0,100	26,71935	0,694161	38,49158048	26,99024	0,423483	63,73394682	590,558	0,101	69,33	0,0
1000,000	0,010	26,99457	0,418946	64,43447843	27,05556	0,391532	69,10177201	676,715	0,010	47,23	0,0

В табл. 3.3 приведены отдельные результаты расчетов математического моделирования питания только от АКБ рассчитанные в табличном процессоре. Из приведенных данных следует:

- 1) модель дает точные результаты в случае, когда сопротивление линии равно нулю;
- 2) расчетные соотношения позволяют найти значения сопротивлений изоляции; погрешность вычислений возрастает с ростом значения неконтролируемого параметра  $\alpha$ ;
- 3) результаты вычислений показывают, что хотя значения большего сопротивления, в ряде случаев существенно занижены, однако значения меньшего сопротивления изоляции вычисляются с приемлемой погрешностью;
- 4) для рассматриваемой параллельной схемы ЭКЭП с шунтовым регулятором предлагаемый метод может быть рекомендован к использованию. При этом целесообразно осуществлять контроль результатов последовательных вычислений сопротивлений изоляции с целью выявления негативных тенденций.

Дополнительным источником погрешностей, не учтенных в рассмотренной модели, является ограниченное число разрядов вольтметра (АЦП). Предлагаемая модель и используемые численные методы позволяют оценить погрешности определения сопротивлений изоляции за счет округлений АЦП.

Моделирование влияния числа значащих цифр АЦП проводилось с использованием округления результатов вычисления напряжений  $U_1$ ,  $U_2$  до трех и двух десятичных разрядов после десятичного разделителя, что соответствует соответственно 5 и 4 значащим цифрам в значениях  $U_1$ ,  $U_2$ . Оценки показывают, что влияние округления существенно меньше, чем влияние значений неконтролируемого параметра  $\alpha$ .

### **3.3 Математическое моделирование электротехнической системы ЭКЭП с питанием от АКБ и отключенной СБ**

Имитационная модель схемы замещения ЭКЭП АТО при питании от АКБ и отключенной СБ представлена на рисунке 3.11. Принципиальное отличие

данной схемы от предыдущей (3.4.) в том, что напряжение БС через плечи делителя АФ влияет на режим элементов системы мониторинга работоспособности ЭКЭП АТО.

Схема замещения параллельной схемы ЭКЭП с коммутатором БС (рис.3.7) включает модели имитатора солнечной батареи БС, антистатического фильтра ФА, нагрузки с питанием от БА, элементов системы контроля сопротивления изоляции (сопротивления делителя, коммутируемых шунтирующих сопротивлений, сопротивлений вольтметров) и элементов регистрации коротких замыканий (сопротивления вольтметров). Принципиальное отличие данной схемы от предыдущей в том, что напряжение БС через плечи делителя ФА влияет на режим элементов системы измерения сопротивления изоляции.

Анализ данной модели проведен по схеме, аналогичной анализу модели предыдущей :

- 1) для вычисления значений  $R_{из+}$ ,  $R_{из-}$  выполнен расчет схемы в предположении малости влияния неизвестных параметров ( $r_{Л} = 0$ ,  $r_{БА} = 0$ ); значения внутреннего сопротивления БС  $r_{БС}$  на текущем этапе неизвестны; схема замещения, по которой выполнен расчет, приведена на рисунке 3,9;

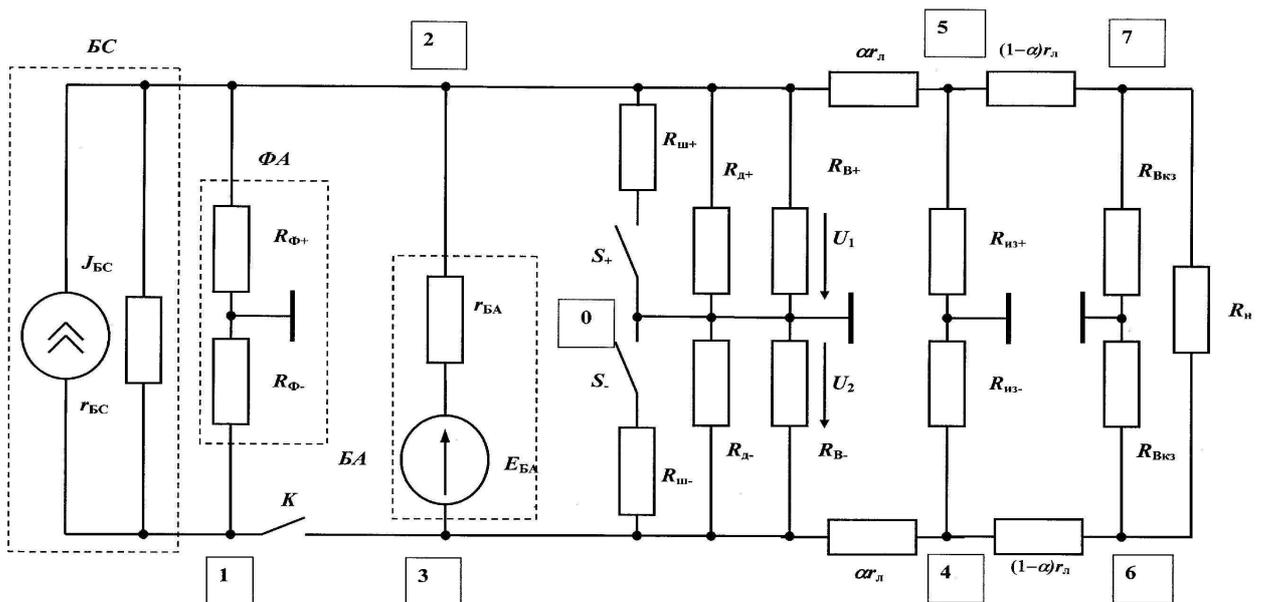


Рисунок 3.9- Схема замещения ЭКЭП с элементами системы мониторинга работоспособности АТО

2) выполнен расчет схемы (рис. 3.8) по методу узловых напряжений в предположении, что все параметры, включая значения сопротивления линии, внутреннего сопротивления БА, внутреннего сопротивления БС, положения места утечки ( $\alpha$ ), известны; найдены значения напряжений  $U_1$ ,  $U_2$  (показания вольтметров), которые использованы для вычисления значений сопротивлений изоляции  $R_{из+}$ ,  $R_{из-}$  по соотношениям п. 1).

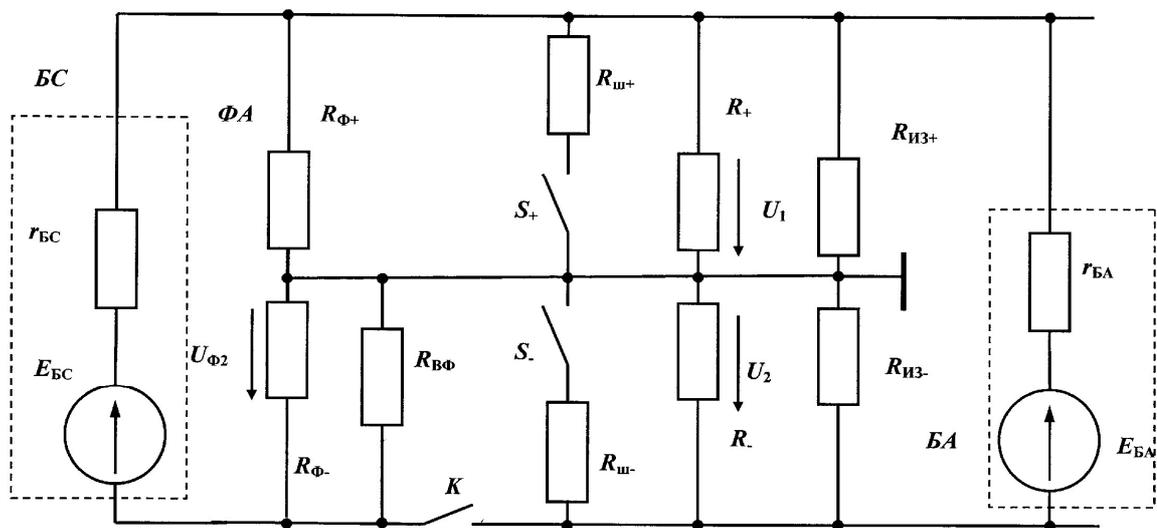


Рисунок 3.10- Схема замещения ЭКЭП для вывода расчетных соотношений

$$R_{из+}, R_{из-}, \text{ где } R_+ = R_- = R = R_{д} || R_{в} || R_{вкз}$$

Для выполнения расчетов сопротивлений изоляции принято, что необходимо измерять значения напряжений  $U_1$  (между (+) и корпусом),  $U_2$  (между корпусом и (-)),  $U_{\Phi 2}$  (на плече фильтра ФА со стороны (-)). Измерения напряжений проводятся для комбинаций  $S_+ = 1, S_- = 0$  и  $S_+ = 0, S_- = 1$ . В каждой из двух серий измерений проводится нормирование значений напряжений с тем, чтобы снизить влияние изменения напряжения источников на вычисляемые значения сопротивлений изоляции.

Для схемы замещения (рис. 3.10) без учета источников БС и БА записаны уравнения по первому закону Кирхгофа для узла 0 (корпус). После элементарных преобразований получается система линейных алгебраических уравнений относительно проводимостей изоляций  $G_{из+}$ ,  $G_{из-}$  (Приложение А.4):

$$\begin{aligned} G_{из+} - G_{из-} \frac{U_{21}}{U_{11}} &= -(G_{\Phi} + G_{Ш} + G_{+}) + (G_{\Phi} + G_{B\Phi}) \frac{U_{21}}{U_{11}} + G_{-} \frac{U_{21}}{U_{11}}, \\ G_{из+} - G_{из-} \frac{U_{22}}{U_{12}} &= -(G_{\Phi} + G_{+}) + (G_{\Phi} + G_{B\Phi}) \frac{U_{22}}{U_{12}} + (G_{Ш} + G_{+}) \frac{U_{22}}{U_{12}}, \\ R_{из+} &= 1/G_{из+}; R_{из-} = 1/G_{из-}. \end{aligned} \quad (3.4)$$

Индекс (1) в обозначениях напряжений  $U_1$ ,  $U_2$  соответствует случаю  $S_+ = 1$ ,  $S_- = 0$ , индекс (2) - случаю  $S_+ = 0$ ,  $S_- = 1$ .  $R_+ = R_- = R = R_{Д} || R_{В} || R_{Вкз}$

Из этой системы можно выразить значения искомых параметров  $G_{из+}$ ,  $G_{из-}$  в явном виде. Использован иной подход: решение системы (3.4) найдено в табличном процессоре MS Excel; использованы такие же значения параметров, которые применены при реализации следующего этапа анализа – моделирования системы с учетом неидеальностей.

Расчет схемы рис. 3.10 проведен в табличном процессоре *MS Excel* с использованием метода узловых напряжений. Составлена система уравнений седьмого порядка, решение найдено с использованием обратной матрицы. Определены напряжения  $U_{11}$ ,  $U_{21}$ ,  $U_{12}$ ,  $U_{22}$ ,  $U_{\Phi 21}$ ,  $U_{\Phi 22}$  (индекс (1) в обозначениях напряжений  $U_1$ ,  $U_2$  соответствует случаю  $S_+ = 1$ ,  $S_- = 0$ , индекс (2) - случаю  $S_+ = 0$ ,  $S_- = 1$ ),

$$U_1 = \varphi_{22} - \varphi_0, U_2 = \varphi_0 - \varphi_{33}, U_{\Phi 2} = \varphi_{11} - \varphi_0.$$

Это позволило выполнить расчет сопротивлений изоляции с использованием системы уравнений (3.4). Система уравнений по методу узловых напряжений для схемы рис. 3.8 имеет вид (3.5)

$$\begin{aligned}
G_{11}\varphi_{11} + G_{12}\varphi_{22} + G_{13}\varphi_{33} + G_{14}\varphi_{44} + G_{15}\varphi_{55} + G_{16}\varphi_{66} + G_{17}\varphi_{77} &= -G_{BC}E_{BC}, \\
G_{21}\varphi_{11} + G_{22}\varphi_{22} + G_{23}\varphi_{33} + G_{24}\varphi_{44} + G_{25}\varphi_{55} + G_{26}\varphi_{66} + G_{27}\varphi_{77} &= G_{BC}E_{BC} + G_{BA}E_{BA}, \\
G_{31}\varphi_{11} + G_{32}\varphi_{22} + G_{33}\varphi_{33} + G_{34}\varphi_{44} + G_{35}\varphi_{55} + G_{36}\varphi_{66} + G_{37}\varphi_{77} &= -G_{BA}E_{BA}, \\
G_{41}\varphi_{11} + G_{42}\varphi_{22} + G_{43}\varphi_{33} + G_{44}\varphi_{44} + G_{45}\varphi_{55} + G_{46}\varphi_{66} + G_{47}\varphi_{77} &= 0, \\
G_{51}\varphi_{11} + G_{52}\varphi_{22} + G_{53}\varphi_{33} + G_{54}\varphi_{44} + G_{55}\varphi_{55} + G_{56}\varphi_{66} + G_{57}\varphi_{77} &= 0, \\
G_{61}\varphi_{11} + G_{62}\varphi_{22} + G_{63}\varphi_{33} + G_{64}\varphi_{44} + G_{65}\varphi_{55} + G_{66}\varphi_{66} + G_{67}\varphi_{77} &= 0, \\
G_{71}\varphi_{11} + G_{72}\varphi_{22} + G_{73}\varphi_{33} + G_{74}\varphi_{44} + G_{75}\varphi_{55} + G_{76}\varphi_{66} + G_{77}\varphi_{77} &= 0.
\end{aligned} \tag{3.5}$$

Узловые проводимости выражены через параметры схемы замещения и имеют следующие значения для случая  $S_+ = 1, S_- = 0$ :

$$\begin{aligned}
G_{11} &= (G_{\Phi} + G_{B\Phi}) + g_{BC}, \\
G_{12} = G_{21} &= -g_{BC}, \quad G_{13} = G_{31} = 0, \quad G_{14} = G_{41} = 0, \quad G_{15} = G_{51} = 0, \quad G_{16} = G_{61} = 0, \quad G_{17} = G_{71} = 0, \\
G_{22} &= G_{\Phi} + G_{D} + G_{B} + G_{Ш} + g_{BC} + g_{BA} + 1/\alpha r_{Л}, \\
G_{23} = G_{32} &= -g_{BA}, \quad G_{24} = G_{42} = 0, \quad G_{25} = G_{52} = -1/\alpha r_{Л}, \quad G_{26} = G_{62} = 0, \quad G_{27} = G_{72} = 0, \\
G_{33} &= (G_{D} + G_{B}) + 1/\alpha r_{Л} + g_{BA}, \\
G_{34} = G_{43} &= -1/\alpha r_{Л}, \quad G_{35} = G_{53} = 0, \quad G_{36} = G_{63} = 0, \quad G_{37} = G_{73} = 0, \\
G_{44} &= 1/\alpha r_{Л} + 1/(1-\alpha)r_{Л} + G_{из-}, \\
G_{45} = G_{54} &= 0, \quad G_{46} = G_{64} = -1/(1-\alpha)r_{Л}, \quad G_{47} = G_{74} = 0, \\
G_{55} &= 1/\alpha r_{Л} + 1/(1-\alpha)r_{Л} + G_{из+}, \quad G_{56} = G_{65} = 0, \quad G_{57} = G_{75} = 0, \\
G_{66} &= 1/(1-\alpha)r_{Л} + G_{Вкз} + G_{Н}, \quad G_{67} = G_{76} = -G_{Н}, \\
G_{77} &= 1/(1-\alpha)r_{Л} + G_{Вкз} + G_{Н}.
\end{aligned}$$

Аналогичные соотношения можно получить и для случая  $S_+ = 0, S_- = 1$ .

На частных примерах вариации значений параметров схемы проведены оценки погрешностей при вычислении значений сопротивлений изоляции. В табл. 3.4 приведены результаты вычислений в табличном процессоре при различных значениях параметров. Естественно, что одни только эти данные не обеспечивают полноты оценки предлагаемого подхода и расчетных формул. Они

демонстрируют эффективность предлагаемого метода выбора и проверки расчетных соотношений для определения сопротивления изоляции. На модели, системы мониторинга работоспособности ЭКЭП АТО при питании только от АКБ, подтверждена эффективность использования и дана исчерпывающая оценка работоспособности метода с коммутируемым эталонным делителем для оценки значений сопротивлений изоляции линии под напряжением при минимальном влиянии на режим электропитания.

Анализ данных, приведенных в табл. 3.4, дает результаты, аналогичные результатам и рекомендациям предыдущего подраздела. Основным источником погрешностей вычислений – сопротивление линии, в частности неконтролируемое значение параметра  $\alpha$ , характеризующего удаление точки утечки (замыкания) от точки подключения элементов в системе контроля сопротивления изоляции.

Узловые проводимости выражены через параметры схемы замещения и имеют следующие значения для случая  $S_+ = 1, S_- = 0$ :

$$G_{11}=(G_{\Phi}+G_{В\Phi})+g_{BC},$$

$$G_{12}=G_{21}=-g_{BC}, G_{13}=G_{31}=0, G_{14}=G_{41}=0, G_{15}=G_{51}=0, G_{16}=G_{61}=0, G_{17}=G_{71}=0,$$

$$G_{22}=G_{\Phi}+G_{Д}+G_{В}+G_{Ш}+g_{BC}+g_{BA}+1/\alpha r_{Л},$$

$$G_{23}=G_{32}=-g_{BA}, G_{24}=G_{42}=0, G_{25}=G_{52}=-1/\alpha r_{Л}, G_{26}=G_{62}=0, G_{27}=G_{72}=0,$$

$$G_{33}=(G_{Д}+G_{В})+1/\alpha r_{Л}+g_{BA},$$

$$G_{34}=G_{43}=-1/\alpha r_{Л}, G_{35}=G_{53}=0, G_{36}=G_{63}=0, G_{37}=G_{73}=0,$$

$$G_{44}=1/\alpha r_{Л}+1/(1-\alpha)r_{Л}+G_{из-},$$

$$G_{45}=G_{54}=0, G_{46}=G_{64}=-1/(1-\alpha)r_{Л}, G_{47}=G_{74}=0,$$

$$G_{55}=1/\alpha r_{Л}+1/(1-\alpha)r_{Л}+G_{из+}, G_{56}=G_{65}=0, G_{57}=G_{75}=0,$$

$$G_{66}=1/(1-\alpha)r_{Л}+G_{Вкз}+G_{Н}, G_{67}=G_{76}=-G_{Н},$$

$$G_{77}=1/(1-\alpha)r_{Л}+G_{Вкз}+G_{Н}.$$

Аналогичные соотношения можно получить и для случая  $S_+ = 0, S_- = 1$ .

На частных примерах вариации значений параметров схемы проведены оценки погрешностей при вычислении значений сопротивлений изоляции. В табл.

3.4 приведены результаты вычислений в табличном процессоре при различных значениях параметров. Естественно, что одни только эти данные не обеспечивают полноты оценки предлагаемого подхода и расчетных формул [70]. Они демонстрируют эффективность предлагаемого метода выбора и проверки расчетных соотношений для определения сопротивления изоляции.

Анализ данных, приведенных в табл. 3.4, дает результаты, аналогичные результатам и рекомендациям предыдущего подраздела. Основным источником погрешностей вычислений – сопротивление линии, в частности неконтролируемое значение параметра  $\alpha$ , характеризующего удаление точки утечки (замыкания) от точки подключения элементов в системе контроля сопротивления изоляции.

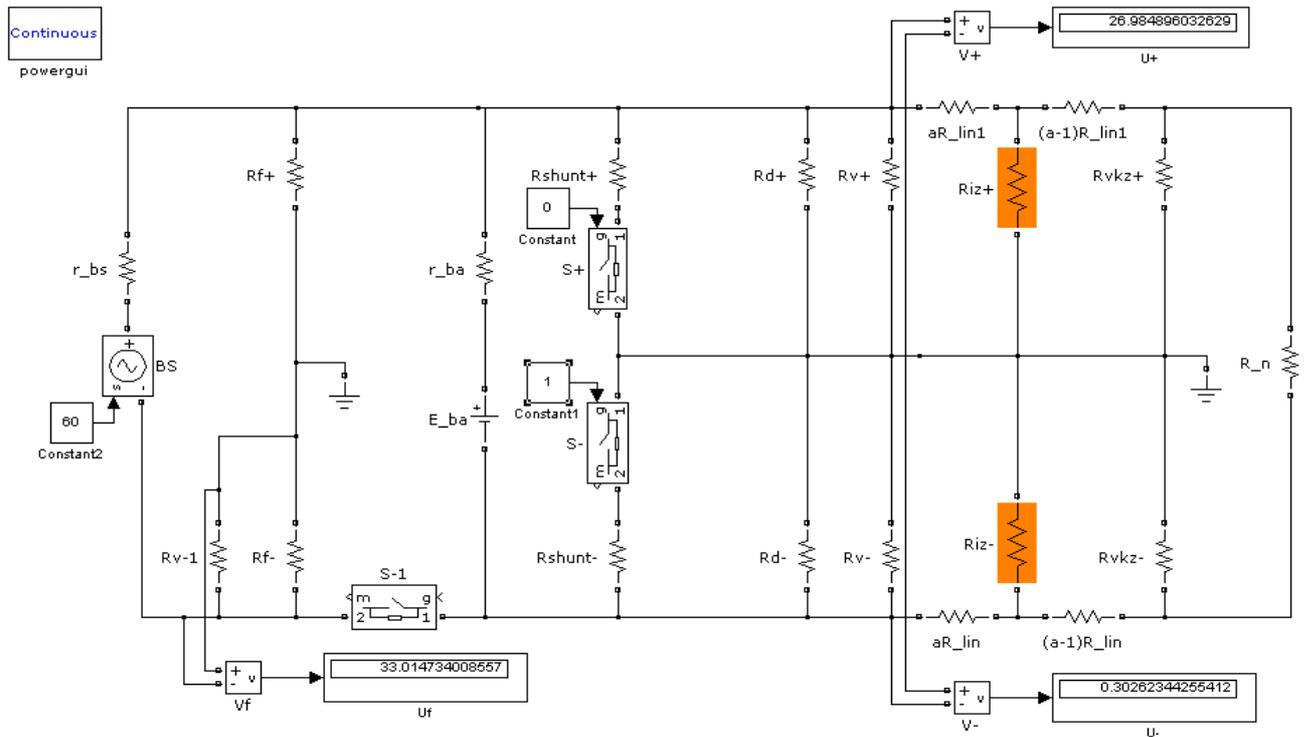


Рисунок 3.11 -Имитационная модель схемы замещения ЭКЭП АТО при питании от АКБ и отключенной СБ линии в среде *Matlab/ Simulink*,

На рисунке 3.11 показано BS- солнечная батарея,  $S_+$ ,  $S_-$  ключи коммутации,  $E_{БА}$ - аккумуляторная батарея,  $r_{ба}$  -внутреннее сопротивление аккумуляторной батареи, BS-солнечная батарея,  $s_1$ - ключ,  $R_+$ ,  $R_-$  сопротивление коммутируемого эталонного шунта,  $R_{d+}$ ,  $R_{d-}$  сопротивление делителя,  $R_{f+}$ ,  $R_{f-}$  сопротивление

фильтра,  $R_{v+}$ ,  $R_{v-}$  - сопротивление измерительного вольтметра,  $R_{iz+}$ ,  $R_{iz-}$  - сопротивление изоляции,  $R_{vkz+}$ ,  $R_{vkz-}$  - сопротивление сигнализируемого вольтметра,  $R_n$ , сопротивление нагрузки,  $aR_{lin1}$ ,  $(a-1)R_{lin1}$  - учет сопротивления линии.

Таблица 3.4 - Начальные параметры системы электропитания АТО

Параметры	$R_{\phi}$	$R_d$	$R_v$	$R_{ш}$	$R_{вкз}$	$R_n$	$E$	$rE$
кОм	100	640	830	10	830	0,001	30	0,0001

Таблица 3.5- Результаты моделирования имитационная модель схемы замещения ЭКЭП АТО при питании от АКБ и отключенной СБ линии в среде *Matlab/Simulink*.

