

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Уральский государственный университет путей сообщения»
(ФГБОУ ВО УрГУПС)

На правах рукописи

Оськина Мария Александровна

**РАЗВИТИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ
ВОЗМОЖНОСТЕЙ СВЕТОДИОДНЫХ СВЕТОФОРОВ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА**

Специальность: 05.22.08 – Управление процессами перевозок
(технические науки)

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук,
профессор Сергеев Б.С.

Екатеринбург– 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1 НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И РАЗРАБОТКИ СВЕТОДИОДНЫХ СВЕТОФОРОВ.....	10
1.1 Состояние и направления разработки светодиодных светофоров.....	10
1.2 Состояние и направления научных исследований светодиодных светофоров.....	13
ГЛАВА 2 ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ВОПРОСОВ ПОВЫШЕНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СВЕТОДИОДНЫХ СВЕТОФОРОВ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ.....	17
2.1 Исследование характеристик существующих светодиодных светофоров...	17
2.2 Исследование резервированных светодиодных светофоров.....	26
2.3 Выводы и заключение по главе 2.....	40
ГЛАВА 3 ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ВОПРОСОВ ПОВЫШЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СВЕТОДИОДНЫХ СВЕТОФОРОВ ПЕРЕМЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ.....	42
3.1 Исследование влияния емкостей между соседними парами жил сигнального кабеля на функционирование светофора.....	42
3.2 Направления совершенствования схем управления светофорами при питании от переменного напряжения.....	59
3.3 Выводы и заключение по главе 3.....	62
ГЛАВА 4 ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И УСТРОЙСТВ КОНТРОЛЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ СВЕТОДИОДНЫХ СВЕТОФОРОВ ПЕРЕМЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ.....	65
4.1 Исследование электрических параметров устройств в режиме контроля функционирования светофоров	67
4.2 Анализ и выбор направлений улучшения эксплуатационных характеристик светофоров для режима контроля функционирования светофоров.....	78

4.3 Анализ электрических параметров устройств в режиме определения работоспособности функционирования светофоров.....	80
4.4 Анализ и выбор направлений улучшения эксплуатационных характеристик светофоров для режима определения работоспособности светофоров.....	84
4.5 Выводы и заключение по главе 4.....	86
ГЛАВА 5 ИССЛЕДОВАНИЕ ВОПРОСОВ ПРИМЕНЕНИЯ УСТРОЙСТВ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ СВЕТОДИОДНЫМИ СВЕТОФОРАМИ.....	88
5.1 Устройство безопасной передачи аналогового оптического сигнала на излучатель светофора.....	89
5.2 Принципы реализации схем контроля функционирования светофора с использованием ВОЛС.....	96
5.3 Принципы реализации систем управления светофорами с использованием ВОЛС.....	97
5.4 Выводы и заключение по главе 5.....	99
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	101
ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	103
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	104
ПРИЛОЖЕНИЕ А ДОКУМЕНТЫ О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ.....	117

ВВЕДЕНИЕ

В сложной инфраструктуре систем железнодорожной автоматики и телемеханики (СЖАТ) одной из основных функций, обеспечивающих безопасность перевозок, является передача ответственной информации с путевых устройств на локомотив. Один из наиболее широко применяемых каналов для передачи подобной информации – оптический, где передатчиком соответствующих сигналов служит светофор.

За последние десятилетия на сети железных дорог происходит планомерная замена светофоров с лампами накаливания на светодиодные. Появление и развитие эффективных средств оптоэлектроники обусловило использование в светофорах современных светодиодных матриц (СДМ), состоящих из соответствующего электрического и конструктивного соединения одиночных светодиодов. В настоящее время не возникает вопроса о необходимости внедрения средств светодиодной техники на сети железных дорог [1]. Этому процессу способствует ряд преимуществ использования СДМ в железнодорожных светофорах.

К одному из важнейших преимуществ в первую очередь следует отнести гораздо более высокую надежность и долговечность функционирования светодиодных светофоров, которая достигает 100 тыс. ч. и более. Это обуславливает необходимость отказа от применения в светофорах ламп накаливания и использования двухнитевых ламп. Другим преимуществом является существенно меньшее энергопотребление оптических излучателей, что снижает мощность, потребляемую светофорными системами от источников электропитания, в несколько раз.