Заданные значения, кОм		Данные эксперимента, В						Полученные значения, кОм		Отн. погрешность	
$R_{iz+}$	$R_{iz-}$	$U_{11}$	$U_{21}$	$U_{f1}$	$U_{12}$	$U_{22}$	$U_{f2}$	$R_{iz+}$	$R_{iz-}$	д+,%	д-,%
10000,0	10000,0	6,056683	21,23095	53,942896	27,15232	0,135127	32,847308	9926,773	9872,187	0,73	1,28
1000,0	1000,0	6,160681	21,12677	53,838565	26,96692	0,320598	33,032708	998,994	999,231	0,10	0,08
100,0	100,0	7,063917	20,22361	52,935493	25,35902	1,928485	34,640594	99,989	99,982	0,01	0,02
10,0	10,0	10,66213	16,62523	49,337329	18,95229	8,335081	41,047253	10,000	10,000	0,00	0,00
1,0	1,0	13,18223	14,10402	46,81725	14,46377	12,82247	45,535719	1,000	1,000	0,00	0,01
0,1	0,1	13,58885	13,68629	46,410626	13,72435	13,55079	46,275126	0,100	0,100	0,00	0,01
0,010	0,010	13,57748	13,58721	46,422005	13,59105	13,57363	46,408429	0,010	0,010	0,01	0,01
1000,0	100,0	7,514788	19,77268	52,484638	26,9849	0,302623	33,014734	985,778	100,125	1,42	0,13
1000,000	10,000	15,23099	12,05643	44,768504	27,08733	0,200193	32,912305	870,604	10,015	14,86	0,15
1000,000	1,000	24,79967	2,487628	35,199934	27,21435	0,073169	32,785283	721,517	1,001	38,59	0,15
1000,000	0,100	26,97360	0,313678	33,026033	27,24321	0,044311	32,756425	532,854	0,100	87,67	0,15
1000,000	0,010	27,21896	0,068309	32,780669	27,24647	0,041053	32,753167	686,663	0,010	57,07	0,17

На рис. 3.13 представлена модель, имитирующая схему замещения параллельной ЭКЭП АТО без учёта ФА. Моделирование АБ в упрощенном случае осуществляется с помощью блока *DC voltage source*. А в усложненном варианте блоком *battery* [52](рис. 3.15) позволяющем выбрать тип АБ задать его характеристики и отслеживать параметры в процессе моделирования.

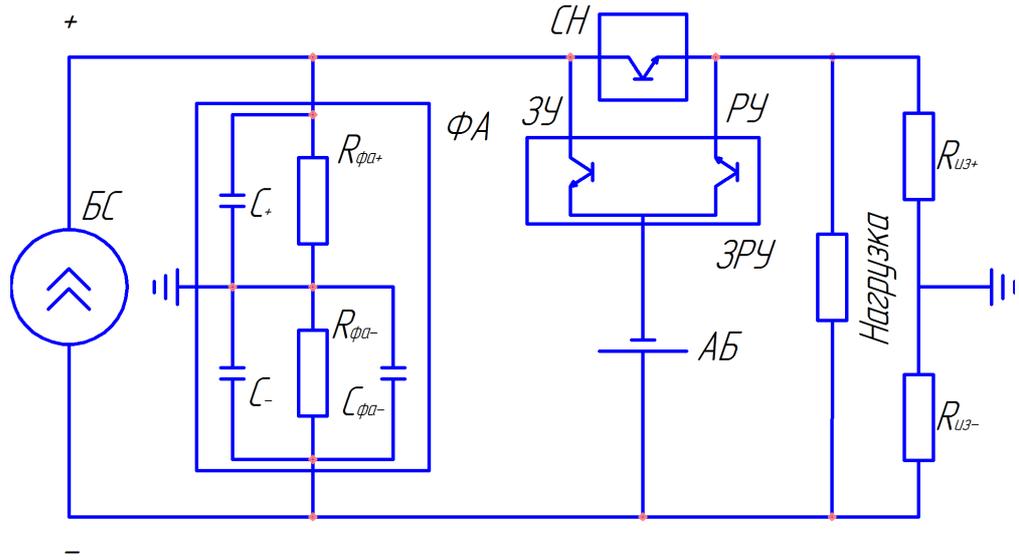


Рисунок 3.12- Последовательно-параллельная схема ЭКЭП АТО

Те же принципы реализованы и для моделирования расчетной схемы для параллельной схемы ЭКЭП с шунтовым регулятором БС (рис. 3.12).

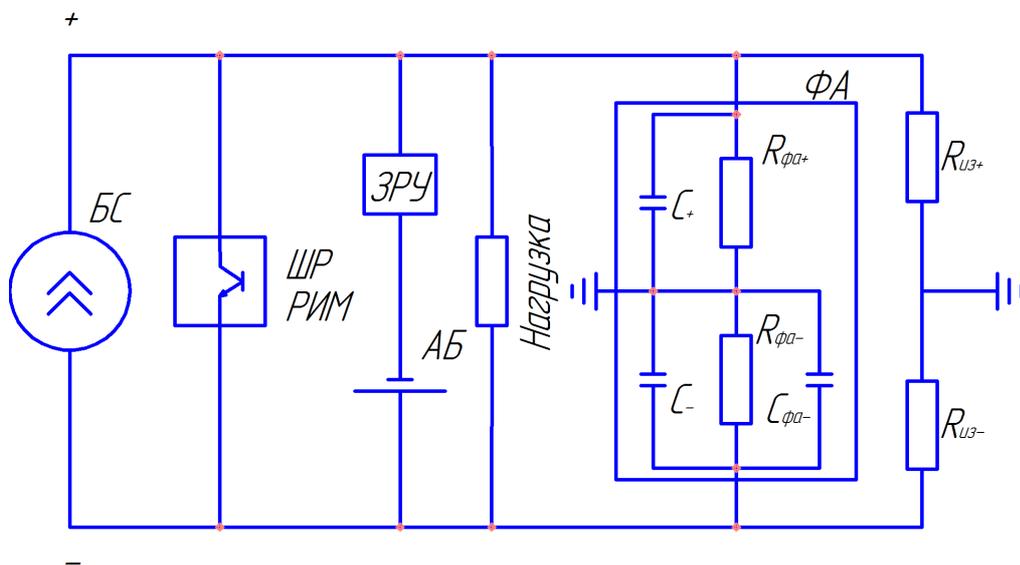


Рисунок 3.13 -Параллельная схема ЭКЭП АТО с шунтовым регулятором ШР солнечной батареи СБ.

Техническая реализация системы мониторинга работоспособности ЭКЭП АТО при питании от АКБ и отключенной СБ представлена на рис. 3.14, имитирована в среде Electronics Workbench.



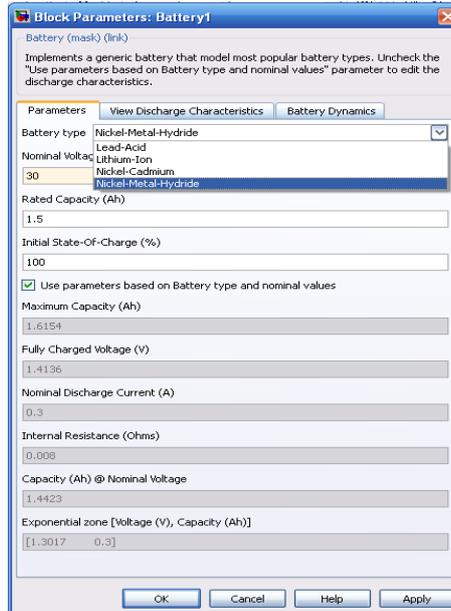


Рисунок 3.15- Окно настройки свойств и параметров блока battery

При расчете и анализе электрического состояния нагрузки ЭКЭП АТО наибольший интерес представляют исследования переменной составляющей тока или напряжения (рис. 3.15) на шинах питания нагрузки, т.к. они имеют непосредственное влияние на точность определения сопротивления изоляции.

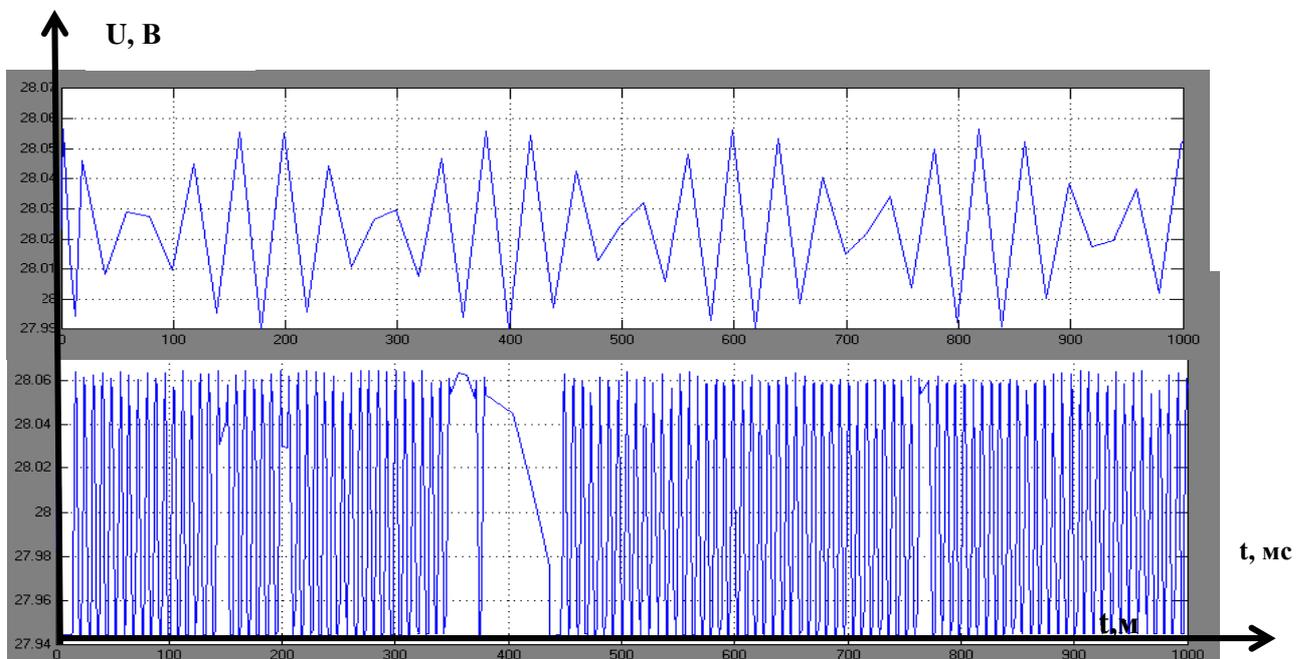


Рисунок 3.16 -Временная диаграмма напряжения на шинах питания нагрузки при различных значениях коэффициентов ПИД регулятора СН.

### 3.4 Математическое моделирование электротехнической системы ЭКЭП с питанием от АКБ и СБ

Рассматривается вариант, соответствующий соотношению  $U_{БС} > U_{БА}$ . В этом случае возможен заряд БА от БС, за счет обратных связей в СЭП реализуется поддержание расчетных значений переменных – тока заряда БА и напряжения нагрузки. Схема замещения приведена на рис. 3.17. Для вывода расчетных соотношений вычисления сопротивлений изоляции применен подход, аналогичный тому, что был использован при анализе моделей 1,2.

**Расчетные соотношения для вычисления сопротивлений изоляции.** Первым этапом является построение упрощенной схемы замещения, а также ее анализ. Схема замещения для получения расчетных формул  $R_{ИЗ+}$  и  $R_{ИЗ-}$  и последующего использования для моделирования с использованием метода контурных токов показана на рис. 3.17.

Уравнения по первому закону Кирхгофа для узла 0 с учетом пренебрежения потерями в линии ( $r_{Л}=0$ ) имеют следующий вид (рис. 11.9):

$$\begin{aligned} G_{\Phi}(U_{11} + U_{СТ}) + (G_{Ш} + G_0 + G_{ИЗ+})U_{11} &= (G_{\Phi} + G_0 + G_{ИЗ-})U_{21}, \\ G_{\Phi}(U_{12} + U_{СТ}) + (G_0 + G_{ИЗ+})U_{12} &= (G_{Ш} + G_{\Phi} + G_0 + G_{ИЗ-})U_{22}, \\ G_0 &= G_{Д} + G_{В} + G_{Вкз}. \end{aligned} \quad (3.6)$$

После элементарных преобразований получается система линейных алгебраических уравнений с постоянными коэффициентами относительно  $G_{ИЗ+}$ ,  $G_{ИЗ-}$ :

$$\begin{aligned} G_{ИЗ+} - G_{ИЗ-} \frac{U_{21}}{U_{11}} &= (G_{\Phi} + G_0) \frac{U_{21}}{U_{11}} - G_{\Phi} \frac{U_{11} + U_{СТ}}{U_{11}} - (G_{Ш} + G_0), \\ G_{ИЗ+} - G_{ИЗ-} \frac{U_{22}}{U_{12}} &= (G_{Ш} + G_{\Phi} + G_0) \frac{U_{22}}{U_{12}} - G_{\Phi} \frac{U_{12} + U_{СТ}}{U_{12}} - G_0. \end{aligned} \quad (3.7)$$

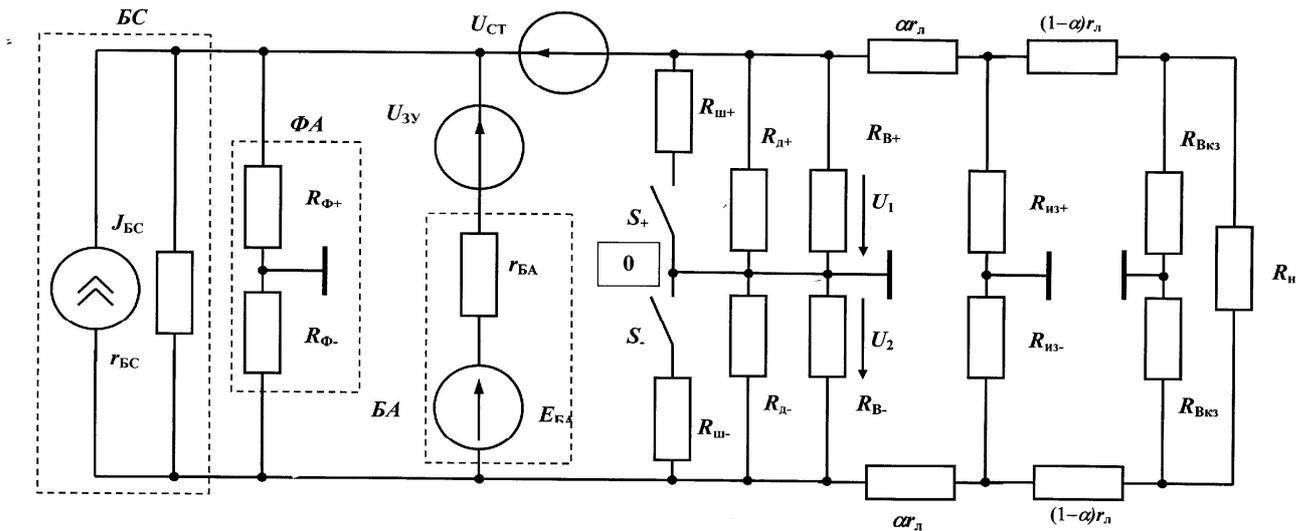


Рисунок 3.17- Схема замещения ЭКЭП с элементами системы измерения сопротивления изоляции; два источника энергии (BC и BA)

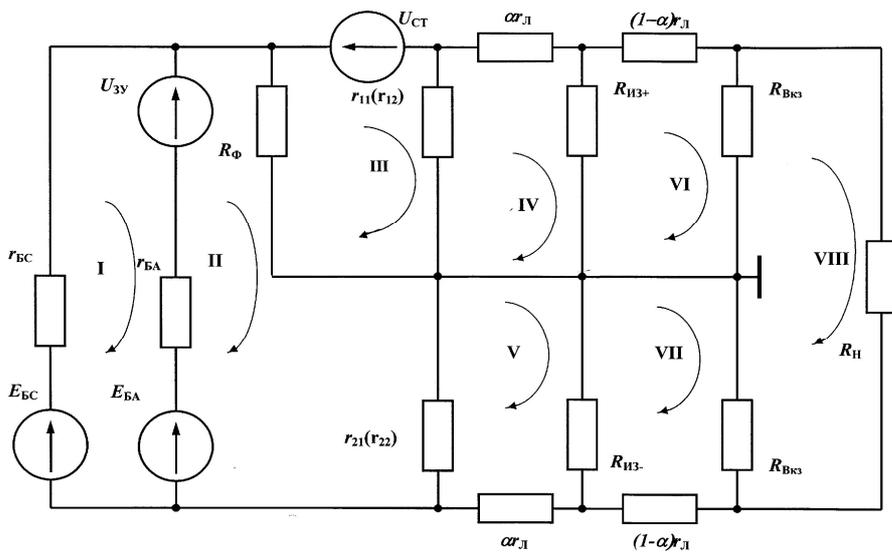


Рисунок 3.18- Схема замещения к расчету методом контурных токов

Обозначения:  $r_{11} = R_{ш} // R_{д} // R_{в} // R_{БКЗ} // R_{из+}$ ;  $r_{21} = R_{д} // R_{в} // R_{БКЗ} // R_{из+}$ ;  $r_{12} = R_{д} // R_{в} // R_{БКЗ} // R_{из+}$ ;  $r_{22} = R_{ш} // R_{д} // R_{в} // R_{БКЗ} // R_{из+}$

Индексы (11), (21) в обозначениях сопротивлений соответствует случаю  $S_+ = 1, S_- = 0$ , индексы (12) (22) - случаю  $S_+ = 0, S_- = 1$

**Моделирование цепи методом контурных токов с учетом сопротивлений линии.** Схема замещения для рассматриваемого случая

приведена на рис. 3.18 (модель 3.1). Системы уравнений к расчету методом контурных токов имеют следующий вид:

$$\begin{aligned}
 R_{11}I_{11} + R_{12}I_{22} + R_{13}I_{33} + R_{14}I_{44} + R_{15}I_{55} + R_{16}I_{66} + R_{17}I_{77} + R_{18}I_{88} &= E_{11}, \\
 R_{21}I_{11} + R_{22}I_{22} + R_{23}I_{33} + R_{24}I_{44} + R_{25}I_{55} + R_{26}I_{66} + R_{27}I_{77} + R_{28}I_{88} &= E_{22}, \\
 R_{31}I_{11} + R_{32}I_{22} + R_{33}I_{33} + R_{34}I_{44} + R_{35}I_{55} + R_{36}I_{66} + R_{37}I_{77} + R_{38}I_{88} &= E_{33}, \\
 R_{41}I_{11} + R_{42}I_{22} + R_{43}I_{33} + R_{44}I_{44} + R_{45}I_{55} + R_{46}I_{66} + R_{47}I_{77} + R_{48}I_{88} &= 0, \\
 R_{51}I_{11} + R_{52}I_{22} + R_{53}I_{33} + R_{54}I_{44} + R_{55}I_{55} + R_{56}I_{66} + R_{57}I_{77} + R_{58}I_{88} &= 0, \\
 R_{61}I_{11} + R_{62}I_{22} + R_{63}I_{33} + R_{64}I_{44} + R_{65}I_{55} + R_{66}I_{66} + R_{67}I_{77} + R_{68}I_{88} &= 0, \\
 R_{71}I_{11} + R_{72}I_{22} + R_{73}I_{33} + R_{74}I_{44} + R_{75}I_{55} + R_{76}I_{66} + R_{77}I_{77} + R_{78}I_{88} &= 0, \\
 R_{81}I_{11} + R_{82}I_{22} + R_{83}I_{33} + R_{84}I_{44} + R_{85}I_{55} + R_{86}I_{66} + R_{87}I_{77} + R_{88}I_{88} &= 0.
 \end{aligned} \tag{3.8}$$

В системе (3.8) приняты следующие обозначения:

$$\begin{aligned}
 R_{11}=r_{\text{BC}}+r_{\text{BA}}, R_{12}=R_{21}=-r_{\text{BA}}, R_{13}=R_{31}=0, R_{14}=R_{41}=0, R_{15}=R_{51}=0, R_{16}=R_{61}=0, \\
 R_{17}=R_{71}=0, R_{18}=R_{81}=0; R_{22}=R_{\Phi}+r_{\text{BA}}+r_{21(22)}, R_{23}=R_{32}=-R_{\Phi}, R_{24}=R_{42}=0, R_{25}=R_{52}=- \\
 r_{21(22)}, R_{26}=R_{62}=0, R_{27}=R_{72}=0, R_{18}=R_{81}=0; R_{33}=R_{\Phi}+r_{11(12)}, R_{34}=R_{43}=-r_{11(12)}, R_{35}= \\
 R_{53}=0, R_{36}=R_{63}=0, R_{37}=R_{73}=0, R_{38}=R_{83}=0; R_{44}=r_{11(12)}+\alpha r_{\text{Л}}+R_{\text{ИЗ}+}, R_{45}=R_{54}=0, R_{46}=R_{64}=- \\
 R_{\text{ИЗ}+}, R_{47}=R_{74}=0, R_{48}=R_{84}=0; R_{55}=r_{21(22)}+\alpha r_{\text{Л}}+R_{\text{ИЗ}-}, R_{56}=R_{65}=0; R_{57}=R_{75}=R_{\text{ИЗ}-}; R_{58}= \\
 R_{85}=0; R_{66}=(1-\alpha)r_{\text{Л}}+R_{\text{ИЗ}+}+R_{\text{ВКЗ}}, R_{67}=R_{76}=0, R_{68}=R_{86}=-R_{\text{ВКЗ}}; R_{77}=(1-\alpha)r_{\text{Л}}+R_{\text{ИЗ}-}+R_{\text{ВКЗ}}, \\
 R_{78}=R_{87}=-R_{\text{ВКЗ}}; R_{88}=R_{\text{ВКЗ}}+R_{\text{Н}}+R_{\text{ВКЗ}}. E_{11}=E_{\text{BC}}-U_{3\text{У}}-E_{\text{BA}}, E_{22}=E_{\text{BA}}+U_{3\text{У}}, E_{33}=-U_{\text{СТ}}.
 \end{aligned}$$

Использованы обозначения  $r_{11}=R_{\text{Ш}}\parallel R_{\text{Д}}\parallel R_{\text{В}}$ ;  $r_{21}=R_{\Phi}\parallel R_{\text{Д}}\parallel R_{\text{В}}$ ;  $r_{12}=R_{\text{Д}}\parallel R_{\text{В}}$ ;  $r_{22}=R_{\Phi}\parallel R_{\text{Ш}}\parallel R_{\text{Д}}\parallel R_{\text{В}}$ ; индексы «11», «21» соответствуют состоянию  $S_{+}=1$ ,  $S_{-}=0$ , индексы «12», «22» - состоянию  $S_{+}=0$ ,  $S_{-}=1$ . Настройка модели при заданных значениях  $E_{\text{BC}}$ ,  $E_{\text{BA}}$ ,  $U_{\text{Н}}$ , режиме заряда  $BA$  обеспечивается подбором значений  $U_{3\text{У}}$ ,  $U_{\text{СТ}}$ . В табл.3.2 и 3.3 приведены результаты расчетов по формулам (3.8) при различных сочетаниях параметров модели, в которой учтены сопротивления линии.

Из приведенных примеров видно, что погрешность вычисления значений сопротивления изоляции приемлема для практического использования; как и в

предыдущих случаях имеет место занижение большего значения при существенном различии значений  $R_{из+}$  и  $R_{из-}$ .

Таблица 3.6- Начальные параметры системы электропитания АТО

Параметры	$R_{\phi}$	$R_{д}$	$R_{в}$	$R_{ш}$	$R_{вкз}$	$R_{н}$	$E$	$rE$
кОм	100	640	830	10	830	0,001	30	0,0001

Таблица 3.7 - Результаты моделирования имитационная модель схемы замещения ЭКЭП АТО при питании от АКБ и отключенной СБ линии в среде *Matlab/Simulink*.

Заданные значения, кОм		Данные эксперимента, В						Полученные значения, кОм		Отн. погрешность	
$R_{из+}$	$R_{из-}$	$U_{11}$	$U_{21}$	$U_{f1}$	$U_{12}$	$U_{22}$	$U_{f2}$	$R_{из+}$	$R_{из-}$	д+,%	д-,%
10000,0	10000,0	6,056683	21,23095	53,942896	27,15232	0,135127	32,847308	9926,773	9872,187	0,73	1,28
1000,0	1000,0	6,160681	21,12677	53,838565	26,96692	0,320598	33,032708	998,994	999,231	0,10	0,08
100,0	100,0	7,063917	20,22361	52,935493	25,35902	1,928485	34,640594	99,989	99,982	0,01	0,02
10,0	10,0	10,66213	16,62523	49,337329	18,95229	8,335081	41,047253	10,000	10,000	0,00	0,00
1,0	1,0	13,18223	14,10402	46,81725	14,46377	12,82247	45,535719	1,000	1,000	0,00	0,01
0,1	0,1	13,58885	13,68629	46,410626	13,72435	13,55079	46,275126	0,100	0,100	0,00	0,01
0,010	0,010	13,57748	13,58721	46,422005	13,59105	13,57363	46,408429	0,010	0,010	0,01	0,01
1000,0	100,0	7,514788	19,77268	52,484638	26,9849	0,302623	33,014734	985,778	100,125	1,42	0,13
1000,000	10,000	15,23099	12,05643	44,768504	27,08733	0,200193	32,912305	870,604	10,015	14,94	0,15
1000,000	1,000	24,79967	2,487628	35,199934	27,21435	0,073169	32,785283	796,517	1,001	25,85	0,15
1000,000	0,100	26,97360	0,313678	33,026033	27,24321	0,044311	32,756425	523,854	0,100	90,71	0,15
1000,000	0,010	27,21896	0,068309	32,780669	27,24647	0,041053	32,753167	596,663	0,010	67,33	0,17

Имитационная модель схемы замещения ЭКЭП АТО при питании от аккумуляторной батареи и от солнечной батареи представлена на рисунке 3.17.

На рисунке 3.19 представлена схема реализации системы ЭКЭП АТО при питании от двух источников – аккумуляторной и солнечной батарей, имитированной в среде *Electronics Workbench*.

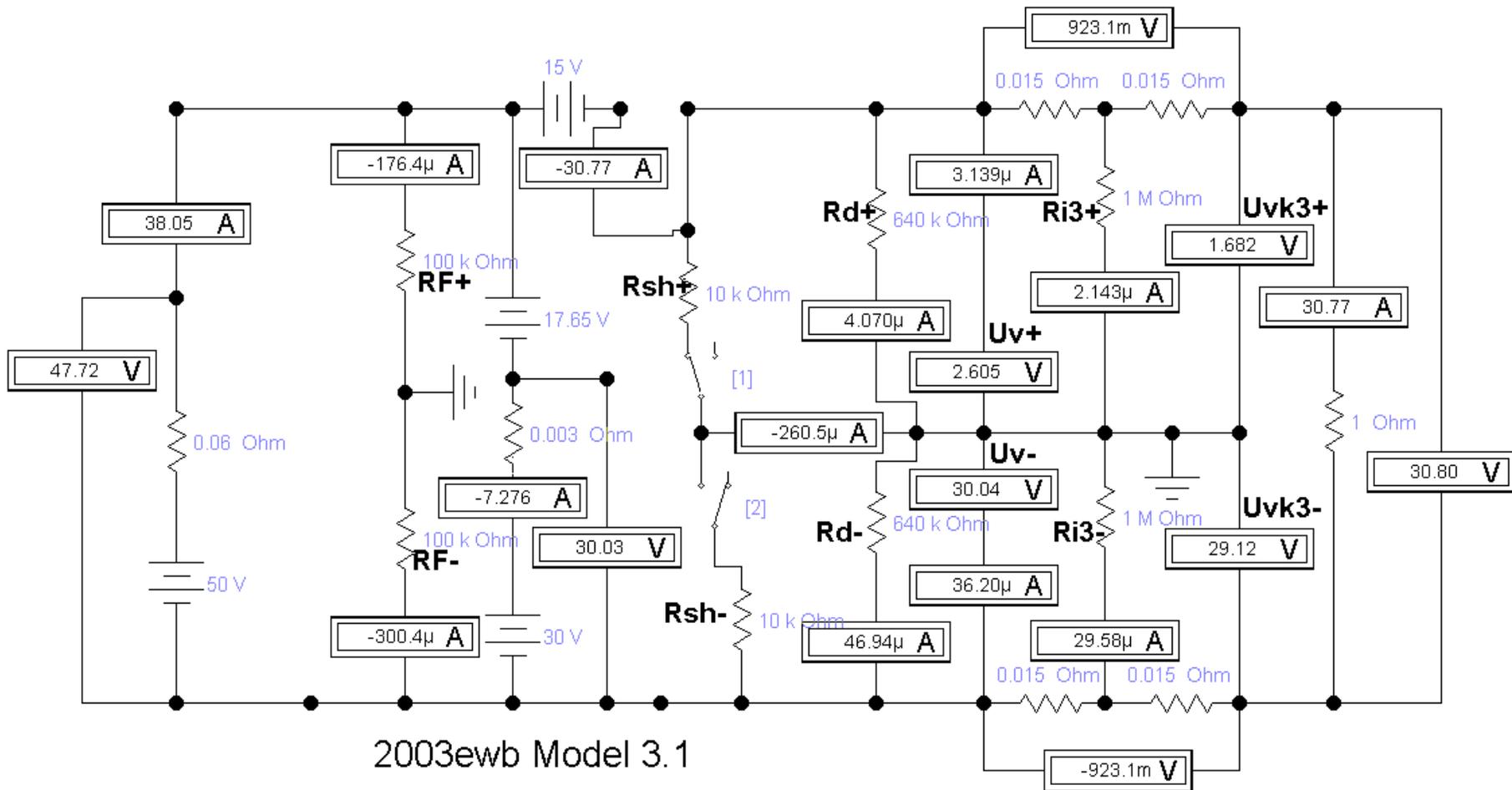


Рисунок 3.19 - Схема реализации системы мониторинга работоспособности ЭКЭП АТО при питании от АКБ и СБ в среде Electronics Workbench.

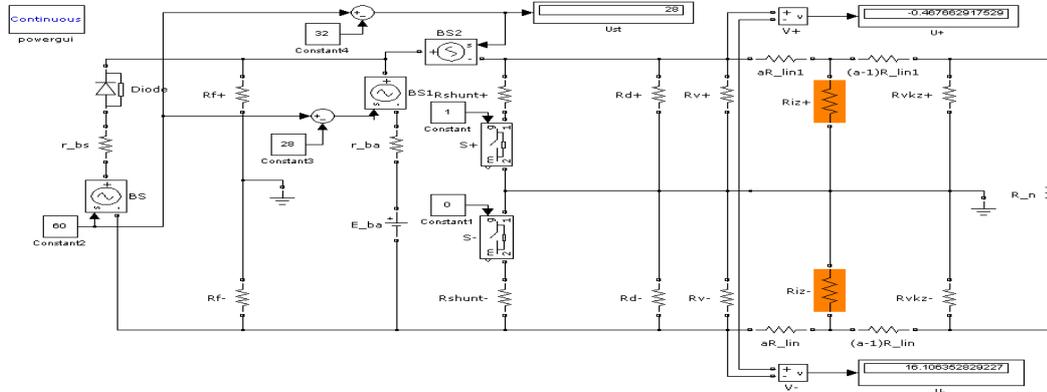


Рисунок 3.20 -Имитационная модель схемы замещения ЭКЭП АТО при питании от двух источников АКБ и СБ в среде *Matlab/ Simulink*.

На рисунке 3.20 BS- солнечная батарея,  $S_+$ ,  $S_-$  ключи коммутации,  $E_{BA}$ - аккумуляторная батарея,  $r_{ба}$  - внутреннее сопротивление аккумуляторной батареи,  $R_+$ ,  $R_-$  - сопротивление коммутируемого эталонного шунта,  $R_{d+}$ ,  $R_{d-}$  - сопротивление делителя,  $R_{f+}$ ,  $R_{f-}$  - сопротивление фильтра,  $R_{v+}$ ,  $R_{v-}$  - сопротивление измерительного вольтметра,  $R_{iz+}$ ,  $R_{iz-}$  - сопротивление изоляции,  $R_{vkz+}$ ,  $R_{vkz-}$  - сопротивление сигнализируемого вольтметра,  $R_n$ , сопротивление нагрузки,  $aR_{lin1}$ ,  $(a-1)R_{lin1}$ - учет сопротивления линии.

### 3.5 Расчетная схема при двух источниках энергии – АКБ и СБ ( $U_{BC} < U_{BA}$ )

Рассматривается вариант, соответствующий соотношению  $U_{BC} < U_{BA}$ . В этом случае ключ  $K_{CT}$  разомкнут, питание нагрузки осуществляется от БА.

Расчетная схема приведена на рис. 3.20. Для вывода расчетных соотношений вычисления сопротивлений изоляции применим подход, аналогичный тем, что были использованы при анализе других моделей.

Первым этапом является построение упрощенной расчетной схемы и ее анализ. Схема замещения для получения расчетных формул  $R_{\text{ИЗ}+}$  и  $R_{\text{ИЗ}-}$  и последующего использования для моделирования с использованием метода узловых напряжений показана на рис. Измерение напряжения  $U_{\text{СТ}}$  с помощью вольтметра не вносит дополнительных элементов, выходное сопротивление участка цепи  $CH$  мало.

Уравнения по первому закону Кирхгофа для узла 0 с учетом обозначений рис. 3.21 имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} G_{\Phi}(U_{11} + U_{\text{СТ}}) + (G_{\text{Ш}} + G_0 + G_{\text{ИЗ}+})U_{11} &= (G_{\Phi} + G_0 + G_{\text{ИЗ}-})U_{21}, \\ G_{\Phi}(U_{12} + U_{\text{СТ}}) + (G_0 + G_{\text{ИЗ}+})U_{12} &= (G_{\text{Ш}} + G_{\Phi} + G_0 + G_{\text{ИЗ}-})U_{22}, \\ G_0 &= G_{\text{Д}} + G_{\text{В}} + G_{\text{Вкз}}, U_{\text{СТ}} = \varphi_1 - \varphi_2. \end{aligned} \quad (3.9)$$

После элементарных преобразований получается система линейных алгебраических уравнений с постоянными коэффициентами относительно  $G_{\text{ИЗ}+}$ ,  $G_{\text{ИЗ}-}$ :

$$\begin{aligned} G_{\text{ИЗ}+} - G_{\text{ИЗ}-} \frac{U_{21}}{U_{11}} &= (G_{\Phi} + G_0) \frac{U_{21}}{U_{11}} - G_{\Phi} \frac{U_{11} + U_{\text{СТ}}}{U_{11}} - (G_{\text{Ш}} + G_0), \\ G_{\text{ИЗ}+} - G_{\text{ИЗ}-} \frac{U_{22}}{U_{12}} &= (G_{\text{Ш}} + G_{\Phi} + G_0) \frac{U_{22}}{U_{12}} - G_{\Phi} \frac{U_{12} + U_{\text{СТ}}}{U_{12}} - G_0. \end{aligned} \quad (3.10)$$

Решение этой системы целесообразно получать в табличном процессоре с использованием результатов расчета модели по методу узловых напряжений (система уравнений 3.10).

На рисунке 3.21 ключи:  $K_3$ ,  $K_{\text{СН}}$  – разомкнуты,  $K_{\text{Р}}$  – замкнут,  $U_{\text{СТ}} = \varphi_1 - \varphi_2$ ; для варианта линии без потерь  $R_0 = R_{\text{Д}} \parallel R_{\text{В}} \parallel R_{\text{Вкз}}$

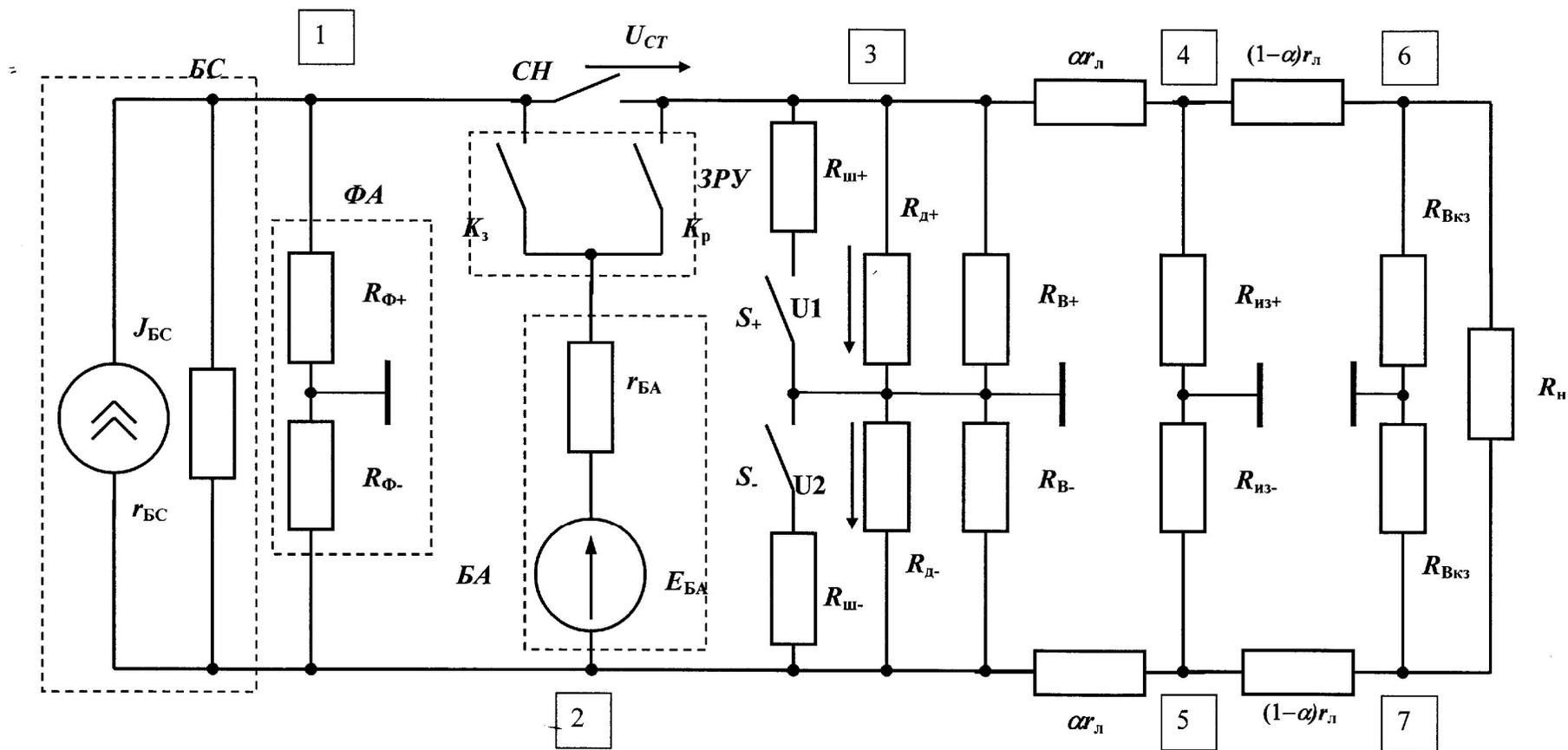


Рисунок 3.21 -Расчетная схема для модели, соответствующей соотношению  $U_{BC} < U_{BA}$

**Моделирование цепи методом узловых напряжений с учетом сопротивлений линии.** Система уравнений для схемы рис.3.21, составленная с использованием метода узловых напряжений имеет следующий вид (3.11):

$$\begin{aligned}
 G_{11}\varphi_{11} + G_{12}\varphi_{22} + G_{13}\varphi_{33} + G_{14}\varphi_{44} + G_{15}\varphi_{55} + G_{16}\varphi_{66} + G_{17}\varphi_{77} &= -G \\
 G_{21}\varphi_{11} + G_{22}\varphi_{22} + G_{23}\varphi_{33} + G_{24}\varphi_{44} + G_{25}\varphi_{55} + G_{26}\varphi_{66} + G_{27}\varphi_{77} &= G_{BC}E_{BC} + G_{BA}E_{B} \\
 G_{31}\varphi_{11} + G_{32}\varphi_{22} + G_{33}\varphi_{33} + G_{34}\varphi_{44} + G_{35}\varphi_{55} + G_{36}\varphi_{66} + G_{37}\varphi_{77} &= -G_{BA}E_{BA}, \quad (3.11) \\
 G_{41}\varphi_{11} + G_{42}\varphi_{22} + G_{43}\varphi_{33} + G_{44}\varphi_{44} + G_{45}\varphi_{55} + G_{46}\varphi_{66} + G_{47}\varphi_{77} &= 0, \\
 G_{51}\varphi_{11} + G_{52}\varphi_{22} + G_{53}\varphi_{33} + G_{54}\varphi_{44} + G_{55}\varphi_{55} + G_{56}\varphi_{66} + G_{57}\varphi_{77} &= 0, \\
 G_{61}\varphi_{11} + G_{62}\varphi_{22} + G_{63}\varphi_{33} + G_{64}\varphi_{44} + G_{65}\varphi_{55} + G_{66}\varphi_{66} + G_{67}\varphi_{77} &= 0, \\
 G_{71}\varphi_{11} + G_{72}\varphi_{22} + G_{73}\varphi_{33} + G_{74}\varphi_{44} + G_{75}\varphi_{55} + G_{76}\varphi_{66} + G_{77}\varphi_{77} &= 0.
 \end{aligned}$$

Узловые проводимости выражены через параметры схемы замещения и имеют следующие значения для случая  $S_+ = 1, S_- = 0$ :

$$\begin{aligned}
 G_{11} &= G_{\Phi} + g_{BC}, G_{12} = G_{21} = -g_{BC}, G_{13} = G_{31} = 0, G_{14} = G_{41} = 0, G_{15} = G_{51} = 0, G_{16} = G_{61} = 0, G_{17} = \\
 G_{71} &= 0, G_{22} = G_{\Phi} + g_{BC} + g_{BA} + G_0 + 1/\alpha r_{Л}, G_{23} = G_{32} = -g_{BA}, G_{24} = G_{42} = 0, G_{25} = G_{52} = -1/\alpha r_{Л}, \\
 G_{26} &= G_{62} = 0, G_{27} = G_{72} = 0, G_{33} = G_{Д} + 1/\alpha r_{Л} + G_0 + G_{Ш}, G_{34} = G_{43} = -1/\alpha r_{Л}, G_{35} = G_{53} = 0, G_{36} = \\
 G_{63} &= 0, G_{37} = G_{73} = 0, G_{44} = 1/\alpha r_{Л} + 1/(1-\alpha)r_{Л} + G_{из+}, G_{45} = G_{54} = 0, G_{46} = G_{64} = -1/(1-\alpha)r_{Л}, G_{47} = \\
 G_{74} &= 0, G_{55} = 1/\alpha r_{Л} + 1/(1-\alpha)r_{Л} + G_{из-}, G_{56} = G_{65} = 0, G_{57} = G_{75} = 0, G_{66} = 1/(1-\alpha)r_{Л} + G_{Вкз} + G_{Н}, \\
 G_{67} &= G_{76} = -G_{Н}, G_{77} = 1/(1-\alpha)r_{Л} + G_{Вкз} + G_{Н}.
 \end{aligned}$$

Аналогичные соотношения легко получить для случая  $S_+ = 0, S_- = 1$ .

$$\begin{aligned}
 G_{11} &= G_{\Phi} + g_{BC}, G_{12} = G_{21} = -g_{BC}, G_{13} = G_{31} = 0, G_{14} = G_{41} = 0, G_{15} = G_{51} = 0, G_{16} = G_{61} = 0, G_{17} = \\
 G_{71} &= 0, G_{22} = G_{\Phi} + g_{BC} + g_{BA} + G_0 + G_{Ш} + 1/\alpha r_{Л}, G_{23} = G_{32} = -g_{BA}, G_{24} = G_{42} = 0, G_{25} = G_{52} = - \\
 1/\alpha r_{Л}, G_{26} &= G_{62} = 0, G_{27} = G_{72} = 0, G_{33} = G_{Д} + 1/\alpha r_{Л} + G_0, G_{34} = G_{43} = -1/\alpha r_{Л}, G_{35} = G_{53} = 0, G_{36} = \\
 G_{63} &= 0, G_{37} = G_{73} = 0, G_{44} = 1/\alpha r_{Л} + 1/(1-\alpha)r_{Л} + G_{из+}, G_{45} = G_{54} = 0, G_{46} = G_{64} = -1/(1-\alpha)r_{Л}, G_{47} = \\
 G_{74} &= 0, G_{55} = 1/\alpha r_{Л} + 1/(1-\alpha)r_{Л} + G_{из-}, G_{56} = G_{65} = 0, G_{57} = G_{75} = 0, G_{66} = 1/(1-\alpha)r_{Л} + G_{Вкз} + G_{Н}, \\
 G_{67} &= G_{76} = -G_{Н}, G_{77} = 1/(1-\alpha)r_{Л} + G_{Вкз} + G_{Н}.
 \end{aligned}$$

В уравнениях метода узловых потенциалов принято обозначение  $G_0 = G_D + G_B$ .

В табл.3.6-3.8 приведены результаты моделирования в сопоставлении с вычислением сопротивлений изоляции по формулам (3.11). Полученные значения показывают, что предлагаемые соотношения обеспечивают приемлемую погрешность в рамках рассматриваемой модели.

Таблица 3.5- Начальные параметры системы электропитания АТО

Параметры	Rф	Rд	Rв	Rш	Rвкз	Rн	E	R <sub>E</sub>	Uст
кОм	100	640	830	10	830	0,001	30	0,0001	28

Таблица 3.6- Результаты математического моделирования имитационная модель схемы замещения ЭКЭП АТО при питании от двух источников АКБ и СБ в среде *Matlab/ Simulink*

Заданные значения, кОм		Данные эксперимента, В						Полученные значения, кОм		Отн Погр-сть	
Riz+	Riz-	U11	U21	k1	U12	U22	k2	Riz+	Riz-	д+,%	д-,%
10000,0	10000,0	-0,46766	16,106352	-0,02904	25,36479	5,583854	4,542523318	9898,959	9990,688	1,01	0,09
1000,0	1000,0	1,411165	29,534276	0,047781	25,22778	5,720856	4,409791647	998,578	998,128	0,14	0,19
100,0	100,0	3,122322	27,826276	0,112208	24,0411	6,907524	3,480422073	99,987	99,989	0,01	0,01
10,0	10,0	9,901922	21,046544	0,470477	19,33894	11,609547	1,665779035	10,000	10,000	0,00	0,00
1,0	1,0	14,61492	16,3324	0,894842	16,06924	14,878084	1,080060779	1,000	1,000	0,00	0,00
0,10	0,10	15,37713	15,558649	0,988333	15,53083	15,404953	1,008171008	0,100	0,100	0,00	0,00
0,010	0,010	15,40134	15,419545	0,99882	15,41675	15,404143	1,000818221	0,010	0,010	0,01	0,01
1000,0	100,0	3,321605	27,627108	0,12023	25,59535	5,353284	4,78124343	985,56	100,12	1,47	0,12
1000,0	10,0	14,16378	16,78476	0,843848	27,68163	3,26701	8,473076299	870,455	10,015	14,88	0,15
1000,0	1,0	27,50775	3,440653	7,994922	30,24931	0,699324	43,25506918	721,478	1,001	27,85	0,15
1000,0	0,10	30,52389	0,424493	71,90669	30,82968	0,118948	259,1862242	639,854	0,100	57,71	0,15
1000,0	0,010	30,86395	0,084424	365,5827	30,89512	0,053511	577,3601689	659,663	0,010	57,59	0,17

Таблица 3.7- Начальные параметры системы электропитания АТО схемы замещения ЭКЭП АТО при питании от двух источников АКБ и СБ ( $U_{бс} < U_{ба}$ ) в среде *Matlab/ Simulink*

Параметры	Rф	Rд	Rв	Rш	Rвкз	Rн	E	rE	Уст
кОм	100	640	830	10	830	0,001	30	0,0001	10

Таблица 3.8-Результаты математического моделирования имитационная модель схемы замещения ЭКЭП АТО при питании от двух источников АКБ и СБ ( $U_{бс} < U_{ба}$ ) в среде *Matlab/Simulink*

Заданные значения, кОм		Данные эксперимента, В						Полученные значения, кОм		Отн Погрешности	
Riz+	Riz-	U11	U21	k1	U12	U22	k2	Riz+	Riz-	д+,%	д-,%
10000,0	10000,0	4,179397	26,769239	0,156127	28,3302	2,618472	10,81936221	9881,931	9790,409	1,18	2,10
1000,0	1000,0	4,335492	26,612947	0,162909	28,15212	2,796551	10,06672719	998,957	999,527	0,10	0,05
100,0	100,0	5,690842	25,257764	0,225311	26,60964	4,339011	6,132650505	99,988	99,988	0,01	0,01
10,0	10,0	11,06066	19,887821	0,556152	20,49768	10,450624	1,961383741	10,000	10,000	0,00	0,00
1,0	1,0	14,7935	16,153831	0,915789	16,24782	14,699516	1,105330271	1,000	1,000	0,00	0,00
0,10	0,10	15,39602	15,539777	0,990749	15,54971	15,386081	1,010635132	0,100	0,100	0,00	0,00
0,010	0,01	15,40325	15,417654	0,999066	15,41865	15,402251	1,001064974	0,010	0,010	0,02	0,02
1000,0	100,0	6,056495	24,892215	0,243309	28,33027	2,618397	10,81969961	985,678	100,122	1,45	0,12
1000,0	10,0	15,82357	15,124981	1,046188	29,34144	1,607227	18,25593896	870,535	10,015	14,95	0,15
1000,0	1,0	27,84438	3,104058	8,970315	30,58594	0,362727	84,32219548	721,495	1,001	38,85	0,15
1000,0	0,10	30,56143	0,386976	78,97501	30,86723	0,081431	379,0599649	620,854	0,100	61,71	0,15
1000,0	0,010	30,86778	0,080628	382,8419	30,89895	0,049716	621,5091118	810,663	0,010	20,33	0,16

### 3.6 Выводы по главе 3

**Третья глава** посвящена решению задачи по разработке и реализации комплекса математических и имитационных моделей электротехнической системы мониторинга работоспособности ЭКЭП АТО по критерию сопротивления изоляции при различных вариациях системы питания.