За последнее десятилетие благодаря научно-техническим разработкам ряда отечественных и зарубежных ученых и специалистов достигнут определенный прогресс в области улучшения технических и эксплуатационных характеристик светодиодных светофоров. Разработаны новые схемотехнические решения и выполнены определенные научные исследования [2]. Отечественные заводы-изготовители производят различные модификации светодиодных светофоров,

широко внедряемых на сети дорог ОАО «РЖД». Разработан отечественный стандарт, оговаривающий технические и эксплуатационные требования к существующим и вновь разрабатываемым светодиодным светофорам для железнодорожного транспорта [3], а также внесены соответствующие изменения в «Технический регламент безопасности инфраструктуры железнодорожного транспорта» [4].

Наиболее общие основы теории и функционирования светодиодов и СДМ, используемых в светодиодных светофорах, основаны на научных достижениях отечественных и зарубежных ученых и инженеров, например, [5–11].

Основой данной диссертационной работы является положение о необходимости совершенствования энергетических, конструктивных и эксплуатационных характеристик светодиодных светофоров.

Актуальность темы исследования. Согласно концепции комплексной программы «Внедрение светодиодной техники в ОАО «РЖД», на железных дорогах РФ происходит массовая планомерная замена светофоров с лампами накаливания на светодиодные. Это связано с тем, что светодиодные светофоры обладают более высокой надежностью работы и долговечностью функционирования, а также имеют существенно меньшее энергопотребление.

Однако данный процесс сдерживается из-за ряда существенных проблем,

Одна из них связана с противоречием, заключающемся в невозможности одновременно обеспечить достаточно высокие работоспособность и энергетическую эффективность при замене ламповых светофоров на светодиодные в уже действующих системах управления и электропитания устройствами автоматики и телемеханики с помощью постоянного тока.

Другая – это существенное ограничение длины линий управления для светодиодных светофоров по сравнению с ламповыми вследствие возникновения эффекта подсветки ненадлежащего показания из-за влияния существующих паразитных электромагнитных связей в кабельных линиях при электрической централизации, где в качестве сигнала управления и электропитания используется по-

вышенное переменное напряжение. Это связано с различием принципов функционирования светодиодной матрицы (СДМ) и лампы накаливания.

По этой же причине становятся актуальными проблемы, связанные с контролем функционирования и определением работоспособности светодиодных светофоров для существующих систем автоматики и телемеханики на железнодорожном транспорте.

Также в настоящее время отсутствуют перспективные технические решения по замене металлосодержащих стационарных сигнальных кабельных линий управления светофорами на волоконно-оптические линии связи (ВОЛС), использование которых позволило бы решить проблему влияния паразитных электромагнитных связей на работу светофоров.

Решение перечисленных выше проблем подтверждает актуальность диссертационного исследования.

Степень разработанности темы исследования. В области исследований проблем разработки и внедрения светодиодных светофоров и светодиодной техники наибольший вклад был внесен учеными и инженерами следующих организаций и вузов: ВНИИЖТ, МИИТ, НИИАС, ТрансСигнал, УОМЗ, УрГУПС и др. Среди отечественных ученых и инженеров в этом отношении следует отметить: В.И. Есюнина, Ю.И. Зенковича, В.М. Лисенкова, М.А. Мурашову, А.Б. Никитина, Ю.Ю. Пусвацета, Е.Н. Розенберга, Е.О. Савельева, Вл.В. Сапожникова, Б.С. Сергеева, С.А. Щиголева. Среди зарубежных ученых можно отметить: J.D. Bulough, P. LeMunh, M. Moley, J. Munro, S. Nakamura и др. В своих исследованиях автор опирался на их работы, а также на практические результаты других отечественных и зарубежных ученых и инженеров.

Целью диссертационной работы является разработка и научное обоснование решений, направленных на совершенствование светодиодных светофоров железнодорожного транспорта и схем управления ими при условии обеспечения безопасности перевозок.

Поставленная цель достигается решением следующих задач.

1. Провести научный анализ устройства существующих светодиодных светофоров и систем управления ими с выявлением недостатков, влияющих на их долговечность, работоспособность, а также на безопасность перевозок в целом.
2. Разработать устройства светодиодных светофоров, в которых выявленные недостатки устранены, и научно обосновать предложенные решения.
3. Предложить и научно обосновать способы управления и питания стационарных светодиодных светофоров, позволяющие исключить засветку ненадлежащего показания светофора и существенно увеличить длины сигнальных кабелей.
4. Разработать методы контроля работоспособности СДМ светофора в холодном состоянии, а также усовершенствовать методы контроля функционирования СДМ в режиме излучения, позволяющие исключить влияние электромагнитных помех в сигнальных и питающих кабельных линиях на безопасность движения поездов.
5. Предложить и научно обосновать принципы управления стационарными светофорами по ВОЛС.