В результате работы получен комплекс математических имитационных моделей системы мониторинга работоспособности ЭКЭП АТО с учетом возможных конфигураций источников питания, а также режимов эксплуатации.

Данные математического имитационного моделирования и результаты расчетов по различным классическим методам подтверждают правильность

разработанной и предложенной концепции и свидетельствует об адекватности математических моделей ЭКЭП при различных режимах питания АТО.

Обоснованность и достоверность моделей, представленных в 3 главе, подтверждены положительными результатами внедрения в виде рекомендаций при создании систем мониторинга работоспособности космических аппаратов в организации ОАО РКЦ «Прогресс».

Разработанные математические модели, а также имитационные модели и схемотехнические решения, прошли апробацию и внедрены в практику ПАО «КАМАЗ». Алгоритмы работы и схемы расчетов будут учтены при проектировании перспективного проекта ПАО «КАМАЗ» по созданию беспилотного грузового электромобиля.

Предварительная оценка предлагаемых расчетных формул дана по результатам имитационного моделирования. Рассчитанная погрешность математических моделей ЭКЭП с оценкой критического состояния АТО по критерию сопротивление изоляции находится в пределах 10%.

Исчерпывающая оценка предлагаемых расчетных формул и математических моделей может быть дана по результатам натурных экспериментов, выполненных на сертифицированных лабораторных стендах. Результаты этих экспериментов представлены в 4 главе.

## **4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА РАБОТОСПОСОБНОСТИ ЭКЭП АТО**

### **4.1. Постановка задачи экспериментальных исследований**

Как было отмечено в предыдущей главе, наряду с математическими моделями, и имитационными моделями, построенными на их основе при диагностике и функциональном прогнозировании технических систем, в частности системы мониторинга работоспособности ЭКЭП АТО с оценкой критического состояния, рассмотренных в Главе 3 данной диссертационной работы, для исчерпывающей оценки широко применяются экспериментальные стендовые модели. Данные модели являются важнейшей составной частью научных диссертационных исследований, основой которых является научно поставленный опыт с точно учитываемыми и управляемыми условиями.

В понятие эксперимент диссертационного или другого научного исследования вкладывается в постановке опытов и наблюдения исследуемого явления в точно учитываемых условиях, которые позволяют следить за ходом явлений и сопоставлять его каждый раз с заданными значениями. В данной работе контроль сопротивления изоляции шин питания зависит от полученных физических величин напряжения между шинами «-» и «+», измеренных вольтметрами при различной коммутации ключей.

Целью создания и проведения экспериментальной модели являются выявление свойств, предложенной системы мониторинга работоспособности ЭКЭП, а также проверка адекватности и справедливости моделей при различной вариации системы питания АТО.

Технологический цикл данного вычислительного эксперимента можно разделить на следующие этапы:

1. На основании имитационной модели для системы питания только от АКБ создается схема замещения, учитывающая все элементы цепи, за исключением сопротивления линии, согласно рис.3.10.
2. Расчет линейных алгебраических математических моделей первого порядка будет вестись в процессоре *MS Excel*. Входным параметром является падения напряжения на шинах.
3. Полученные значения сопротивления линии необходимо сравнить с заданными значениями сопротивления линии, а затем подсчитать погрешность измерений.

Часто в сложных энергетических системах, вычислительный эксперимент оказывается единственно возможным, подтверждающим адекватность предложенной модели.

#### 4.2 Разработка технического решения реализации электротехнической системы мониторинга ЭКЭП АТО. Экспериментальные исследования функционирования реальной системы

Выполненная ранее в диссертации научно-техническая работа, заключалась в создании концепции системы мониторинга работоспособности ЭКЭП с оценкой критического состояния по сопротивлению изоляции, ее реализации в виде идеализированной расчетной схемы, представленной на рис. 4.1.

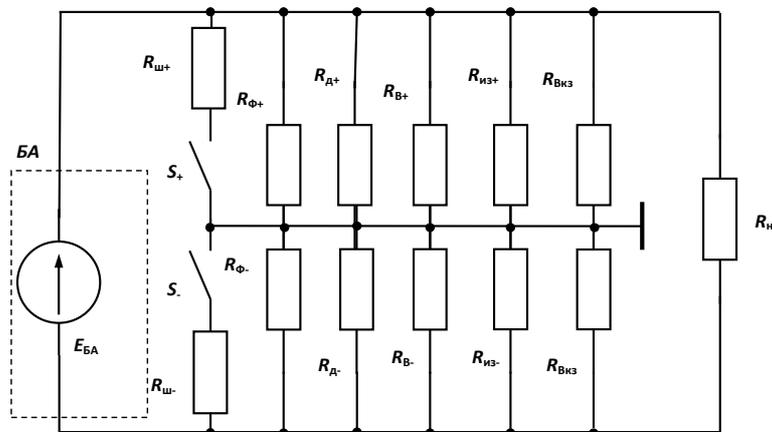


Рисунок 4.1- Идеализированная расчетная схема ЭКЭП, при питании только от АКБ.

Для первичной отработки проводились расчеты в процессоре *MS Excel* по математически моделям (4.1), которые показали, что сопротивление изоляции шин питания зависит от напряжений «-» и «+», при различном положении ключей  $S_1$  и  $S_2$ . (см. раздел 3)

$$\begin{aligned} G_{\text{из}+} &= \frac{1 + K_1}{K_2 - K_1} G_{\text{ш}} - G, \\ G_{\text{из}-} &= \frac{K_2 + 1}{K_2 - K_1} K_1 G_{\text{ш}} - G, \end{aligned} \quad (4.1)$$

Где  $G_{\text{ш}}$ -проводимость шунта

$$\begin{aligned} R_{\text{из}+} &= 1/G_{\text{из}+}; R_{\text{из}-} = 1/G_{\text{из}-}; K_1 = \frac{U_{11}}{U_{21}}; K_2 = \frac{U_{12}}{U_{22}}; G = G_{\text{Ф}} + G_{\text{Д}} + G_{\text{В}} + G_{\text{Вкз}}; \\ G_{\text{Ф}} &= 1/R_{\text{Ф}}; G_{\text{Д}} = 1/R_{\text{Д}}; G_{\text{В}} = 1/R_{\text{В}}; G_{\text{Вкз}} = 1/R_{\text{Вкз}}. \end{aligned}$$

Далее нами был разработан комплекс математических имитационных моделей, реализация которых показала, что погрешность полученных результатов остается в пределах инженерной, порядка 3%, что позволяет оценить практическую приемлемость метода.

Для оценки адекватности полученных при моделировании результатов, осуществляется проверка по методам контурных токов, представленных в 3 главе. Все полученные результаты адекватны, погрешности в допустимых диапазонах, а значит выбранное нами направление действительно отражает лучшее из возможных решений сложной научно-технической задачи по разработке и реализации системы мониторинга работоспособности ЭКЭП с оценкой критического состояния АТО по критерию сопротивления изоляции шин питания.

Однако, практика показывает, что важнейшим элементом решения прикладной научно-технической работы является эксперимент. И в этой части, нами на основе лабораторной базы кафедры «ТОЭ» СамГТУ разработано и реализовано схемотехническое решение задачи диссертационного исследования, системы мониторинга работоспособности ЭКЭП с оценкой критического состояния АТО.

В ходе натурального эксперимента, проводимого лаборатории кафедры «ТОЭ» были приняты следующие допущения:

1. С учетом специфики схемы (наличие ИБС с изменяющимися параметрами напряжения холостого хода и внутреннего сопротивления, ШР РИМ) целесообразно провести замену двух источников и регулятора эквивалентным источником  $r_{БА} = 0$ .

Очевидно, что для нормальной эксплуатации его напряжение холостого хода и внутреннее сопротивление эквивалентного источника близки к соответствующим параметрам АКБ, которые практически не влияют на оценки значений сопротивлений изоляции при выбранных для измерения переменных. Это можно использовать в ходе эксперимента численными методами расчетной схемы с учетом неконтролируемых значений параметров линии

2. Для вычисления значений  $R_{из+}$ ,  $R_{из-}$  неконтролируемого сопротивление на линии по малости влияния ( $\alpha = 0, (1 - \alpha) r_{л} = 0$ ), учитывать в эксперименте не будем.

3. Имитатор АКБ в эксперименте соответствует генератор постоянных напряжений 30В.

4. Сопротивление делителя  $R_{д+}$ ,  $R_{д-}$  составляет 640 кОм.

5. Внутреннее сопротивление измерительного вольтметра приравниваем  $R_{в+}$ ,  $R_{дв-}$  составляет 830 кОм.

6. Внутреннее сопротивление сигнального вольтметра приравниваем  $R_{вкз+}$ ,  $R_{квз-}$  составляет 830 кОм.

6. Сопротивление низкоомных шунтов  $R_{ш+}$ ,  $R_{ш-}$  составляет 10кОм.

7. Сопротивление фильтров  $R_{ф+}$ ,  $R_{ф-}$  составляет 100кОм.

8. Сопротивление нагрузки  $R_{н}$ , 0,33 кОм

Таблица 4.1-Начальные параметры системы электропитания АТО

Параметры	Rф	Rд	Rв	Rш	Rвкз	Rн	E
кОм	100	640	830	10	830	0,330	30

На рис.4.2 показано фото, собранной в лабораторных условиях расчетной схемы электропитания ЭКЭП АТО при питании только от АКБ .

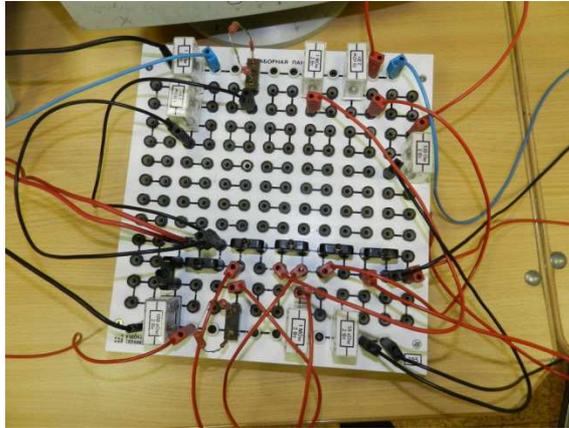


Рисунок 4.2 - Экспериментальная сборка электротехнической системы ЭКЭП АТО при питании только от АКБ

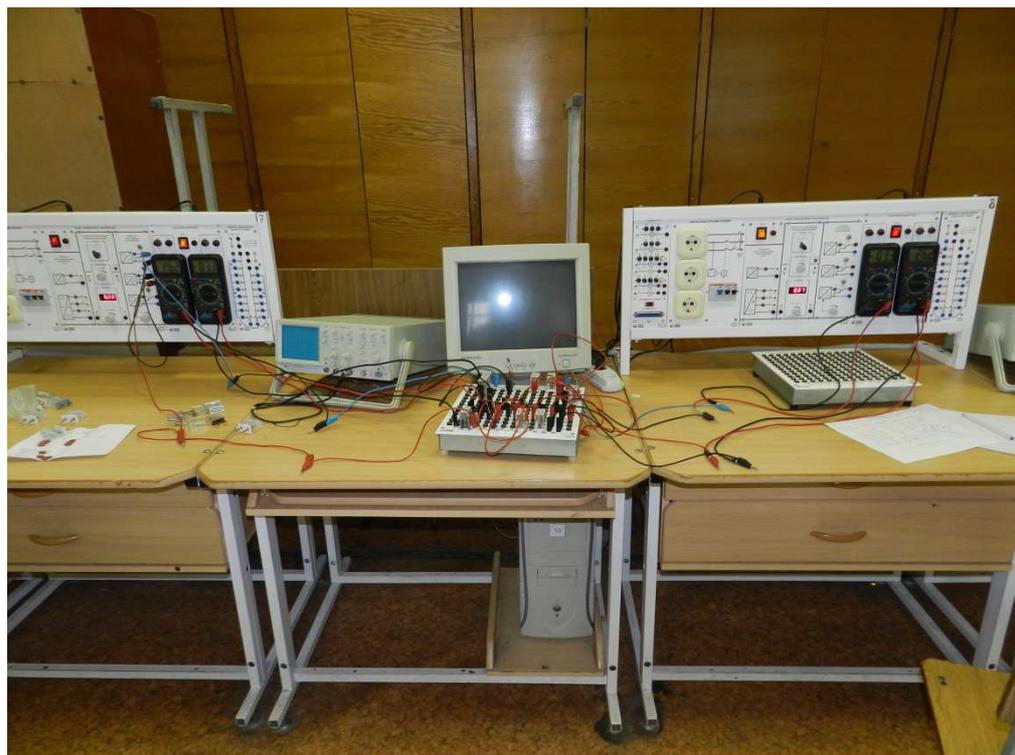


Рисунок 4.3- Лабораторная установка ЭКЭП АТО

В опыте моделировалось несколько режимов работы системы: 1) нормальный режим; 2) аварийный режим одной из шин; 3) короткое замыкание на двух шинах. Полученные результаты при натурном эксперименте являются входными

величинами для подсчета проводимостей изоляции между шинами питания, а затем и сопротивления изоляции. После чего мы рассчитали погрешность полученных значений, от заданных. Результаты эксперимента представлены в таблицы 4.2.

Таблица 4.2-Результаты натурального эксперимента схемы замещения ЭКЭП АТО при питании от АКБ.

Заданные значения, кОм		Полученные данные в ходе эксперимента, В						Полученные значения, кОм		Отн. погрешность	
Riz+	Riz-	U11	U21	k1	U12	U22	k2	Riz+	Riz-	д+,%	д-,%
1000,000	1000,000	3,5	24,00	0,1458	24,4	3,0	8,133	698,989	688,989	43,06	45,14
2000,000	2000,000	3,15	24,20	0,130233995	24,25	3,15	7,678486711	897,12	959,3	122,93	108,4
100,000	100,000	4,4	23	0,193378229	23	4,4	5,171212945	99,996	89,996	0,04	0,04
10,000	10,000	9,5	17,9	0,532654041	17,9	10	1,877391182	9,091	9,091	0,05	0,06
1,000	1,000	13,0	14,35	0,910230924	14,35	13,0	1,09862231	0,990	0,990	0,01	0,01
0,100	0,100	13,6	13,77	0,990111355	13,77	13,65	1,009987407	0,100	0,100	0,00	0,00
1000,000	100,000	4,7	22,70	0,207175205	24,45	2,98	8,20137233	890,859	90,317	12,25	3,82
1000,000	1,000	24,27	3,13	7,744030442	26,71	0,70	37,78194687	496,781	1,004	52,02	0,0
2000,000	0,100	26,72	0,7	38,49158048	27	0,42	63,73394682	1560,558	0,101	56,78	0,0

Как видно по результатам проведения натурного эксперимента система мониторинга достаточно точно, в пределах приемлемого уровня погрешности, рассчитывает первый режим (нормальный) и короткое замыкание на обеих шинах. Однако, при пробое на одной из шин, сопротивление изоляции между поврежденной шиной и корпусом имеет малое расхождения с заданными значениями, порядка 3%, а другая шина имеет большую погрешность измерения, но полученное значение, выше чем критическое 300кОм, заданное в алгоритме системы.

Полученные значения сопоставимы и адекватны значениям сопротивления изоляции, полученными в математическом имитационном моделировании и с расчетами по методу МКТ и МУН (с учетом сопротивления линии), что подтверждает приемлемость и правильность нашей концепции системы мониторинга работоспособности ЭКЭП по оценке критического состояния АТО.

Проведенные практические исследования подтверждаются результатами экспериментов и апробации в ПАО «КАМАЗ», где система мониторинга работоспособности ЭКЭП по оценке критического состояния АТО в перспективном проекте создания беспилотного автомобиля нашла применение.

### 4.3 Расчетное экспериментирование электротехнической системы мониторинга в математической программной среде Matlab и имитационной среде Electronics Workbench.

Полученные практические значения сопротивления, в натурном эксперименте (см. раздел 4.2) и промоделированные модели при различной вариации системы питания (см. раздел 3) имеют сопоставимые расчетные значения.

Таблица 4.3-Сопоставительные результаты определения значений сопротивлений изоляции (Модель 1-питание только от АКБ, сопротивление одного проводника линии электропитания – 3% от сопротивления нагрузки).

Модель 1		$R_n$	$k$	$r_n$	$\alpha$	$E$	$r_E$			
		0,001	0,03	3,0E-05	0,50	30	3,0E-06			
Риз+	Риз-	$U_{11}$	$U_{21}$	$U_{12}$	$U_{22}$	$R_{из+}$	$\delta R_{из+}$	$R_{из-}$	$\delta R_{из-}$	
1000	1000	3,44684	26,46850	26,46850	3,44684	1000,000	0,00%	1000,000	0,00%	MSE
		3,444	26,440	26,440	3,444	1024,047	2,40%	1024,047	2,40%	EWB
200	1000	3,35654	26,55879	25,69071	4,22463	202,290	1,15%	946,429	-5,36%	MSE
		3,353	26,530	25,670	4,221	203,476	1,74%	971,772	-2,82%	EWB
100	1000	3,25099	26,66434	24,78144	5,13389	101,290	1,29%	887,029	-11,30%	MSE
		3,248	26,64	24,76	5,129	101,599	1,60%	909,810	-9,02%	EWB
10	1000	2,13941	27,77592	15,20606	14,70927	10,142	1,42%	416,503	-58,35%	MSE
		2,137	27,750	15,190	14,700	10,140	1,40%	421,296	-57,87%	EWB
1000	200	4,22463	25,69071	26,55879	3,35654	946,429	-5,36%	202,290	1,15%	MSE
		4,221	25,670	26,530	3,353	971,772	-2,82%	203,476	1,74%	EWB
1000	100	5,13389	24,78144	26,66434	3,25099	887,029	-11,30%	101,290	1,29%	MSE
		5,129	24,760	26,640	3,248	909,810	-9,02%	101,599	1,60%	EWB
500	100	5,10023	24,81510	26,47683	3,43850	473,214	-5,36%	101,145	1,15%	MSE
		5,095	24,790	26,450	3,435	479,564	-4,09%	101,434	1,43%	EWB

Для подтверждения адекватности разработанной системы мониторинга работоспособности ЭКЭП с оценкой критического состояния АТО с учетом сопротивления линий, проводилось расчетное экспериментирование в математической программной среде *Matlab* и имитационной среде *Electronics Workbench*. Результаты расчетного экспериментирования представлены в табл. 4.3-4.8.

При этом были приняты следующие примечания:

1. В таблицах 4.3-4.8 аббревиатура MSE соответствует расчетам в MS Excel, аббревиатура EWB соответствует измерениям напряжений в Electronics Workbench с последующим расчетом значений сопротивлений изоляции в MS Excel
2. Значения напряжений указаны в В, сопротивлений – в кОм.

Таблица 4.4 - Сопоставительные результаты определения значений сопротивлений изоляции (Модель 1- при питании только от АКБ, сопротивление одного проводника линии электропитания – 1% от сопротивления нагрузки)

Модель 1

$R_H$	$k$	$r_n$	$\alpha$	$E$	$r_E$
0,001	0,01	1,0E-05	0,50	30	1,0E-06

Риз+	Риз-	$U_{11}$	$U_{21}$	$U_{12}$	$U_{22}$	$R_{из+}$	$\delta R_{из+}$	$R_{из-}$	$\delta R_{из-}$	
1000	1000	3,45320	26,51741	26,51741	3,45320	1000,000	0,00%	1000,000	0,00%	MSE
		3,443	26,440	26,440	3,443	1029,317	2,93%	1029,317	2,93%	EWB
200	1000	3,35447	26,61615	25,72991	4,24071	200,787	0,39%	980,769	-1,92%	MSE
		3,345	26,540	25,660	4,228	202,135	1,07%	1008,423	0,84%	EWB
100	1000	3,23904	26,73157	24,80928	5,16133	100,443	0,44%	957,747	-4,23%	MSE
		3,23	26,65	24,74	5,146	100,761	0,76%	980,642	-1,94%	EWB
10	1000	2,02350	27,94712	15,11429	14,85632	10,049	0,49%	673,267	-32,67%	MSE
		2,018	27,860	15,070	14,810	10,053	0,53%	683,795	-31,62%	EWB
1000	200	4,24071	25,72991	26,61615	3,35447	980,769	-1,92%	200,787	0,39%	MSE
		4,228	25,660	26,540	3,345	1008,423	0,84%	202,135	1,07%	EWB
1000	100	5,16133	24,80928	26,73157	3,23904	957,747	-4,23%	100,443	0,44%	MSE
		5,146	24,740	26,650	3,203	1122,374	12,24%	101,034	1,03%	EWB
500	100	5,12550	24,84512	26,54161	3,42901	490,385	-1,92%	100,394	0,39%	MSE
		5,111	24,770	26,460	3,419	496,390	-0,72%	100,621	0,62%	EWB

Таблица 4.5- Сопоставительные результаты определения значений сопротивлений изоляции (при питании только от АКБ и отключенной СБ, сопротивление одного проводника линии электропитания – 3% от сопротивления нагрузки)

Модель 2

$R_H$	$k$	$r_n$	$\alpha$	$1-\alpha$	$E_{БА}$	$r_{БА}$	$E_{БС}$	$r_{БС}$
0,001	0,03	0,00003	0,50	0,50	30	0,000003	60	0,001

Риз+	Риз-	$U_{11}$	$U_{21}$	$U_{\Phi 21}$	$U_{12}$	$U_{22}$	$U_{\Phi 22}$	$R_{из+}$	$\delta R_{из+}$	$R_{из-}$	$\delta R_{из-}$	
1000	1000	6,26025	23,65509	53,73915	29,07044	0,84489	30,92921	1000,000	0,00%	1000,000	0,00%	MSE
		6,259	23,630	53,740	29,050	0,839	30,950	1001,715	0,17%	1001,641	0,16%	EWB
200	1000	6,08749	23,82784	53,91191	28,22257	1,69276	31,77707	202,290	1,15%	946,429	-5,36%	MSE
		6,086	23,800	53,910	28,200	1,687	31,800	202,176	1,09%	946,389	-5,36%	EWB
100	1000	5,88541	24,02992	54,11398	27,23080	2,68454	32,76884	101,290	1,29%	887,029	-11,30%	MSE
		5,884	24,000	54,120	27,210	2,678	32,790	101,276	1,28%	889,729	-11,03%	EWB
1000	200	6,94784	22,96750	53,05157	29,08292	0,83242	30,91674	946,429	-5,36%	202,290	1,15%	MSE
		6,946	22,940	53,05	29,060	0,827	30,94	945,905	-5,41%	202,191	1,10%	EWB
1000	100	7,75213	22,16320	52,24729	29,09751	0,81782	30,90214	887,029	-11,30%	101,290	1,29%	MSE
		7,749	22,140	52,25	29,070	0,813	30,93	883,788	-11,62%	101,307	1,31%	EWB
500	100	7,70021	22,21513	52,29921	28,89436	1,02097	31,10529	473,214	-5,36%	101,145	1,15%	MSE
		7,697	22,190	52,3	28,870	1,016	31,13	472,421	-5,52%	101,148	1,15%	EWB

Таблица 4.6 - Сопоставительные результаты определения значений сопротивлений изоляции (Модель 2- при питании от двух источников АКБ и отключенной СБ, сопротивление одного проводника линии электропитания – 1% от сопротивления нагрузки).

Модель 2

$R_H$	$k$	$r_n$	$\alpha$	$1-\alpha$	$E_{БА}$	$r_{БА}$	$E_{БС}$	$r_{БС}$
0,001	0,01	0,00001	0,50	0,50	30	0,000001	60	0,001

Риз+	Риз-	$U_{11}$	$U_{21}$	$U_{\Phi 21}$	$U_{12}$	$U_{22}$	$U_{\Phi 22}$	$R_{из+}$	$\delta R_{из+}$	$R_{из-}$	$\delta R_{из-}$	
1000	1000	6,26234	23,70828	53,73706	29,11469	0,85593	30,88497	1000,000	0,00%	1000,000	0,00%	MSE
		6,259	23,620	53,740	29,040	0,838	30,950	999,734	-0,03%	999,011	-0,10%	EWB
200	1000	6,08134	23,88927	53,91805	28,25733	1,71329	31,74231	200,787	0,39%	980,770	-1,92%	MSE
		6,078	23,800	53,920	28,190	1,694	31,810	200,771	0,39%	979,617	-2,04%	EWB
100	1000	5,86963	24,10099	54,12977	27,25445	2,71616	32,74518	100,443	0,44%	957,747	-4,23%	MSE
		5,866	24,020	54,130	27,190	2,694	32,810	100,468	0,47%	960,033	-4,00%	EWB
1000	200	6,95969	23,01093	53,03972	29,13567	0,83494	30,86398	980,770	-1,92%	200,787	0,39%	MSE
		6,954	22,930	53,05	29,070	0,818	30,93	985,273	-1,47%	200,923	0,46%	EWB
1000	100	7,77539	22,19523	52,22402	29,16022	0,81040	30,83944	957,747	-4,23%	100,443	0,44%	MSE
		7,767	22,120	52,23	29,090	0,794	30,91	958,464	-4,15%	100,439	0,44%	EWB
500	100	7,72134	22,24927	52,27807	28,95467	1,01595	31,04498	490,385	-1,92%	100,394	0,39%	MSE
		7,713	22,170	52,290	28,880	0,999	31,12	489,500	-2,10%	100,380	0,38%	EWB

Таблица 4.7 - Сопоставительные результаты определения значений сопротивлений изоляции (Модель 3.1 при питании от двух источников АКБ и СБ, сопротивление одного проводника линии электропитания – 3% от сопротивления нагрузки).

**Модель 3.1**

$R_n$	$k$	$r_l$	$\alpha$	$1-\alpha$	$E_{BA}$	$r_{BA}$	$E_{BC}$	$r_{BC}$	$U_{зв}$	$U_{ст}$
0,001	<b>0,03</b>	0,00003	0,50	0,50	30	0,000003	50	0,00006	17,650	15,000

Риз+	Риз-	$U_{11}$	$U_{21}$	$U_{12}$	$U_{22}$	$R_{из+}$	$\delta R_{из+}$	$R_{из-}$	$\delta R_{из-}$	
1000	1000	2,61033	30,06351	27,75482	4,91901	1000,00010	0,00%	1000,00010	0,00%	MSE
		2,605	30,040	27,730	4,918	992,263	-0,77%	1008,064	0,81%	EWB
200	1000	2,54618	30,12765	26,93978	5,73405	202,29010	1,15%	946,42867	-5,36%	MSE
		2,541	30,110	26,910	5,733	201,710	0,85%	955,890	-4,41%	EWB
100	1000	2,47120	30,20264	25,98698	6,68686	101,29003	1,29%	887,02939	-11,30%	MSE
		2,466	30,180	25,960	6,685	101,144	1,14%	894,029	-10,60%	EWB
1000	200	3,49431	29,17952	27,88791	4,78592	946,42867	-5,36%	202,29010	1,15%	MSE
		3,488	29,160	27,860	4,785	938,243	-6,18%	202,747	1,37%	EWB
1000	100	4,52772	28,14612	28,04350	4,63033	887,02939	-11,30%	101,29003	1,29%	MSE
		4,521	28,130	28,020	4,630	879,892	-12,01%	101,417	1,42%	EWB
500	100	4,49867	28,17517	27,84641	4,82742	473,21433	-5,36%	101,14506	1,15%	MSE
		4,492	28,160	27,820	4,827	470,727	-5,85%	101,277	1,28%	EWB

Таблица 4.8 - Сопоставительные результаты определения значений сопротивлений изоляции (Модель 3.1 при питании от двух источников АКБ и СБ, сопротивление одного проводника линии электропитания – 1% от сопротивления нагрузки).

**Модель 3.1**

$R_n$	$k$	$r_l$	$\alpha$	$1-\alpha$	$E_{BA}$	$r_{BA}$	$E_{BC}$	$r_{BC}$	$U_{зв}$	$U_{ст}$
0,001	<b>0,01</b>	0,00001	0,50	0,50	30	0,000001	50	0,00006	17,650	15,000

Риз+	Риз-	$U_{11}$	$U_{21}$	$U_{12}$	$U_{22}$	$R_{из+}$	$\delta R_{из+}$	$R_{из-}$	$\delta R_{из-}$	
1000	1000	2,60839	30,04864	27,73996	4,91707	1000,000	0,00%	1000,000	0,00%	MSE
		2,604	30,040	27,730	4,918	992,942	-0,71%	1012,030	1,20%	EWB
200	1000	2,53528	30,12175	26,91634	5,74070	200,787	0,39%	980,769	-1,92%	MSE
		2,531	30,110	26,900	5,741	200,359	0,18%	990,633	-0,94%	EWB
100	1000	2,44980	30,20723	25,95349	6,70354	100,443	0,44%	957,747	-4,23%	MSE
		2,446	30,200	25,940	6,703	100,371	0,37%	968,360	-3,16%	EWB
1000	200	3,50096	29,15607	27,88202	4,77502	980,769	-1,92%	200,787	0,39%	MSE
		3,497	29,150	27,870	4,776	972,329	-2,77%	201,216	0,61%	EWB
1000	100	4,54440	28,11263	28,04809	4,60894	957,747	-4,23%	100,443	0,44%	MSE
		4,540	28,100	28,030	4,610	945,496	-5,45%	100,494	0,49%	EWB
500	100	4,51307	28,14396	27,84881	4,80822	490,385	-1,92%	100,394	0,39%	MSE
		4,508	28,130	27,830	4,809	487,258	-2,55%	100,464	0,46%	EWB

Показания вольтметров в схеме, моделируемой в среде *Electronics Workbench*, содержали 4 значащих цифры; специальное округление числовых значений в моделях MS Excel не производилось. Расчет значений сопротивлений для обоих случаев производился однотипно средствами MS Excel.

Полученное сопоставление результатов расчетов показало:

- Математическое моделирование одних и тех же схем замещения в среде *Electronics Workbench* и средствами *MS Excel* дает практически одинаковые результаты;
- Обоими методами показано незначительное влияние конечного значения сопротивлений линии электропитания на расчетные значения сопротивлений изоляции;
- выбор инструментальных средств анализа схем замещения и применимости тех или иных расчетных формул определяется преимущественно квалификационными предпочтениями персонала.

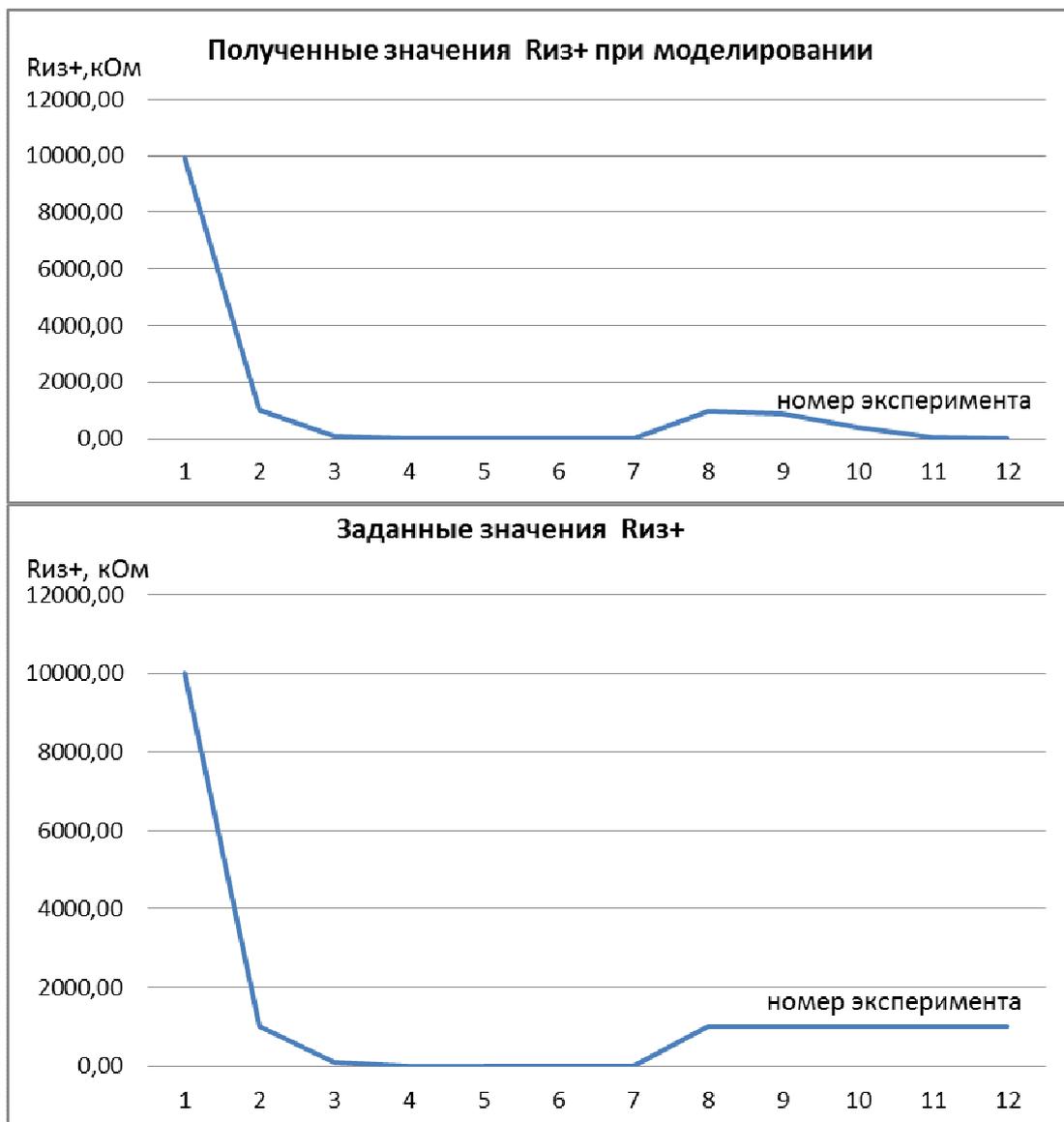


Рисунок 4.4 – Диаграммы изменений сопротивлений изоляции между «-» и корпусом.



Рисунок 4.5- Диаграммы сопротивлений изоляции между «+» и корпусом.

#### 4.4 Расчет переходного процесса в системе ЭКЭП АТО

Для решения задачи определения времени запроса АЦП на проведение измерений, требуется учет времени переходного процесса системы мониторинга ЭКЭП АТО. Характеристическое уравнение, составленное по выражению входного сопротивления со стороны зажимов источника:

$$Z(j\omega) = \frac{\left( \frac{R_+ \frac{1}{j\omega C_{\phi a+}}}{R_+ + \frac{1}{j\omega C_{\phi a+}}} + \frac{R_- \frac{1}{j\omega C_{\phi a-}}}{R_- + \frac{1}{j\omega C_{\phi a-}}} \right) \left[ \frac{r_{AB}(r_{лин} + R_H)}{r_{AB} + r_{лин} + R_H} \right]}{\frac{R_+ \frac{1}{j\omega C_{\phi a+}}}{R_+ + \frac{1}{j\omega C_{\phi a+}}} + \frac{R_- \frac{1}{j\omega C_{\phi a-}}}{R_- + \frac{1}{j\omega C_{\phi a-}}} + \frac{r_{AB}(r_{лин} + R_H)}{r_{AB} + r_{лин} + R_H}} \quad (4.2)$$

Полагая  $j\omega \rightarrow p$ ;  $Z(p) = 0$ , получим

$$Z(p) = \frac{R_+ \frac{1}{pC_{\phi a+}}}{R_+ + \frac{1}{pC_{\phi a+}}} + \frac{R_- \frac{1}{pC_{\phi a-}}}{R_- + \frac{1}{pC_{\phi a-}}} = 0 \quad (4.3)$$

После преобразований характеристическое уравнение приобретает вид

$$pR_+R_-(C_{\phi a+} + C_{\phi a-}) + R_+ + R_- = 0,$$

а его корень

$$p = -\frac{R_+ + R_-}{R_+R_-(C_{\phi a+} + C_{\phi a-})} = -\frac{8,13 \cdot 10^3 + 43,92 \cdot 10^3}{8,13 \cdot 10^3 \cdot 43,92 \cdot 10^3 \cdot 68,66 \cdot 10^{-6}} = -2,12 \frac{1}{c}.$$

причем

$$R_+ = \frac{1}{g_+} = \frac{1}{0,123 \cdot 10^{-3}} = 8,13 \cdot 10^3 \text{ Ом}$$

$$g_+ = \frac{1}{R_{из+}} + \frac{1}{R_{ш+}} + \frac{1}{R_{\phi a}} + \frac{1}{R_D} + \frac{1}{r_V} = \frac{1}{100 \cdot 10^3} + \frac{1}{10 \cdot 10^3} + \frac{1}{100 \cdot 10^3} + \frac{1}{640 \cdot 10^3} + \frac{1}{830 \cdot 10^3} = 0,123 \cdot 10^{-3}$$

$$R_- = \frac{1}{g_-} = \frac{1}{0,02277 \cdot 10^{-3}} = 43,92 \cdot 10^3 \text{ Ом}$$

$$g_- = \frac{1}{R_{из-}} + \frac{1}{R_{\phi a}} + \frac{1}{R_D} + \frac{1}{r_V} = \frac{1}{100 \cdot 10^3} + \frac{1}{100 \cdot 10^3} + \frac{1}{640 \cdot 10^3} + \frac{1}{830 \cdot 10^3} = 0,02277 \cdot 10^{-3}$$

$$C_{\phi a+} = 0,33 \cdot 10^{-6} \text{ ф}$$

$$C_{\phi a-} = 68,33 \cdot 10^{-6} \text{ ф}$$

Постоянная времени цепи при коммутациях в системе измерения сопротивления изоляции  $\tau = |1/p| = 1/2,12 = 0,46 \text{ с}$ .

Длительность переходного процесса составит при  $t_{п.пр.} \approx (3 \div 7)\tau$ , т.е. не более 3,32 с.

Для определения продолжительности интервалов задержки включения вольтметров, обусловленных переходными процессами в цепи при коммутации измерительных шунтов и перезаряде конденсаторов ФА, достаточно оценить постоянную времени эквивалентной цепи.

Целесообразно рассмотреть реакцию цепи на нулевое входное воздействие (или в ТОЭ – «свободную составляющую»).

Допущения:

- 1) значение внутреннего сопротивления эквивалентного источника энергии пренебрежимо мало (доли Ома);
- 2) значения сопротивлений линии и нагрузки пренебрежимо малы (единицы Ом).

Тогда схема замещения принимает следующий вид (рис.4.6):

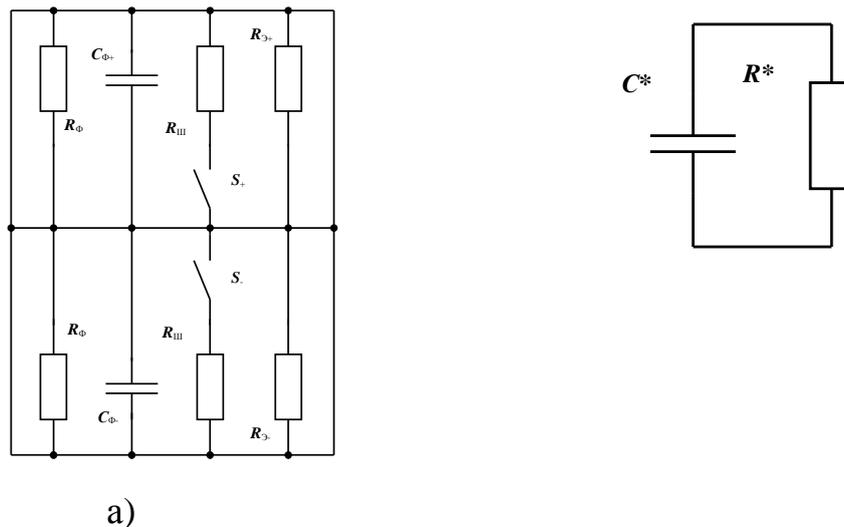


Рисунок 4.6- Схема замещения для определения задержек при коммутации измерительных шунтов

Значения параметров и переменных:

- $R_{Ф}=100$  к,  $R_{Ш}=10$  к,  $R_{Э+}=R_{Э-}=100$  к (с запасом, на самом деле – несколько меньше за счет входных сопротивлений вольтметров);  $C_{Ф+}=0,33$  мкФ,  $C_{Ф-}=68$  мкФ;
- до коммутации  $U_{сФ+}(-0) = U_{сФ-}(-0) = U_0/2$ ;
- после коммутации  $U_{сФ+}(+0) \neq U_{сФ-}(+0)$ ; один из ключей замкнут.

Схема замещения для расчета реакции на нулевое входное воздействие показана на рис.4.6. Проблемы некорректности параллельного соединения двух емкостей не возникает: до коммутации напряжения на них равны, и свободные составляющие равные. Однако после коммутации они должны быть заряжены до разных напряжений.

Достаточно оценить постоянную времени цепи для ситуации *после замыкания ключа*.

Проведем оценки  $C^*$  и  $R^*$ .

$$R^* \approx R_{\text{Э}}/2 \parallel R_{\text{Ф}}/2 \parallel R_{\text{Ш}} \approx 8 \text{ кОм}, C^* = C_{\text{Ф}+} + C_{\text{Ф}-} \approx 70 \text{ мкФ}.$$

Тогда постоянная времени цепи  $\tau = 8 \cdot 10^3 \cdot 70 \cdot 10^{-6} \approx 0,6 \text{ с}$ . Рекомендуемое время задержки не менее  $(5 - 7) \tau = (3 - 5) \text{ с}$ .

Иная ситуация – *после размыкания ключа* до замыкания следующего. Строго говоря, начальные условия для емкостей различны. Но емкость конденсатора  $C_{\text{Ф}+}$  в 200 раз меньше емкости  $C_{\text{Ф}-}$ . Пренебрежем  $C_{\text{Ф}+}$ .

В этом случае

$$R^* \approx R_{\text{Э}}/2 \parallel R_{\text{Ф}}/2 \approx 25 \text{ кОм}, C^* = C_{\text{Ф}-} \approx 70 \text{ мкФ}.$$

Тогда постоянная времени цепи  $\tau = 25 \cdot 10^3 \cdot 70 \cdot 10^{-6} \approx 1,8 \text{ с}$ . Рекомендуемое время задержки не менее  $(5 - 7) \tau = (9 - 14) \text{ с}$ .

В результате расчета постоянной времени цепи при коммутациях получено значение  $\tau = 25 \cdot 10^3 \cdot 70 \cdot 10^{-6} \approx 1,8 \text{ с}$ . Рекомендуемое время задержки не менее  $(5 - 7) \tau = (9 - 14) \text{ с}$ .

В результате работы получен комплекс математических имитационных моделей системы мониторинга работоспособности ЭКЭП АТО с учетом возможных конфигураций источников питания, а также режимов эксплуатации.

#### **4.5 Оценка эффективности электротехнической системы мониторинга работоспособности ЭКЭП АТО**

Для оценки эффективности метода следует учесть погрешности вычисления значений  $R_{\text{из1}}$ ,  $R_{\text{из2}}$ .

Как было получено ранее, значение сопротивления изоляции соответствуют выражениям

$$R_{из1} = \frac{K_2 - K_1}{1 + K_1} r, \quad (4.4)$$

$$R_{из2} = \frac{K_2 - K_1}{K_1(1 + K_2)} r. \quad (4.5)$$

При этом целесообразно рассмотреть оценки предельных относительных погрешностей  $\delta R_{из1}$ ,  $\delta R_{из2}$  с учетом (4.4), (4.5)

$$\begin{aligned} \delta(R_{из1}) &= \delta(K_2 - K_1) + \delta(K_1) + \delta(r), \\ \delta(R_{из2}) &= \delta(K_2 - K_1) + \delta(K_1(1 + K_2)) + \delta(r), \end{aligned} \quad (4.6)$$

или

$$\begin{aligned} \delta(R_{из1}) &= \frac{K_{2\max} \delta(K_2) + K_{1\max} \delta(K_1)}{|K_2 - K_1|_{\min}} + \delta(K_2 - K_1) + \delta(r), \\ \delta(R_{из2}) &= \frac{K_{2\max} \delta(K_2) + K_{1\max} \delta(K_1) + \delta(r)}{|K_2 - K_1|_{\min}} + \\ &\frac{K_{1\max} \delta(K_1) + K_{1\max} K_{2\max} (\delta(K_1) + \delta(K_2))}{(K_1(1 + K_2))_{\min}} + \delta(r). \end{aligned} \quad (4.7)$$

Принимая упрощающие допущения

$$\begin{aligned} \delta(K_1) &= \delta(U_{11}) + \delta(U_{21}) = 2\delta(U), \\ \delta(K_2) &= \delta(U_{12}) + \delta(U_{22}) = 2\delta(U), \\ K_{\max} &\leq 0,8, K_{\min} \geq 0,2, \\ \delta(R_{из1}) &\leq 20\delta(U) + \delta(r), \\ \delta(R_{из2}) &\leq 15\delta(U) + \delta(r), \end{aligned} \quad (4.8)$$

можно получить, что

$$\delta(R_{из1}) \leq 20\delta(U) + \delta(r). \quad (4.9)$$

Соотношение (4.3-4.8) позволяет получить примерную оценку требований к погрешности измерения напряжений на плечах делителя и погрешности сопротивлений резисторов делителя. Ограничения (4.9) обеспечиваются соответствующим выбором диапазона измерений.

В данном методе рассмотрим некоторые частные случаи, раскрывающие особенности данного метода и погрешность измерения.

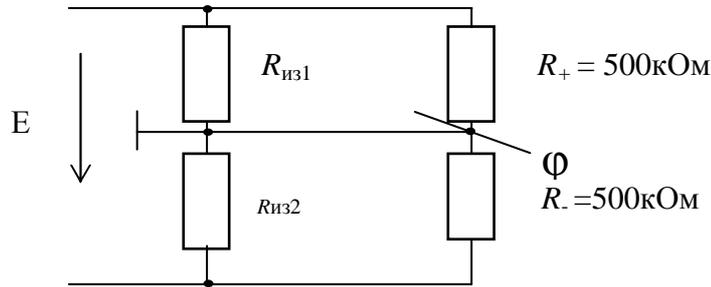


Рисунок 4.7- Расчетная схема с коммутацией.

*Частный случай 1*

$$1) S_1 = 1; S_2 = 0$$

$$U_{11} = \frac{100 // 500 \cdot E}{200 + 100 // 500} = \frac{5}{17} E$$

$$U_{22} = \frac{200 E}{200 + 100 // 500} = \frac{12}{17} E$$

$$K_1 = \frac{5}{12}$$

$$R_{из1} = \frac{\frac{7}{12} - \frac{5}{12}}{1 + \frac{5}{12}} \cdot 500 = 100 \text{ (кОм)}$$

$$2) S_1 = 0; S_2 = 1$$

$$U_{12} = \frac{100 E}{100 + 200 // 500} = \frac{7}{17} E$$

$$U_{22} = \frac{200 // 500 \cdot E}{100 + 200 // 500} = \frac{10}{17} E$$

$$K_2 = \frac{7}{10}$$

$$R_{из2} = \frac{\frac{7}{10} - \frac{5}{12}}{\frac{5}{12} \left(1 + \frac{7}{10}\right)} \cdot 500 = 200 \text{ (кОм)}$$

*Частный случай 2*

$$R_{из1} = 10 \text{ кОм}; R_{из2} = 200 \text{ кОм}; r = 500 \text{ кОм}$$

$$1) U_{11} = 0,047E$$

$$U_{21} = 0,953E$$

$$K_1 = 0,0493$$

$$R_{из1} = \frac{0,069 - 0,049}{1 + 0,049} \cdot 500 \approx 10 \text{ кОм}$$

$$2) U_{12} = 0,065E$$

$$U_{22} = 0,953E$$

$$K_2 = 0,0695$$

*При округлении*

$$R_{из2}^* = \frac{0,069 - 0,049}{0,049(1 + 0,069)} \cdot 500 \approx 187 \text{ кОм} \leftrightarrow 200 \text{ кОм } 6,5 \%$$

*Без округления*

$$R_{из2}^{**} = \frac{0,0695 - 0,0493}{0,0493(1 + 0,0695)} \cdot 500 \approx 191,6 \text{ кОм} \leftrightarrow 200 \text{ кОм } 4,2 \%$$

#### 4. 6 Выводы по главе 4

В главе представлены результаты экспериментальных исследований, которые выполнены в лаборатории электротехники на лабораторном оборудовании кафедры «ТОЭ» СамГТУ. Полученные результаты подтверждают адекватность предложенных математических и имитационных моделей, построенных на их основе. При выполнении эксперимента были использованы номинальные значения сопротивлений указанных элементов, рекомендованные при эксплуатации.

На модели, системы мониторинга работоспособности ЭКЭП АТО при питании только от АКБ, подтверждена эффективность использования и дана исчерпывающая оценка работоспособности метода с коммутируемым эталонным делителем для оценки значений сопротивлений изоляции линии под напряжением при минимальном влиянии на режим электропитания.

Анализ предлагаемых расчетных формул и математических и имитационных моделей может быть корректно реализован с использованием табличного процессора *MS Excel*. Сопоставительные результаты показали, что в различных средах модели рассчитываются приблизительно одинаково, что еще раз подтверждает адекватность и правильность разработанной системы мониторинга работоспособности ЭКЭП с оценкой критического состояния АТО.

Однако, возможные проблемы заметного влияния расчетных погрешностей (погрешностей округления), обусловленные специфическими особенностями моделей расчетных схем, не отмечены.

В работе произведен расчет переходного процесса учетом замыкания и размыкания ключей, который составляет от 9 до 14с. Это величина задается в алгоритме системы мониторинга работоспособности ЭКЭП АТО.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты и выводы по работе заключаются в разработке научно-технической концепции, по решению сложной технической задачи мониторинга работоспособности ЭКЭП АТО, и включающей:

1. Методику мониторинга и прогнозирования ЭКЭП АТО реализуемую на схемах с эталонным и коммутируемым делителями напряжения, позволяющую проводить автоматизированный анализ работоспособности ЭКЭП АТО, с погрешностью не более 3%, по критерию сопротивления изоляции шин.

2. Математические имитационные модели электротехнической системы мониторинга сопротивления изоляции шин, учитывающие конфигурацию и структуру ЭКЭП АТО, а также влияние характеристик и тип первичных источников электроэнергии в процессе функционирования, что обеспечивает повышение эффективности процесса проектирования соответствующих электротехнических устройств и систем. В инженерной практике, применение моделей, обеспечивает простой, наиболее эффективный переход от входных параметров модели к выходным, определяющим сопротивление изоляции, с требуемым уровнем погрешности.

3. Алгоритм функционирования системы мониторинга и оценки критического состояния ЭКЭП АТО, позволяющий реализовывать функции автоматизированного управления системой мониторинга, с возможностью перевода его в виде программного кода контроллера управления АТО.

4. Методику параметрического синтеза электротехнической системы мониторинга работоспособности, с учетом оценки критического состояния ЭКЭП АТО, а также требований к проектируемым аппаратным средствам.

5. Программно-техническое решение электротехнической системы мониторинга ЭКЭП АТО, обеспечивающее функцию контроля сопротивления изоляции с периодичностью 30 с.

Основные практические и теоретические результаты работы, реализованы при выполнении НИР ОКР 348/14 «Разработка методики и алгоритмов контроля сопротивления изоляции по шинам питания и математическое моделирование», которые проводились совместно с ОАО РКЦ «Прогресс» (г. Самара). Разработанные математические имитационные модели, схемотехническое решение системы мониторинга ЭКЭП АТО по критерию сопротивления изоляции шин, прошли апробацию и внедрены в практику применения ПАО «КАМАЗ» (г. набережные Челны).

Таким образом, задачи поставленные в диссертационной работе решены, цель достигнута.

### **Перспективы дальнейшей разработки темы**

Тема диссертационной работы имеет значительные перспективы для развития. Важнейшим аспектом для ее продолжения, является решение задачи по идентификации и локализации места повреждения шин питания в ЭКЭП АТО. Другое направление развития связано с разработкой и реализацией соответствующей электротехнической системы мониторинга в цепях переменного тока, поскольку в настоящее время все больше разработок применительно к АТО связано с переходом на переменный ток.

### **Благодарности**

Автор выражает глубокую благодарность своему учителю и первому научному руководителю, доктору технических наук, профессору Высоцкому Виталию Евгеньевичу, пробудившему интерес к научной деятельности. Автор выражает искреннюю благодарность кандидату технических наук Коломийцеву Юрию Николаевичу, а также кандидату технических наук Уманскому Михаилу Иосифовичу за ценные консультации и всестороннюю помощь. Особую признательность и благодарность автор выражает своему научному руководителю, доктору технических наук, Козловскому Владимиру Николаевичу за поддержку и участие в написании публикаций по теме диссертаций, а также за полезные замечания и плодотворное сотрудничество.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. А.с. 369515 СССР, МКИ G01R 27/18, Способ измерения сопротивления изоляции сетей постоянного тока относительно корпуса (земли)/ Иванов Е.А., Лебедев В.С., Григорьев З.Н., Бабаев В.И., Башлыков Н. М., Гандин Б. Д., Китаенко Г.И. (СССР).- 146656 1/24-7; заявлено 17.11.1970;опуб.08.02.1973, Бюл.№11.- С-2.
2. А.с. 370551 СССР, МКИ G01R 27/18, Устройство для измерения сопротивления изоляции / Васин И.М., Калашников Н.С. (СССР).- 1686162/18-10; заявлено 26.07.1971;опуб.18.11.1973, Бюл.№11.- С-2.
3. Бабилов М.А., Комаров Н.С., Сергеев А.С. Техника высоких напряжений. М.- Л.: Госэнергоиздат, 1963, с.399 - 400.
4. Бахтиаров Г.Д., Малинин В.В., Школин В.П. Аналого-цифровые преобразователи / под ред. Бахтиарова Г.Д. М.: Советское радио, 1980. -280 с.
5. Блохин А.Н. Результаты исследования электромобиля на шасси «ГАЗель» / Блохин А.Н., Грошев А.М., Яржемский А.Д.,Козлова Т.А., Серопян М.С.// Наука и образование: электронное научно-техническое издание».
6. Блохин, А.Н. Расход энергии транспортного средства с электроприводом при движении в городских условиях / Блохин А.Н., Зезюлин Д.В., Беляков В.В.// Вестник Ижевского государственного технического университета. – 2012. – №1(53). – С. 21-25.
7. Бородянский И.М. Исследование и разработка быстродействующих методов измерения сопротивления утечки изоляции в электрических цепях под напряжением. [Текст]: дис....канд.тех.наук:05.13.05:защищена 15.04.2006: утверждена 21.10.2006/Бородянский Илья Михайлович .-Таганрог,2006г.-24с.
8. Бородянский И.М., Бородянский М.Е., Веретенко Ю.О., Степаненков М.А. К вопросу измерения сопротивления утечки на корпус шин питания «ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ. ПРИБОРОСТРОЕНИЕ» №8 2005 год.-54с.
9. В.Н. Кравец. Теория автомобиля. Учебник для ВУЗов. – Нижний Новгород, НГТУ,2008 г.

10. ГОСТ 12175-90 Общие методы испытания материалов изоляции и оболочек электрокабелей. Утверждён и введён в действие постановлением государственного комитета СССР по управлению качеством продукции и стандартам от 29.12.90 № 3729.
11. ГОСТ 16263-70 Метрология. Термины и определения.- Москва: Из-во стандартов,1970. 8-12с.
12. ГОСТ 23474-79 приборы кабельные. Утвержден и введён в действие постановлением государственного комитета СССР по управлению качеством продукции и стандартам от 26.12.89 №4129.
13. ГОСТ Р 7.0.11-2011 Диссертация и автореферат диссертации. –Москва: Издательство Стандартиформ, 2012.-12с.
14. ГОСТ 7399-97 МЕЖГОСУДАРСТВЕННЫЙ стандарт провода и шнуры на номинальное напряжение до 450 / 750 В. Принят МЕЖГОСУДАРСТВЕННЫМ советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол № 11-97 от 25 апреля 1997г.)
15. Грошев, А.М. Концепция создания электромобилей LCV класса / Грошев А.М., Блохин А.Н. Костин С.Ю., Крашенников М.С.// Автотранспортное предприятие – 2012.-№1.-С42-49.
16. Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В. Теоретические основы электротехники. Учеб. для студентов электротехнических, энергетических специальностей вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. в 3-х т.– СПб.: Питер, 2006 - 463 с.
17. Ё Мобиль [Электронный ресурс]: [офиц. сайт]. – Электрон. дан. Режим доступа: <http://mobilyo.ru/> , свободный
18. Златин П.А., Кеменов В.А., Ксенович И.П. Электромобили и гибридные автомобили. – М.: Агроконсалт, 2004. – 416 с.
19. Иванов Е.В., Дьячков А.А. Как правильно измерить сопротивление изоляции электроустановок (метод уравновешенного моста)// Новости электротехники . 2008. №4(52), С.38-46.

20. Иванов Е.А., Тюгай СЛ., Золотницкий В.М., Лачин В.И. Дистанционное определение места снижения сопротивления изоляции в сетях постоянного тока, состоящих из последовательно соединенных элементов Промышленная энергетика № 3,1996.
21. Калашников Н.С., Кустов А.Г., Панайотис С.К Перспективные методы контроля сопротивления изоляции разветвленных электрических цепей, Электрофорум Санкт-Петербург, пилотный номер, 2000.-15с.
22. Калиткин Н.Н. Численные методы. Москва: Наука, 1978. 512 с.
23. Карлащук В.И., Карлащук С.В. Электронная лаборатория на IBM PC. Инструментальные средства и моделирование элементов практических схем [Рус] Год выпуска: Москва 2008. Издательство: Солон-Пресс ISBN: 978-5-91359-009-1; -138с.
24. Козловский В.Н. Электротехнический комплекс управления двигателем легкового автомобиля: монография [Текст]/ В.Н. Козловский, В.В. Дебелов – Самара: Издательство АНО «Издательство СНЦ», 2015.-160с.
25. Коломийцев Ю.Н., Новикова А.П.. Мониторинг сопротивления изоляции в двухпроводных системах автономного электроснабжения // Вести в электроэнергетике. 2015г №4 С. 17-25.
26. Контроль и прогнозирование состояния электроэнергетических объектов с дискретно-распределительными параметрами.-Ростов на Дону : Из-во СКВЦ ВШ,2001.-192с.
27. Куликовский К.Л., Купер В.Я. Методы и средства измерений: Учеб. пособие для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1986. - 448 с.
28. Куликовский К.Л., Купер В.Я. Методы и средства измерений: Учеб. пособие для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1986. - 448 с.
29. Лачин В.И. Теория и методы построения устройств контроля и прогнозирования состояния объектов с дискретно-распределенными параметрами: Дис. д.т.н.: 05.13.05 / Ю РГТУ. - Новочеркасск, 2002 г. 304 с. - Библиогр.: с.254 - 279. - Прил.: -280с.

30. Лачин В.И., Седов А.В. Локализация места понижения сопротивления изоляции в электроэнергетических системах постоянного тока. / Изв. вузов. Электромеханика. 1993. №4. с.92-97.
31. Методы электрических измерений / Учебное пособие для вузов/ Под ред. Э.И. Цветкова. JL: Эноргоатомиздат, 1990. - 288 с.
32. Нагайцев М.В. АТС с комбинированными энергоустановками (КЭУ): монография [Текст]/ М.В. Нагайцев, А.А. Эйдинов- Москва: «Типография НАМИ»,2014.-442с.
33. Нагайцев М.В. Электромобили: монография [Текст]/ М.В. Нагайцев, А.А. Эйдинов- Москва: «Типография НАМИ»,2014.-515с.
34. Новикова А.П. Интеллектуальная информационная система диагностики состояния автономных транспортных объектов/А.П. Новикова, В.Н. Козловский, С.В. Петровский//Фундаментальные исследования-№6 (часть 1)2016г.С.73-77.
35. Новикова А.П. Контроль сопротивления изоляции в двухпроводных системах автономного электроснабжения [Текст]/ А.П. Новикова: Тез. Докл. VI Международной молодежной научно-технической конференции «Глазами молодежи»; -Иваново:ИГЭУ, -2015. -т.2 С.471-475.
36. Новикова А.П. Методика определения сопротивления изоляции транспортных средств/ А.П. Новикова, В.Н. Козловский, В.Е. Высоцкий// Электроника и электрооборудование транспорта.- №4-2016г. С.68-79.
37. Новикова А.П. Особенности перспективной системы контроля сопротивления изоляции автономного транспортного средства/ А.П. Новикова, В.Н. Козловский// Грузовик.2016 №3С.46-59.
38. Новикова А.П. Система контроля сопротивления изоляции в двухпроводных системах автономного электроснабжения [Текст] /А.П. Новикова: Тез. Док. XIX Международная научно-практическая конференция «Научное обозрение физико-математических и технических наук В XXI веке», Москва; -2015.- С.32-35.

39. Новикова А.П. Способ измерения контроля сопротивления изоляции автономных объектов с двухпроводной системой питания / Высоцкий В.Е., Новикова А.П.// ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность.2015 №3.С.12-17.
40. Панфилов Д. И., Чепурин И. Н., Миронов В. Н., Обухов С. Г., Шитов В. А., Иванов В. С.: Электротехника и электроника в экспериментах и упражнениях: Практикум на Electronics Workbench: В 2 т. /Под общей ред. Д. И. Панфилова — Т. 2: Электроника. — М.: МЭИ, 2004. - 325 с. - ISBN: 5-7046-0954-6 (изд-е 2-е, перераб и доп. ).
41. Парафенко, Н.И. О создании перспективных моделей экомобилей и организации их серийного производства в украине. Исходные материалы для создания государственной научно–технической программы «Производство малотоннажных грузовых и других перспективных моделей экомобилей»(проект)[http://e-m.org.ua/download/org/program/ua.eko\\_transport\\_program.pdf](http://e-m.org.ua/download/org/program/ua.eko_transport_program.pdf)
42. Пат. 2010247 Российская Федерация, МПК G01R 27/02. Способ определения сопротивления путей утечек тока на землю в электрических системах / Седов А.В., Лачин В.И., Малина А.К.; заявитель и патентообладатель Новочеркасский политехнический университет; заявл. 02.12.1991; опуб.30.03.1994,Бюл.№ 6-4с.
43. Пат. 2101716 Российская Федерация, МПК G01R 27/02 Способ измерения установившегося значения сопротивления изоляции / Серебряков А.С. – Оpub. 10.01.98, Бюл. №3.-3с.
44. Пат. 2175138 Российская Федерация, МПК G01R 27/18. Способ измерения сопротивления изоляции силовой сети электроустановок транспорта под рабочим напряжением и устройство для его реализации. / Башлыков Н.М., Галка В.Л., Ильинский И.Н., Лазаревский Н.А., Лебедев В.С.; заявитель и патентообладатель «ФГУП «ЦНИИСЭТ»»; № 2001101645/28; заявл.02.12.00; опуб.20.10.01.- 4с.

45. Пат. 2230332 Российская Федерация, МПК G01R 27/16. Устройство для измерения электрического сопротивления изоляции./Бородянский М.Е., Бородянский И.М., Банщиков Ю. А., Наумкин В.П., Степаненков М.А., Шляхтин С.А.; заявитель и патентообладатель НКБ «МИУС» ТРТУ; № 2002120988; заявл. 30.07.2002; опуб. 10.06.2004.-3с.
46. Пат. 2279099 Российская Федерация, МПК G01R 27/18. Способ контроля сопротивления изоляции троллейбусов и оценки условий его безопасной эксплуатации./ Малафеев С.И., Серебренников Н.А., Фролкин В.Г.; № 2009109457628/28; заявл. 10.04.2004; опубл.27.06.06, Бюл. № 11. -2с.
47. Пат. 2289142 Российская Федерация, МПК G01R 27/16. Устройство измерения сопротивления изоляции. / Бородянский И. М., Самойлов С.А.; заявитель и патентообладатель ГОУВПО ТРТУ № 2005120839/28; заявл. 04.07.2005; опуб.10.12.2006.-2с.
48. Пат. 2313799 Российская Федерация, МПК G01R 31/02. Способ контроля понижения сопротивления изоляции в линии подачи напряжения питания к нагрузке и устройство для его осуществления./ Толочек С.А., Грудницов Г.М., Замешин А.П.; заявитель и патентообладатель ЗАО «Промышленная группа «Метран»»; № 2006123973/28; заявл. 04.07.2006; опуб. 27.12.07, Бюл. № 36.-4с.
49. Пат. 2348939 Российская Федерация, МПК G01R 27/18. Устройство для измерения электрического сопротивления изоляции. / Бородянский И.М., Бородянский М. Е., Самойлов Л.К., Косторниченко В.Г.; заявитель и патентообладатель ФГОУВПО «Южный Федеральный Университет» №2007136327/28; заявл.01.10.2007; опуб. 10.03.2009, Бюл. № 7.-3с.
50. Пат. 2351940 Российская Федерация, МПК G01R 31/02. Способ автоматического контроля сопротивления изоляции источника постоянного тока на корпус /Ловушкин И.Н., Дубенко В.А., заявитель и патентообладатель ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнева; № 2006132155/28; заявл. 06.09.2006; опубл.10.04.2009, Бюл. № 10. -2с.

51. Пат. 2381513 Российская Федерация, МПК G01R 27/18. Способ определения сопротивлений изоляции присоединений в сети постоянного тока с изолированной нейтралью, устройство для его осуществления и дифференциальный датчик для этого устройства/ Алимов Ю.Н., Галкин И.А.; заявитель и патентообладатель ООО научно-производственное предприятие «Экра». - № 2008129234/28; заявл. 16.07.2008; опуб.10.02.2010 (приоритет от 16.07.2008), Бюл.№2-3с.
52. Пат. 2384855 Российская Федерация, МПК G01R 27/18 Способ измерения сопротивления изоляции в цепях постоянного тока / Романов С.В.; заявитель и патентообладатель Романов С.В.; № 2008150009/28; заявл. 17.12.2008; опуб. 20.03.2010, Бюл. № 10.-5с.
53. Пат. 2390033 Российская Федерация, МПК G01R 27/18. Устройство для контроля сопротивления изоляции электрической сети постоянного тока./ Малафеев С.И., Серебренников Н.А., Анучин А.В.; заявитель и патентообладатель ООО «Компания «Объединенная Энергия»»; № 2009109457128; заявл. 16.03.2009; опубл.20.05.2010, Бюл. № 14. -2с.
54. Пат. 2391679 Российская Федерация, МПК G01R 31/02.Способ определения сопротивлений изоляции присоединений в сети постоянного тока с изолированной нейтралью, устройство для его осуществления и дифференциальный датчик для этого устройства / Ловушкин И.Н., Дубенко В.А.; заявитель и патентообладатель ООО «Информационные спутниковые системы имени академика М.Ф. Решетнева» -№2009103681/28; заявл. 04.02.2009; опуб. 23.01.2006, Бюл. №6-3с.
55. Пат. 2403580 Российская Федерация, МПК G01R 27/18. Устройство измерения и контроля эквивалентного сопротивления изоляции изолированных от земли силовых электрических сетей постоянного тока под рабочим напряжением./ Васин И.М., Калашников Н.С.; заявитель и патентообладатель «ФГУП «ЦНИИСЭТ»» № 2009118054/28; заявл. 12.05.2009; опуб.10.10.10, Бюл №31.-3с.

56. Пат. 2403580 Российская Федерация, МПК G01R 27/18. Устройство измерения и контроля эквивалентного сопротивления изоляции изолированных от земли силовых электрических сетей постоянного тока под рабочим напряжением./ Васин И.М., Калашников Н.С.; заявитель и патентообладатель «ФГУП «ЦНИИСЭТ»» № 2009118054/28; заявл. 12.05.2009; опуб.10.10.10, Бюл №31.-3с.
57. Пат. 2460080 Российская Федерация, МПК G01R 27/18. Устройство измерения и контроля эквивалентного сопротивления изоляции изолированных от земли силовых электрических сетей постоянного тока под рабочим напряжением. / Калашников Н.С., Плазовская Т.Н., Смирнов В.А.; заявитель и патентообладатель ФГУП «УНИИСЭ и Т» № 2011107524/28; завл.25.02.2004; опуб. 27.08.12, Бюл. № 24.-5с.
58. Пат. 2496114 Российская Федерация, МПК G01R 27/18 Способ измерения сопротивления изоляции цепей постоянного тока, находящихся под рабочим напряжением, и устройство для его реализации. / Прищепа В.С., Вербовой В.С.; заявитель и патентообладатель ООО «НПП «ЮГПРОМАВТОМАТИЗАЦИЯ»»; № 2012114525/28; заявл. 12.04.2012; опуб. 20.10.2013, Бюл.№29.-3с.
59. Пат. Patent Number EP 0613018, IPC Classification G01 R 31/02, R15/02, R27/18, publication date: 31.08.1994. Aplicand: Merlin Gerin.
60. Под ред. Бычкова Ю.А. , Золотницкого В..А., Чернышева Э.П. и др. Теоретические основы электротехники. Справочник по теории электрических цепей/– СПб.: Питер, 2008. – 349с.
61. Правила устройства электроустановок (ПУЭ), изд. 7, (п.1.8.37 и таблица 1.8.34). – Москва; 2001 - 2004 г.
62. ПТЭЭП (п.6.1 и таблица 37).-Москва;-2003г.
63. Савина, И.А. Методика библиографического описания [Текст]: практическое пособие / И.А. Савина. - Москва: Либерей- Бибинформ, 2007. – 144 с.

64. Синегубов А.П. Анализ средств контроля сопротивления изоляции электроэнергетических систем постоянного тока // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2015. №1.-61с.
65. Солодовников Г.С. Электробезопасность на судах и под водой.- Ленинград: Судостроение,1971.-208с.
66. Соустин Б.П., Иванчура В.И., Чернышев А.И., Исляев Ш.Н. Системы электропитания космических аппаратов. Новосибирск: ВО “Наука”. Сибирская издательская фирма, 1994.-68с.
67. Теоретические основы электротехники. Справочник по теории электрических цепей/ Под ред. Ю.А. Бычкова, В..А. Золотницкого, Э.П. Чернышева и др. – СПб.: Питер, 2008. – 349с.
68. Харкевич А.А. Борьба с помехами 2-е изд., испр. - Москва: Наука, 1965-275 е., ил.
69. Чернецова Е.А. Лабораторный практикум «Введение в MATLAB» [Текст]/ Е.А. Чернецова. -Санкт-Петербург: РГГМУ,2006.-23с.
70. Черных В. Simulink: среда создания инженерных приложений. М.: Диалог-МИФИ, 2004.-112 с.
71. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB SimPower- Systems Simulink. СПб: ПИТЕР, 2008.-54с.
72. Шакиров М.А. Теоретические основы электротехники. Новые идеи и принципы. Схемоанализ и диакоптика. СПб.: СПбГТУ,2001.212с.
73. Электромобиль: Техника и экономика/ В.А. Щетина, Ю.А. Морговский, Б.И. Центнер,В.А. Богомазов; Под общ. ред. Щетины. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1987. – 253 с.
74. Электронный ресурс]: [офиц. сайт]. – Электрон. дан. Режим доступа: <http://www.uqm.com> ,свободный.
75. Электротехнический справочник. В 4 т. Т.3. Производство, передача и распределение электрической энергии. 8-е изд., исп. и доп.-М.: Изд. МЭИ, 2002.-964 с.

76. [Электронный ресурс]: [офиц. сайт]. – Электрон. дан. Режим доступа: 2012.- №12. <http://technomag.edu.ru/doc/499839.html>, свободный
77. Allied Electric [Электронный ресурс]: [офиц. сайт]. – Электрон. дан. Режим доступа: <http://www.alliedelectric.co.uk/>, свободный
78. Conceptcar.ee [Электронн ресурс]: [открытая энциклопедия]. – Электрон. дан. Режим доступа: <http://www.conceptcar.ee/bmw/clever/index.html>, свободный
79. Fisker Automotive, Inc. [Электронный ресурс]: [офиц. сайт]. – Электрон. дан. Режим доступа <http://www.fiskerautomotive.com/#!/karma/gallery:item=item-1>, свободный
80. <http://www.azure Dynamics.com>, свободный.
81. <http://www.metricmind.com/motor.htm>, свободный
82. <http://www.thinkev.com>, свободный
83. <http://www.its.nntu.ru>docs.com>, свободный
84. <http://www.google.com.gh/patents/EP0751396B1>, свободный
85. <http://www.google.com.gh/patents/DE102013215731A1>, свободный
86. Lau, K., Vaughan, A., Chen, G., Holt, A., Ching, K. On the space charge and DC breakdown behavior of polyethylene/silica nanocomposites. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation (2014):(1), 6740758, pp. 340-351.
87. Lau, K.Y., Vaughan, A.S., Chen, G., Hosier, I.L., Holt, A.F. Absorption current behaviour of polyethylene/silica nanocomposites (2013) Journal of Physics: Conference Series, 472 (1), art. no. 012003. doi: 10.1088/1742-6596/472/1/012003.
88. Modec Limited [Электронный ресурс]: [офиц. сайт]. – Электрон. дан. Режим доступа: <http://www.modeczv.com>, свободный
89. Smith Electric Vehicles [Электронный ресурс]: [офиц. сайт]. – Электрон. дан. Режим доступа: <http://www.smithelectricvehicles.com/index.asp>, свободный.
90. Smolin, V.I., Topol'Skaya, I.G. Amplitude control of the moment of a three-phase asynchronous drive based on generalized energy-flow principles // Russian Electrical Engineering 2014 y.85 (4), pp. 205-209.

91. THINK [Электронный ресурс]: [офиц. сайт]. – Электрон. дан. Режим доступа: свободный.
92. Volvo Truck Corporation [Электронный ресурс]: [офиц. сайт]. – Электрон. дан. Режим доступа: <http://www.volvotrucks.com> , свободный
93. Wikipedia [Электронный ресурс]: [открытая энциклопедия]. – Электрон. дан. Режим доступа: [http://en.wikipedia.org/wiki/General\\_Motors\\_EV1](http://en.wikipedia.org/wiki/General_Motors_EV1), свободный

**СПИСОК АББРЕВИАТУР**

АИК	автоматизированный испытательный комплекс
АЛБ	арифметико-логический блок
АКБ	аккумуляторная батарея
АТО	автономный транспортный объект
АТС	автомобильное транспортное средство
АЦП	аналого-цифровой преобразователь
БА	бортовая аппаратура
БУК	блок управления ключами
БФ	батарея фотоэлектрическая
ЗУ	зарядное устройство
ЗРУ	зарядно-разрядное устройство
ИБС	имитатор батареи солнечной
БСК	бортовые системы контроля
БДС	бортовая диагностическая система
ДВС	двигатель внутреннего сгорания
ДД	диагностика на основе данных
ДКН	диагностические коды неисправностей
ДССА	диагностическая система состояния автомобиля
КАС-П	комплекс автоматики и стабилизации
КПА	контрольно-проверочная аппаратура
КЭУ	комбинированная энергоустановка
ММ	математическое моделирование
МУН	метод узловых напряжений
МЭД	метод эталонного делителя
ММСКРД	метод мостовой схемы с коммутируемым делителем в диагонали
СЗ	система зажигания
ОГ	отработанные газы
РУ	разрядное устройство

СБ	солнечная батарея
СНА	стабилизатор напряжения и автоматика
СЧ ОКР	составная часть ОКР
СЭП	система электропитания
ТАБ	тяговая аккумуляторная батарея
УКИ	устройство контроля изоляции
УК ИБС	устройство коммутации ИБС
УКН	устройство контроля напряжений
ФА	фильтр антистатический
ФНЧ	фильтр низкочастотный
ЦПУ	цифровой пульт управления
ЦВК	цифровой вычислительный комплекс
ЭКЭП	электротехнический комплекс электропитания
ЭМБ	электромобиль
ЭХГ	электрохимический генератор

## Приложения

### Приложение 1

#### АКТ ВНЕДРЕНИЯ

основных результатов научно-исследовательской работы в практику

ПАО «КАМАЗ»

Научным коллективом ФГБОУ ВО «СамГТУ», в составе руководителя Козловского В.Н. и исполнителя Новиковой А.П., разработаны научно-технические материалы включающие:

- математические и имитационные модели позволяющие решать задачи по проектированию электротехнической системы мониторинга сопротивления изоляции шин электропитания, которая предназначена для создания более сложного комплекса электротехнической и электронной диагностики состояния качества эксплуатации перспективного грузового автомобиля с функциями автономного транспортного объекта (беспилотный автомобиль). Модели используются в процессе проектирования системы диагностики качества работы беспилотного автомобиля;
- схемотехническое решение системы мониторинга сопротивления изоляции шин электропитания электротехнического комплекса транспортного объекта с автономными функциями работы, в практике ПАО «КАМАЗ», позволяет решать задачи по соответствующей оценке работоспособности новых проектов автомобилей.

Полученные научно-технические результаты работы по разработке и реализации электротехнической системы мониторинга сопротивления изоляции шин для автономного транспортного объекта подтверждаются соответствующими результатами практической апробации моделей, и стендового образца электротехнической системы, полученными в сертифицированной электротехнической лаборатории контроля качества электроизделий и систем ПАО «КАМАЗ».

Начальник Конструкторского отдела

электрооборудования НТЦ ПАО КАМАЗ  М.Э. Садыков

Директор Департамента качества

ПАО КАМАЗ



 А.А. Абраменко

## Приложение 2

УТВЕРЖДАЮ



Главный конструктор,

начальник отделения 1500

Рясной Н.В.

2016 г.

## АКТ

реализации научных положений и выводов диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук А.П. Новиковой

Научно-техническая комиссия в составе представителей ОАО «РКЦ «Прогресс»:  
 начальника отдела 1501 - С.И. Миненко  
 зам. начальника отдела 1501 – А.С. Гуртова,  
 и представителей ГОУВПО СамГТУ:  
 д.т.н., профессора, зав. кафедрой «Теоретическая и общая электротехника» -  
 В.Н. Козловского,  
 д.т.н., профессора кафедры «Теоретическая и общая электротехника» - В.Е. Высоцкого  
 к.т.н., доцента кафедры «Теоретическая и общая электротехника» - Ю.Н. Коломийцева  
 констатирует, что при разработке системы контроля сопротивления изоляции по шинам электропитания в рамках составной части ОКР 348/14 "Разработка методики и алгоритмов контроля сопротивления изоляции по шинам питания и математическое моделирование" использованы следующие научные результаты и практические рекомендации, представленные в диссертационной работе А.П. Новиковой.

1. Обоснован выбор расчетных схем и разработана методика контроля сопротивления изоляции шин питания относительно корпуса. Доказано, по результатам оценки погрешности при определении сопротивления изоляции шин питания, что данный подход позволяет обеспечить надлежащие метрологические характеристики при условии обеспечения заданных показателей эффективности функционирования.

2. Разработаны имитационные модели функционирования системы контроля сопротивления изоляции по шинам электропитания. Определены соотношения для расчета значений сопротивления изоляции и моделирования с учетом сопротивлений линии.

3. Даны рекомендации по выбору алгоритмов работы систем контроля сопротивления изоляции для аппаратной реализации и испытаний.

Данные моделирования систем контроля сопротивления изоляции для различных вариантов СЭП подтверждают выводы диссертанта о перспективности разработанных методик, схем и алгоритмов и целесообразности их использования для контроля сопротивления изоляции по шинам питания автономных объектов.

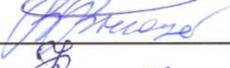
От ОАО «РКЦ «Прогресс»

  
\_\_\_\_\_  
  
\_\_\_\_\_

С.И. Миненко

А.С. Гуртов

От ФГБОУ ВО «Самарский  
государственный технический университет»

  
\_\_\_\_\_  
  
\_\_\_\_\_  
  
\_\_\_\_\_

В.Н. Козловский

В.Е. Высоцкий

Ю.Н. Коломийцев

### Приложение 3

#### Требования к процедуре измерений, обработки результатов и алгоритм оценки значений сопротивлений изоляции

Параметры схем замещения (моделей), расчетные формулы введены в вычислительное устройство заранее.

1. Необходима синхронизация системы измерений напряжений для расчета сопротивления изоляции с другими блоками установки. Критериями возможности измерений являются:
  - отсутствие короткого замыкания в ЭКЭП;
  - установившийся режим токов и напряжений на всем интервале измерений.
2. Выбор алгоритма измерений и расчета производится с учетом режима ЭКЭП и соответствующих моделей (Модель 1, Модель 2, Модель 3.1, Модель 3.2).
3. Расчетные формулы для различных моделей и точки подключения вольтметров различны для разных моделей (конфигураций схем СЭП): для всех вариантов необходимо измерение значений напряжений на плечах эталонного делителя.

#### Детализированный алгоритм оценки значений сопротивлений изоляции

1. Выбор схемы ЭКЭП и параметров системы измерения сопротивления изоляции, подключение необходимых вольтметров
2. ЭКЭП включена – ЕСЛИ ДА, ТО к п.3, ИНАЧЕ – Измерения СТОП
3. *Короткие замыкания отсутствуют – ДА*
4. Сигнал системы синхронизации на возможность выполнения измерений значений напряжений – ДА
5. *Короткие замыкания отсутствуют – ДА*
6. Запуск измерений вольтметрами – ДА
7. *Короткие замыкания отсутствуют – ДА*

8. Проведение измерений значений напряжений первого такта и их регистрация проведены успешно – ДА
9. *Короткие замыкания отсутствуют – ДА*
10. Сигнал системы синхронизации на возможность выполнения измерений значений напряжений – ДА
11. *Короткие замыкания отсутствуют – ДА*
12. Запуск измерений вольтметрами – ДА
13. *Короткие замыкания отсутствуют – ДА*
14. Проведение измерений значений напряжений второго такта и их регистрация проведены успешно – ДА
15. *Короткие замыкания отсутствуют – ДА*
16. Вычисление значений сопротивлений изоляции по формулам для соответствующих моделей:

- для **модели 1** достаточно двух вольтметров для измерения значений напряжений на плечах эталонного делителя;

выражения для вычислений  $G_{из+}$ ,  $G_{из-}$  (а затем  $R_{из+}$ ,  $R_{из-}$ ) имеют следующий вид:

$$G_{из+} = \frac{1 + K_1}{K_2 - K_1} G_{ш} - G,$$

$$G_{из-} = \frac{K_2 + 1}{K_2 - K_1} K_1 G_{ш} - G,$$

где

$$R_{из+} = 1/G_{из+}; R_{из-} = 1/G_{из-};$$

$$K_1 = \frac{U_{11}}{U_{21}}; K_2 = \frac{U_{12}}{U_{22}}; G = G_{\Phi} + G_{\Delta} + G_{\text{В}} + G_{\text{Вкз}};$$

$$G_{\Phi} = 1/R_{\Phi}; G_{\Delta} = 1/R_{\Delta}; G_{\text{В}} = 1/R_{\text{В}}; G_{\text{Вкз}} = 1/R_{\text{Вкз}}.$$

- для **модели 2** дополнительно необходимо измерять значение напряжения на минусовом плече делителя фильтра ФА;

система уравнений для вычисления значений проводимостей изоляций  $G_{из+}$ ,  $G_{из-}$ :

$$G_{из+} - G_{из-} \frac{U_{21}}{U_{11}} = -(G_{\Phi} + G_{III} + G_{+}) + (G_{\Phi} + G_{B\Phi}) \frac{U_{21}}{U_{11}} + G_{-} \frac{U_{21}}{U_{11}},$$

$$G_{из+} - G_{из-} \frac{U_{22}}{U_{12}} = -(G_{\Phi} + G_{+}) + (G_{\Phi} + G_{B\Phi}) \frac{U_{\Phi 22}}{U_{12}} + (G_{III} + G_{-}) \frac{U_{22}}{U_{12}},$$

$$R_{из+} = 1/G_{из+}; R_{из-} = 1/G_{из-}.$$

- для моделей 3.1, 3.2 дополнительно к измерению напряжений на плечах эталонного делителя необходимо измерять значение напряжения  $U_{ст}$ . Если по условиям проведения испытаний невозможно проводить измерения  $U_{ст}$ , то вычисление их значений может проводиться по результатам других измерений;

система уравнений для вычисления значений проводимостей изоляций  $G_{из+}$ ,  $G_{из-}$ :

$$G_{из+} - G_{из-} \frac{U_{21}}{U_{11}} = (G_{\Phi} + G_0) \frac{U_{21}}{U_{11}} - G_{\Phi} \frac{U_{11} + U_{ст}}{U_{11}} - (G_{III} + G_0),$$

$$G_{из+} - G_{из-} \frac{U_{22}}{U_{12}} = (G_{III} + G_{\Phi} + G_0) \frac{U_{22}}{U_{12}} - G_{\Phi} \frac{U_{12} + U_{ст}}{U_{12}} - G_0.$$

17. Вывод в соответствующем формате (Обе линии – «НОРМА», Одна из линий – «Значительное снижение сопротивления линии  $K$ ,  $R_k = XXX$  кОм», «Линия  $K$  – НЕ НОРМА,  $R_k = XXX$  кОм») - ДА

18. Переход к п. 2.

В случае короткого замыкания формируется сигнал на отключение СЭП, для прочих пунктов в случае НЕТ – повтор команды текущего пункта после подтверждения отсутствия коротких замыканий.

При выполнении п. 16 возможны иные варианты действий (например, предусмотренные действия персонала в случае «НЕ НОРМА»).

#### Приложение 4. Элементы для аппаратной реализации системы мониторинга работоспособности ЭКЭП АТО

В качестве переключающих элементов в системе КСИ предлагается использовать герконы. Данные по некоторым модификациям герконов отечественного производства приведены в табл. А.1

Измерительными элементами могут служить аналого-цифровые преобразователи (АЦП) модульного исполнения серии QMBox (крейтовая измерительная система) также отечественного производства (R–Technology). В частности, может быть применен универсальный скоростной 14-битный модуль АЦП USB3000, либо 14-битные АЦП серии QMBox10.

Устройство контроля сопротивления изоляции УКСИ состоит из следующих узлов:

- блока сопряжения;
- ПЭВМ со средствами ввода/вывода информации;
- имитатора цепей питания;
- кабелей связи.

Табл. 1

Тип геркона	ед. изм.	МКА-	МК	МКА -	МКА	МКВ	МКА -	МКА – 50201	МКА - 27601		
		10105	А-10104	36701	- 14101	- 17701	20101				
Условия поставки		АПШ К 685.180.010 ТУ	ОДО 360.013 ТУ	АПШ К 685.180.004 ТУ	АПШ К 685.180.006 ТУ	АПШ К 685.180.009 ТУ	ОДО 360.052 ТУ	АПШК 685.180.001 ТУ	ТУ АПШК 685.190.000		
Размер	м	2,1x10,4 φ	2,3x10,4 φ	5,5x36 φ	2,3x14,2 φ	4,2x18 φ	2,95x20 φ	φ 5,6x30	φ 3,25x28		
Коммут. мощность А, Вт, ВА	~	10 Вт		21 Вт	10 Вт		10 Вт	до 120 Вт	до 1,5 Вт		
	=							до 90 ВА			
Диапазон напряжений	~	5*10 <sup>-2</sup> -/- 36 инд.		6 -/- 5	5*10 <sup>-2</sup> -/- 100		5*10 <sup>-2</sup> -/- 130	12 -/- 250	5*10 <sup>-3</sup> -/- 60		
	=	5*10 <sup>-2</sup> -/- 100 акт.								180	
Количество срабатываний	раз	10 <sup>3</sup> -/- 5*10 <sup>6</sup>		2*10 <sup>4</sup> -/- 1,25*10 <sup>6</sup>	5*10 <sup>6</sup> -/- 10 <sup>8</sup>	200.00 часов	10 <sup>4</sup> -/- 10 <sup>8</sup>	5*10 <sup>3</sup> -/- 10 <sup>8</sup>	1,2*10 <sup>3</sup> -/- 2*10 <sup>6</sup>		
Частота коммутации	Гц	10 -/- 400		20 -/- 50	50 -/- 100		10 -/- 100	3 -/- 25 зав.от.реж.	25		
МДС срабатывания А	р. 0			50...8	15...35		21...42	68...90	80...120		
	р. 0А										
	р. А	10...30								10...25	50...72
	р. Б	10...40								15...35	68...90
	р. В										
	р. С										
	р. АД										
МДС	гп.	0,35...0,95		0,3...0,95	0,35...0,95		0,35...0,9	0,4...0,9	22...58		
	раб.										
Время	гп.	0,3		2	0,4		0,3	1	1		

	раб.	с	0,5	2	1		1	2	3
Эл. прочн. Изоляции	~		110	500	80	160...1	200	500	
	=		150	700	50	220...2	280	700	450
Сопротивление Ом			0,15	0,3	0,15	0,15	0,5	0,15	0,2

## ПРИЛОЖЕНИЕ 5

Результаты расчетов значений сопротивлений изоляции. Табл. .1

$R_{из+}$	$R_{из-}$	$R_H$	$k$	$\alpha$								
1000	100	0,001	0,0001	0,00								
$U_{11}$	$U_{21}$	$K_1$	$U_{12}$	$U_{22}$	$K_2$	$R_{из+}$	$\delta R_{из+}$	$R_{из-}$	$\delta R_{из-}$	$G_{из+}$	$G_{из-}$	
4,9500033	25,049847	0,1976061	27,037743	2,9621071	9,1278748	999,999	0,00%	100,000	0,00%	0,001000	0,010000	
$R_{из+}$	$R_{из-}$	$R_H$	$k$	$\alpha$								
1000	100	0,001	0,03	0,10								
$U_{11}$	$U_{21}$	$K_1$	$U_{12}$	$U_{22}$	$K_2$	$R_{из+}$	$\delta R_{из+}$	$R_{из-}$	$\delta R_{из-}$	$G_{из+}$	$G_{из-}$	
4,937415	25,020191	0,1973372	26,994053	2,9635541	9,1086754	975,161	-2,48%	100,255	0,26%	0,001025	0,009975	
$R_{из+}$	$R_{из-}$	$R_H$	$k$	$\alpha$								
1000	100	0,001	0,03	0,50								
$U_{11}$	$U_{21}$	$K_1$	$U_{12}$	$U_{22}$	$K_2$	$R_{из+}$	$\delta R_{из+}$	$R_{из-}$	$\delta R_{из-}$	$G_{из+}$	$G_{из-}$	
4,9149419	25,042664	0,1962627	26,97158	2,9860269	9,0325976	887,029	-11,30%	101,290	1,29%	0,001127	0,009873	
$R_{из+}$	$R_{из-}$	$R_H$	$k$	$\alpha$								
1000	10	0,001	0,03	0,50								
$U_{11}$	$U_{21}$	$K_1$	$U_{12}$	$U_{22}$	$K_2$	$R_{из+}$	$\delta R_{из+}$	$R_{из-}$	$\delta R_{из-}$	$G_{из+}$	$G_{из-}$	
14,726612	15,230993	0,9668846	27,992691	1,9649157	14,246255	416,503	-58,35%	10,142	1,42%	0,002401	0,098599	

Оценки влияния округления значений напряжений  $U_1, U_2$  на значения сопротивлений изоляции. Табл. .2

$R_{из+}$	$R_{из-}$	$R_H$	$k$	$\alpha$
1000	100	0,001	0,03	0,10

	$U_{11}$	$U_{21}$	$K_1$	$U_{12}$	$U_{22}$	$K_2$	$R_{из+}$	$\delta R_{из+}$	$R_{из-}$	$\delta R_{из-}$
5 зн.ц.	4,937415	25,020191	0,1973372	26,994053	2,9635541	9,1086754	975,161	-2,48%	100,255	0,26%
4 зн.ц.	4,937	25,020	0,197322	26,994	2,964	9,107287	973,357	-2,66%	100,269	0,27%
4 зн.ц.	4,94	25,02	0,197442	26,99	2,96	9,118243	987,758	-1,22%	100,162	0,16%

$R_{из+}$	$R_{из-}$	$R_H$	$k$	$\alpha$
1000	100	0,001	0,03	0,50

	$U_{11}$	$U_{21}$	$K_1$	$U_{12}$	$U_{22}$	$K_2$	$R_{из+}$	$\delta R_{из+}$	$R_{из-}$	$\delta R_{из-}$
5 зн.ц.	4,9149419	25,042664	0,1962627	26,97158	2,9860269	9,0325976	887,029	-11,30%	101,290	1,29%
4 зн.ц.	4,915	25,043	0,196262	26,972	2,986	9,032820	887,301	-11,27%	101,291	1,29%
4 зн.ц.	4,91	25,04	0,1960863	26,97	2,99	9,020067	873,887	-12,61%	101,462	1,46%

$R_{из+}$	$R_{из-}$	$R_H$	$k$	$\alpha$
1000	10	0,001	0,03	0,50

	$U_{11}$	$U_{21}$	$K_1$	$U_{12}$	$U_{22}$	$K_2$	$R_{из+}$	$\delta R_{из+}$	$R_{из-}$	$\delta R_{из-}$
5 зн.ц.	14,726612	15,230993	0,9668846	27,992691	1,9649157	14,246255	416,503	-58,35%	10,142	1,42%
4 зн.ц.	14,727	15,231	0,966910	27,993	1,965	14,245802	416,378	-58,36%	10,142	1,42%
4 зн.ц.	14,73	15,23	0,9671701	27,99	1,97	14,208122	408,818	-59,12%	10,134	1,34%

Результаты контрольных расчетов при вариации  $E_{БС}$ . Табл. Б.3

$R_{из+}$	$R_{из-}$	$R_H$	$k$	$\alpha$	$E_{АБ}$	$r_{АБ}$	$E_{БС}$	$r_{БС}$
1000	1000	0,001	0,001	0,00	30,0	0,0000001	1,0	0,001

$U_{11}$	$U_{21}$	$K_1$	$U_{12}$	$U_{22}$	$K_2$	$R_{из+}$	$\delta R_{из+}$	$R_{из-}$	$\delta R_{из-}$	$G_{из+}$	$G_{из-}$
6,75789	23,23911	0,29080	27,18912	2,80789	9,68311	999,837	-0,02%	999,919	-0,01%	0,001000	0,001000

$R_{из+}$	$R_{из-}$	$R_H$	$k$	$\alpha$	$E_{АБ}$	$r_{АБ}$	$E_{БС}$	$r_{БС}$
1000	1000	0,001	0,001	0,00	30,0	0,0000001	10,0	0,01

$U_{11}$	$U_{21}$	$K_1$	$U_{12}$	$U_{22}$	$K_2$	$R_{из+}$	$\delta R_{из+}$	$R_{из-}$	$\delta R_{из-}$	$G_{из+}$	$G_{из-}$
6,14480	23,85220	0,25762	26,57617	3,42084	7,76890	999,566	-0,04%	1000,299	0,03%	0,001000	0,001000

$R_{из+}$	$R_{из-}$	$R_H$	$k$	$\alpha$	$E_{АБ}$	$r_{АБ}$	$E_{БС}$	$r_{БС}$
1000	1000	0,001	0,001	0,00	30,0	0,0000001	60,0	0,01

$U_{11}$	$U_{21}$	$K_1$	$U_{12}$	$U_{22}$	$K_2$	$R_{из+}$	$\delta R_{из+}$	$R_{из-}$	$\delta R_{из-}$	$G_{из+}$	$G_{из-}$
2,73957	27,25743	0,10051	23,17094	6,82606	3,39448	997,930	-0,21%	1001,975	0,20%	0,001002	0,000998

Результаты вычислений значений сопротивлений в табличном процессоре по формулам (11.4)

при различных значениях сопротивлений изоляции. *Табл.Б.4*

$R_{из+}$	$R_{из-}$	$R_H$	$k$	$\alpha$	$E_{AB}$	$\Gamma_{AB}$	$E_{BC}$	$\Gamma_{BC}$
1000	1000	0,001	0,03	0,20	30,0	0,000003	60,0	0,001

$U_{11}$	$U_{21}$	$K_1$	$U_{12}$	$U_{22}$	$K_2$	$R_{из+}$	$\delta R_{из+}$	$R_{из-}$	$\delta R_{из+}$
6,26025	23,65509	0,26465	29,07044	0,84489	34,40718	1000,000	0,00%	1000,000	0,00%

а)

$R_{из+}$	$R_{из-}$	$R_H$	$k$	$\alpha$	$E_{AB}$	$\Gamma_{AB}$	$E_{BC}$	$\Gamma_{BC}$
500	1000	0,001	0,03	0,20	30,0	0,000003	60,0	0,001

$U_{11}$	$U_{21}$	$K_1$	$U_{12}$	$U_{22}$	$K_2$	$R_{из+}$	$\delta R_{из+}$	$R_{из-}$	$\delta R_{из+}$
6,21415	23,70118	0,26219	28,85174	1,06360	27,12661	501,419	0,28%	994,372	-0,56%

б)

$R_{из+}$	$R_{из-}$	$R_H$	$k$	$\alpha$	$E_{AB}$	$\Gamma_{AB}$	$E_{BC}$	$\Gamma_{BC}$
100	1000	0,001	0,03	0,20	30,0	0,000003	60,0	0,001

$U_{11}$	$U_{21}$	$K_1$	$U_{12}$	$U_{22}$	$K_2$	$R_{из+}$	$\delta R_{из+}$	$R_{из-}$	$\delta R_{из+}$
5,86910	24,04623	0,24408	27,21449	2,70085	10,07628	100,512	0,51%	951,526	-4,85%

в)

$R_{из+}$	$R_{из-}$	$R_H$	$k$	$\alpha$	$E_{AB}$	$\Gamma_{AB}$	$E_{BC}$	$\Gamma_{BC}$
50	1000	0,001	0,03	0,20	30,0	0,000003	60,0	0,001

$U_{11}$	$U_{21}$	$K_1$	$U_{12}$	$U_{22}$	$K_2$	$R_{из+}$	$\delta R_{из+}$	$R_{из-}$	$\delta R_{из+}$
5,48950	24,42584	0,22474	25,41326	4,50207	5,64480	50,270	0,54%	902,896	-9,71%

г)

Продолжение табл. Б.4

$R_{из+}$	$R_{из-}$	$R_H$	$k$	$\alpha$	$E_{AB}$	$r_{AB}$	$E_{BC}$	$r_{BC}$
10	1000	0,001	0,03	0,20	30,0	0,000003	60,0	0,001

$U_{11}$	$U_{21}$	$K_1$	$U_{12}$	$U_{22}$	$K_2$	$R_{из+}$	$\delta R_{из+}$	$R_{из-}$	$\delta R_{из+}$
3,64020	26,27513	0,13854	16,63845	13,27688	1,25319	10,056	0,56%	640,871	-35,91%

д)

$R_{из+}$	$R_{из-}$	$R_H$	$k$	$\alpha$	$E_{AB}$	$r_{AB}$	$E_{BC}$	$r_{BC}$
1000	100	0,001	0,03	0,20	30,0	0,000003	60,0	0,001

$U_{11}$	$U_{21}$	$K_1$	$U_{12}$	$U_{22}$	$K_2$	$R_{из+}$	$\delta R_{из+}$	$R_{из-}$	$\delta R_{из+}$
7,76844	22,14689	0,35077	29,11382	0,80151	36,32364	951,526	-4,85%	100,512	0,51%

е)

Результаты расчетов при различных сочетаниях параметров схемы. Табл.Б.5

$R_{из+}$	$R_{из-}$	$R_H$	$k$	$\alpha$	$E_{AB}$	$r_{AB}$	$E_{BC}$	$r_{BC}$
1000	1000	0,001	0,03	0,01	30,0	0,000003	10,0	0,01

$U_{11}$	$U_{21}$	$K_1$	$U_{12}$	$U_{22}$	$K_2$	$R_{из+}$	$\delta R_{из+}$	$R_{из-}$	$\delta R_{из-}$	$G_{из+}$	$G_{из-}$
6,12622	23,78912	0,25752	26,50197	3,41336	7,76419	990,654	-0,93%	1009,523	0,95%	0,001009	0,000991

a)

$R_{из+}$	$R_{из-}$	$R_H$	$k$	$\alpha$	$E_{AB}$	$r_{AB}$	$E_{BC}$	$r_{BC}$
1000	100	0,001	0,03	0,01	30,0	0,000003	10,0	0,01

$U_{11}$	$U_{21}$	$K_1$	$U_{12}$	$U_{22}$	$K_2$	$R_{из+}$	$\delta R_{из+}$	$R_{из-}$	$\delta R_{из-}$	$G_{из+}$	$G_{из-}$
7,49978	22,41555	0,33458	26,69864	3,21670	8,30002	988,161	-1,18%	100,120	0,12%	0,001012	0,009988

б)

$R_{из+}$	$R_{из-}$	$R_H$	$k$	$\alpha$	$E_{AB}$	$r_{AB}$	$E_{BC}$	$r_{BC}$
1000	10	0,001	0,03	0,01	30,0	0,000003	10,0	0,01

$U_{11}$	$U_{21}$	$K_1$	$U_{12}$	$U_{22}$	$K_2$	$R_{из+}$	$\delta R_{из+}$	$R_{из-}$	$\delta R_{из-}$	$G_{из+}$	$G_{из-}$
15,70355	14,21178	1,10497	27,87325	2,04209	13,64940	963,900	-3,61%	10,004	0,04%	0,001037	0,099963

в)

$R_{из+}$	$R_{из-}$	$R_H$	$k$	$\alpha$	$E_{AB}$	$r_{AB}$	$E_{BC}$	$r_{BC}$
1000	10	0,001	0,03	0,01	30,0	0,000003	60,0	0,01

$U_{11}$	$U_{21}$	$K_1$	$U_{12}$	$U_{22}$	$K_2$	$R_{из+}$	$\delta R_{из+}$	$R_{из-}$	$\delta R_{из-}$	$G_{из+}$	$G_{из-}$
13,66973	16,24560	0,84144	25,83943	4,07591	6,33956	921,984	-7,80%	10,008	0,08%	0,001085	0,099915

Продолжение табл. Б.5.

$R_{из+}$	$R_{из-}$	$R_H$	$k$	$\alpha$	$E_{AB}$	$r_{AB}$	$E_{BC}$	$r_{BC}$
1000	10	0,001	0,03	0,50	30,0	0,000003	60,0	0,01

$U_{11}$	$U_{21}$	$K_1$	$U_{12}$	$U_{22}$	$K_2$	$R_{из+}$	$\delta R_{из+}$	$R_{из-}$	$\delta R_{из-}$	$G_{из+}$	$G_{из-}$
13,50264	16,41269	0,82270	25,67234	4,24299	6,05053	406,911	<b>-59,31%</b>	10,148	<b>1,48%</b>	0,002458	0,098542

Г)

$R_{из+}$	$R_{из-}$	$R_H$	$k$	$\alpha$	$E_{AB}$	$r_{AB}$	$E_{BC}$	$r_{BC}$
1000	10	0,001	0,03	0,50	30,0	0,000003	10,0	0,01

$U_{11}$	$U_{21}$	$K_1$	$U_{12}$	$U_{22}$	$K_2$	$R_{из+}$	$\delta R_{из+}$	$R_{из-}$	$\delta R_{из-}$	$G_{из+}$	$G_{из-}$
15,53646	14,37887	1,08051	27,70617	2,20917	12,54145	414,873	<b>-58,51%</b>	10,143	<b>1,43%</b>	0,002410	0,098589

Д)

$R_{из+}$	$R_{из-}$	$R_H$	$k$	$\alpha$	$E_{AB}$	$r_{AB}$	$E_{BC}$	$r_{BC}$
10	1000	0,001	0,03	0,50	30,0	0,000003	10,0	0,01

$U_{11}$	$U_{21}$	$K_1$	$U_{12}$	$U_{22}$	$K_2$	$R_{из+}$	$\delta R_{из+}$	$R_{из-}$	$\delta R_{из-}$	$G_{из+}$	$G_{из-}$
3,82946	26,08587	0,14680	15,99916	13,91617	1,14968	10,141	<b>1,41%</b>	418,146	<b>-58,19%</b>	0,098608	0,002392

е)

Результаты проверки корректности вычислений. Табл.Б.6

1) Проверка симметрии уравнений:  $R_{из+}=R_{из-}$ ,  $U_{зу}=0$ ,  $U_{ст}=0$

$S_{+}=1$	$U_{11}$	$U_{21}$	$U_{БС}$	$S_{+}=0$	$U_{12}$	$U_{22}$	$U_{БС}$
$S_{-}=0$	3,450	26,491	29,940	$S_{-}=1$	26,491	3,450	29,940

2) Установка режима заряда БА и номинала  $U_H$

$S_{+}=1$	$U_{зу}$	$U_{ст}$	$I_{БС}$	$I_{БА(>0-разряд)}$	$U_H$	$U_{БС}$	$U_{11}$	$U_{21}$
$S_{-}=0$	-8,000	9,000	17,985	-4,970	30,982	22,015	0,807	12,208
$S_{+}=0$	$U_{зу}$	$U_{ст}$	$I_{БС}$	$I_{БА(>0-разряд)}$	$U_H$	$U_{БС}$	$U_{12}$	$U_{22}$
$S_{-}=1$	-8,000	9,000	17,985	-4,970	30,982	22,015	10,823	2,192

3) Решение СЛАУ относительно  $G_{из+}$ ,  $G_{из-}$ ; расчет  $R_{из+}$ ,  $R_{из-}$

1,0000	-10,9500	-0,0099				
1,0000	-0,1720	0,0008				
						<b>Задано</b>
-0,0160	1,0160	0,0010	<b>Гиз+</b>	1000,0000	$R_{из+}$	1000,0000
-0,0928	0,0928	0,0010	<b>Гиз-</b>	1000,0000	$R_{из-}$	1000,0000

1,0000	-16,2452	-0,0062				
1,0000	-0,2858	0,0097				
-0,0179	1,0179	0,0100	<b>Гиз+</b>	100,0000	$R_{из+}$	100,0000
-0,0627	0,0627	0,0010	<b>Гиз-</b>	1000,0000	$R_{из-}$	1000,0000

1,0000	-20,0543	0,0799				
1,0000	-1,0649	0,0989				
-0,0561	1,0561	0,1000	<b>Гиз+</b>	10,0000	$R_{из+}$	10,0000
-0,0527	0,0527	0,0010	<b>Гиз-</b>	1000,0000	$R_{из-}$	1000,0000

1,0000	-1,0837	-0,1074				
1,0000	-0,0909	-0,0081				
-0,0915	1,0915	0,0010	<b>Гиз+</b>	1000,0000	$R_{из+}$	1000,0000
-1,0072	1,0072	0,1000	<b>Гиз-</b>	10,0000	$R_{из-}$	10,0000

Примеры расчета параметров схемы и сопротивлений изоляции. Табл.Б.7

1) Проверка симметрии уравнений:  $R_{из+}=R_{из-}$ ,  $U_{зу}=0$ ,  $U_{ст}=0$

$R_{\phi}$	$R_{д}$	$R_{в}$	$R_{ш}$	$R_{вкз}$	$R_{из+}$	$R_{из-}$	$R_{н}$	$k$	$r_{л}$	$\alpha$	$1-\alpha$
100	640	830	10	830	1000	1000	0,001	0,00003	0,00000003	0,50	0,50
$G_{\phi}$	$G_{д}$	$G_{в}$	$G_{ш}$	$G_{вкз}$	$G_{из+}$	$G_{из-}$	$G_{н}$		$g_{л}$	$\alpha^{-1}$	$(1-\alpha)^{-1}$
0,0100	0,0016	0,0012	0,1000	0,0012	0,0010	0,0010	1000		33333333,33	2	2,00000

$E_{БА}$	$r_{БА}$	$E_{БС}$	$r_{БС}$	$U_{зу}$	$U_{ст}$	$I_{БС}$	$I_{БА(>0\text{-разряд})}$	$U_{БС}$	$U_{БА}$	$U_{н}$	$I_{н}$	$U_{л}$
30,000	0,000000003	50,000	0,01	0,000	0,000	0,000	0,000	50,000	30,000	0,000	0,000	0,000
$J_{БА}$	$g_{БА}$	$J_{БС}$	$g_{БС}$	$G_0$	$R_{1ш+}$	$R_{1ш-}$	$I_{11}, MA$	$I_{21}, MA$				
1E+09	33333333,3	5000	100	0,003972139								

$S_{+}=1$	$U_{11}$	$U_{21}$	$U_{БС}$
$S_{-}=0$	3,457	26,543	34,000

$S_{+}=0$	$U_{12}$	$U_{22}$	$U_{БС}$
$S_{-}=1$	26,543	3,457	34,000

1000,0000	$R_{из+}$
1000,0000	$R_{из-}$

a)

2.1) Установка режима заряда БА и номинала  $U_H$

$R_{из+}=1000$   $R_{из-}=100$

$R_{\phi}$	$R_d$	$R_B$	$R_{ш}$	$R_{ВКЗ}$	$R_{из+}$	$R_{из-}$	$R_H$	$k$	$r_{л}$	$\alpha$	$1-\alpha$
100	640	830	10	830	1000	100	0,001	0,03	0,00003	0,50	0,50
$G_{\phi}$	$G_d$	$G_B$	$G_{ш}$	$G_{ВКЗ}$	$G_{из+}$	$G_{из-}$	$G_H$		$g_{л}$	$\alpha^{-1}$	$(1-\alpha)^{-1}$
0,0100	0,0016	0,0012	0,1000	0,0012	0,0010	0,0100	1000		33333,33333	2	2,00000

$E_{БА}$	$r_{БА}$	$E_{БС}$	$r_{БС}$	$U_{зУ}$	$U_{ст}$	$I_{БС}$	$I_{БА(>0-разряд)}$	$U_{БС}$	$U_{БА}$	$U_H$	$I_H$	$U_{л}$
30,000	0,00003	60,000	0,0006	4,000	2,000	0,000	0,000	60,000	30,000	30,534	30,534	0,916
						50000						
$J_{БА}$	$g_{БА}$	$J_{БС}$	$g_{БС}$	$G_0$								
1000000	33333,3333	100000	1666,66667	0,003972139								

2.2) Решение СЛАУ относительно  $G_{из+}$ ,  $G_{из-}$ ; расчет  $R_{из+}$ ,  $R_{из-}$

$S_+=1$	$U_{11}$	$U_{21}$	$U_{БС}$
$S_-=0$	5,410	26,955	34,366

$S_+=0$	$U_{12}$	$U_{22}$	$U_{БС}$
$S_-=1$	28,704	3,661	34,366

887,0293902	$R_{из+}$
101,2900334	$R_{из-}$

б)

3.1) Установка режима заряда БА и номинала  $U_H$   
 $R_{из+}=100$   $R_{из-}=1000$

$R_\phi$	$R_d$	$R_B$	$R_\omega$	$R_{вкз}$	$R_{из+}$	$R_{из-}$	$R_H$	$k$	$r_\Gamma$	$\alpha$	$1-\alpha$
100	640	830	10	830	100	1000	0,001	0,03	0,00003	0,50	0,50
$G_\phi$	$G_d$	$G_B$	$G_\omega$	$G_{вкз}$	$G_{из+}$	$G_{из-}$	$G_H$		$g_\Gamma$	$\alpha^{-1}$	$(1-\alpha)^{-1}$
0,0100	0,0016	0,0012	0,1000	0,0012	0,0100	0,0010	1000		33333,33333	2	2,00000

$E_{БА}$	$r_{БА}$	$E_{БС}$	$r_{БС}$	$U_{зy}$	$U_{ст}$	$I_{БС}$	$I_{БА(>0-разряд)}$	$U_{БС}$	$U_{БА}$	$U_H$	$I_H$	$U_\Gamma$
30,000	0,00003	60,000	0,0006	4,000	2,000	42,724	-12,190	34,366	30,366	30,534	30,534	0,916
						50000						
$J_{БА}$	$g_{БА}$	$J_{БС}$	$g_{БС}$	$G_0$								
1000000	33333,3333	100000	1666,66667	0,003972139								

3.2) Решение СЛАУ относительно  $G_{из+}$ ,  $G_{из-}$ ; расчет  $R_{из+}$ ,  $R_{из-}$

$S_+=1$	$U_{11}$	$U_{21}$	$U_{БС}$
$S_-=0$	3,373	28,992	34,366

$S_+=0$	$U_{12}$	$U_{22}$	$U_{БС}$
$S_-=1$	26,667	5,698	34,366

101,2900333	$R_{из+}$
887,02939	$R_{из-}$

в)

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

Приложение В.1. Форматы ввода исходных данных Матрицы контурных сопротивлений и узловых проводимостей к расчетам моделей 1 – 3. **Матрицы контурных сопротивлений имеют следующий вид:**

$$\left( \begin{array}{cccccc}
 r_E + R_+ + R_- & -R_+ & -R_- & 0 & 0 & 0 \\
 -R_+ & R_+ + \alpha r_{\text{л}} + R_{\text{из}+} & 0 & -R_{\text{из}+} & 0 & 0 \\
 -R_- & 0 & R_- & 0 & -R_{\text{из}-} & 0 \\
 & & +\alpha r_{\text{л}} + R_{\text{из}-} & & & \\
 0 & -R_{\text{из}+} & 0 & R_{\text{из}+} + (1-\alpha)r_{\text{л}} + R_{\text{вкз}} & 0 & -R_{\text{вкз}} \\
 0 & 0 & -R_{\text{из}-} & 0 & R_{\text{из}-} + (1-\alpha)r_{\text{л}} + R_{\text{вкз}} & -R_{\text{вкз}} \\
 0 & 0 & 0 & -R_{\text{вкз}} & -R_{\text{вкз}} & R_{\text{вкз}} + R_{\text{вкз}} + R_{\text{н}}
 \end{array} \right)$$

Препроцессорная обработка данных: для  $S_+ = 1, S_- = 0, R_+ = R_{\Phi} || R_{\text{ш}} || R_{\text{д}} || R_{\text{в}}, R_- = R_{\Phi} || R_{\text{д}} || R_{\text{в}};$   
 для  $S_+ = 0, S_- = 1, R_+ = R_{\Phi} || R_{\text{д}} || R_{\text{в}}, R_- = R_{\Phi} || R_{\text{ш}} || R_{\text{д}} || R_{\text{в}}.$

К системе уравнений (). Матрицы узловых проводимостей для  $S_+ = 1, S_- = 0$

$$\begin{pmatrix}
 (G_\Phi + G_{B\Phi}) + g_{BC} & -g_{BC} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 -g_{BC} & G_\Phi + G_D + G_B + G_{III} + g_{BA} + g_{BC} + 1/\alpha_{rL} & -g_{BA} & 0 & -1/\square r_L & 0 & 0 & 0 \\
 0 & -g_{BA} & G_D + G_B + g_{BA} + 1/\alpha_{rL} & -1/\alpha_{rL} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & -1/\alpha_{rL} & 1/\alpha_{rL} + 1/(1 - \alpha_{rL} + G_{III}) & 0 & -1/(1 - \alpha_{rL}) & 0 & 0 \\
 0 & -1/\square r_L & 0 & 0 & 1/\alpha_{rL} + 1/(1 - \alpha_{rL} + G_{III}) & 0 & 0 & -1/(1 - \alpha_{rL}) \\
 0 & 0 & 0 & -1/(1 - \alpha_{rL}) & 0 & 1/(1 - \alpha_{rL} + G_{B\kappa 3}) + G_H & -G_H & -G_H \\
 0 & 0 & 0 & 0 & -1/(1 - \alpha_{rL}) & -G_H & -G_H & 1/(1 - \alpha_{rL} + G_{B\kappa 3}) + G_H
 \end{pmatrix}$$

- для  $S_+ = 0, S_- = 1$

$$\begin{pmatrix}
 (G_{\Phi} + G_{\text{ВФ}}) + g_{\text{БС}} & -g_{\text{БС}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 -g_{\text{БС}} & G_{\Phi} + G_{\text{Д}} + G_{\text{В}} + g_{\text{БА}} + g_{\text{БС}} + 1/\alpha_{\text{Л}} & -g_{\text{БА}} & 0 & -1/\alpha_{\text{Л}} & 0 & 0 & 0 \\
 0 & -g_{\text{БА}} & G_{\text{Ш}} + G_{\text{Д}} + G_{\text{В}} + g_{\text{БА}} + 1/\alpha_{\text{Л}} & -1/\alpha_{\text{Л}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & -1/\alpha_{\text{Л}} & 1/\alpha_{\text{Л}} + 1/(1 - \alpha_{\text{Л}} + G_{\text{ИЗ}}) & 0 & -1/(1 - \alpha_{\text{Л}}) & 0 & 0 \\
 0 & -1/\square r_{\text{Л}} & 0 & 0 & 1/\alpha_{\text{Л}} + 1/(1 - \alpha_{\text{Л}} + G_{\text{ИЗ}}) & 0 & 0 & -1/(1 - \alpha_{\text{Л}}) \\
 0 & 0 & 0 & -1/(1 - \alpha_{\text{Л}}) & 0 & 1/(1 - \alpha_{\text{Л}} + G_{\text{БКС}} + G_{\text{Н}}) & -G_{\text{Н}} & -G_{\text{Н}} \\
 0 & 0 & 0 & 0 & -1/(1 - \square r_{\text{Л}}) & -G_{\text{Н}} & -G_{\text{Н}} & 1/(1 - \alpha_{\text{Л}} + G_{\text{БКС}} + G_{\text{Н}})
 \end{pmatrix}$$

К системе уравнений (). Матрицы контурных сопротивлений:

- для  $S_+ = 1, S_- = 0$

$$\begin{pmatrix} r_{БС}+r_{БА} & -r_{БА} & 0 & 0 & 0 \\ -r_{БА} & 2R_{\Phi}+ & -R_{\Phi} & -R_{\Phi} & 0 \\ & r_{БА} & & & \\ 0 & -R_{\Phi} & R_{\Phi}+r_{11} & 0 & -r_{11} \\ 0 & -R_{\Phi} & 0 & R_{\Phi}+r_{21} & -r_{21} \\ 0 & 0 & -r_{11} & -r_{21} & r_{11}+R_{H.}+r_{21} \end{pmatrix}$$

- для  $S_- = 1, S_+ = 0$

$$\begin{pmatrix} r_{БС}+r_{БА} & -r_{БА} & 0 & 0 & 0 \\ -r_{БА} & 2R_{\Phi}+ & -R_{\Phi} & -R_{\Phi} & 0 \\ & r_{БА} & & & \\ 0 & -R_{\Phi} & R_{\Phi}+r_{12} & 0 & -r_{12} \\ 0 & -R_{\Phi} & 0 & R_{\Phi}+r_{22} & -r_{22} \\ 0 & 0 & -r_{12} & -r_{22} & r_{12}+R_{H.}+r_{22} \end{pmatrix}$$

Препроцессорная обработка данных:  $r_{11} = R_{Ш} || R_{Д} || R_{В} || R_{Вкз} || R_{ИЗ+}; r_{21} = R_{Д} || R_{В} || R_{Вкз} || R_{ИЗ+};$

$r_{12} = R_{Д} || R_{В} || R_{Вкз} || R_{ИЗ+}; r_{22} = R_{Ш} || R_{Д} || R_{В} || R_{Вкз} || R_{ИЗ+}$

К системе уравнений (4.9). Матрицы контурных сопротивлений.

Для  $S_+ = 1, S_- = 0$

$$\begin{pmatrix}
 r_{БС}+r_{БА} & -r_{БА} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 -r_{БА} & R_{\Phi}+r_{БА}+r_{21} & -R_{\Phi} & 0 & -r_{21} \text{ (12)} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & -R_{\Phi} & R_{\Phi}+r_{11} & -r_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & -r_{11} & r_{11}+\alpha r_{л}+R_{ИЗ+} & 0 & -R_{ИЗ+} & 0 & 0 & 0 \\
 0 & -r_{21} & 0 & 0 & r_{21}+\alpha r_{л}+R_{ИЗ-} & 0 & -R_{ИЗ-} & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & -R_{ИЗ+} & 0 & (1-\alpha)r_{л}+R_{ИЗ+}+R_{ВКЗ} & 0 & -R_{ВКЗ} & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & -R_{ИЗ-} & 0 & (1-\alpha)r_{л}+R_{ИЗ-}+R_{ВКЗ} & -R_{ВКЗ} & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -R_{ВКЗ} & -R_{ВКЗ} & R_{ВКЗ} \\
 & & & & & & & & +R_{И+}+R_{ВКЗ}
 \end{pmatrix}$$

Препроцессорная обработка данных:  $r_{11} = R_{Ш} || R_{Д} || R_{В}$ ;  $r_{21} = r_{12} = R_{\Phi} || R_{Д} || R_{В}$ .



К системе уравнений (4.12). Матрицы узловых проводимостей имеют следующий вид.

Для  $S_+ = 1, S_- = 0$

$$\begin{pmatrix}
 G_{\Phi} + g_{BC} & -g_{BC} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 -g_{BC} & G_{\Phi} + g_{BC} + g_{BA} + G_0 + 1/\alpha r_{Л} & -g_{BA} & 0 & -1/\alpha r_{Л} & 0 & 0 & 0 \\
 0 & -g_{BA} & G_{Д} + 1/\alpha r_{Л} + G_0 + G_{Ш} & -1/\alpha r_{Л} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & -1/\alpha r_{Л} & 1/\alpha r_{Л} + 1/(1-\alpha)r_{Л+} + G_{из+} & 0 & -1/(1-\alpha)r_{Л} & 0 & 0 \\
 0 & -1/\alpha r_{Л} & 0 & 0 & 1/\alpha r_{Л} + 1/(1-\alpha)r_{Л+} + G_{из-} & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & -1/(1-\alpha)r_{Л} & 0 & 1/(1-\alpha)r_{Л+} + G_{Вкз} + G_{Н} & -G_{Н} \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -G_{Н} & 1/(1-\alpha)r_{Л+} + G_{Вкз+} + G_{Н}
 \end{pmatrix}$$

Препроцессорная обработка данных:  $G_0 = G_{Д} + G_{В}$ .

Для  $S_- = 1, S_+ = 0$

$$\begin{pmatrix}
 G_\Phi + g_{BC} & -g_{BC} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 -g_{BC} & G_\Phi + g_{BC} + g_{BA} + G_0 + G_{III} & -g_{BA} & 0 & -1/\alpha r_L & 0 & 0 & 0 \\
 0 & +1/\alpha r_L & -g_{BA} & G_D + 1/\alpha r_L + G_0 & -1/\alpha r_L & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & -1/\alpha r_L & 1/\alpha r_L + 1/(1-\alpha)r_{L+} + G_{из+} & 0 & 0 & -1/(1-\alpha)r_L & 0 \\
 0 & -1/\alpha r_L & 0 & 0 & 1/\alpha r_L + 1/(1-\alpha)r_{L+} + G_{из-} & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & -1/(1-\alpha)r_L & 0 & 1/(1-\alpha)r_{L+} & +G_{BK3} + G_H & -G_H \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -G_H & 1/(1-\alpha)r_{L+} + G_{BK3} + G_H
 \end{pmatrix}$$

Препроцессорная обработка данных:  $G_0 = G_D + G_B$