Объектом исследования являются устройства автоматики и телемеханики на линиях и станциях, устройства обеспечивающие безопасность перевозок.

Предмет исследования: светофоры железнодорожного транспорта, устанавливаемые на участках и станциях сети железных дорог и схемы управления ими.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем.

1. Предложено устройство светофора с резервированием элементов СДМ. Научно обоснованы процессы работы СДМ, позволяющие повысить долговечность и работоспособность светодиодного светофора.
2. Показано, что разработанные и научно обоснованные автором способы удаленного управления и питания стационарных светодиодных светофоров позволяют исключить засветку ненадлежащего показания светофора и увеличить длину сигнальных и питающих кабельных линий за счет уменьшения влияния электромагнитных помех в них.

3. Доказано, что предложенные автором методы позволяют за счет использования ранее не применяемых физических свойств $p-n$ переходов определять работоспособность СДМ светофора в холодном состоянии и за счет исключения влияния электромагнитных помех в сигнальных и питающих кабельных линиях осуществлять контроль его функционирования в режиме излучения.

4. Научно доказано, что использование ВОЛС с предложенным безопасным элементом для передачи сигнала управления светофорами, позволяет обеспечить выполнение требований по безопасности движения поездов.

Теоретическая и практическая значимость работы определяется следующими полученными результатами.

1. Разработаны новый принцип реализации и практические схемы резервированных светодиодных светофоров, позволяющие повысить их долговечность и работоспособность.

2. Предложены направления реализации схем удаленного управления светодиодными светофорами с питанием от переменного напряжения, в которых принципиально исключена засветка ненадлежащего показания светофора. Использование предложенных способов также позволяет увеличить длину сигнальных кабелей управления светофорами.

3. Разработаны схемы определения работоспособности в режиме холодного состояния и контроля функционирования светофора с питанием от переменного напряжения в режиме излучения.

4. Предложенные схемы реализации управления светофорами по ВОЛС позволяют обеспечить выполнение требований по безопасности перевозок.

Методология и методы исследования. В ходе исследования автором применялись методы классической теории линейных электрических цепей, физического моделирования электронных и электрических схем и устройств, принципы анализа нелинейных электронных элементов и основы теории физических процессов в полупроводниковых приборах.

Положения, выносимые на защиту.

1. Устройство светофора с резервированием элементов СДМ и научное обоснование процессов работы такой СДМ.
2. Способы удаленного управления и питания станционных светодиодных светофоров, позволяющие исключить засветку ненадлежащего показания и существенно увеличить длины сигнальных кабелей.
3. Методы определения работоспособности СДМ светофора в холодном состоянии с использованием физических свойств $p-n$ переходов и методы контроля функционирования СДМ в режиме излучения.
4. Принципы управления светофорами по ВОЛС с использованием предложенного безопасного элемента, обеспечивающие выполнение требований безопасности перевозок.

Степень достоверности и апробация результатов. Результаты обоснованы теоретически и подтверждены экспериментальными исследованиями с использованием корректных математического аппарата и методики лабораторного макетирования электронных схем.

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались: на четвертой научно-технической конференции с международным участием «ИСУЖТ» (Москва, 2015), на периодических научных семинарах аспирантов и кафедральных семинарах УрГУПС (Екатеринбург, 2014, 2015), IX Международной научно-практической конференции «Наука и образование – транспорту» (Самара, 2016), расширенном заседании кафедры «Электрические машины» (Екатеринбург, 2016).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 8 статей (из них 4 в изданиях, рекомендованных ВАК РФ для публикации научных результатов диссертационных исследований) и 5 патентов РФ.

Объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, перечня основных сокращений и обозначений, списка литературы, состоящего из 110 наименований. Текст диссертации содержит 120 страниц, включает 43 рисунка.

ГЛАВА 1

НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И РАЗРАБОТКИ СВЕТОДИОДНЫХ СВЕТОФОРОВ

1.1 Состояние и направления разработки светодиодных светофоров

Номенклатура выпускаемых в настоящее время светодиодных светофоров и светодиодных модулей, в том числе и для железнодорожного транспорта довольно велика. Перечень наиболее известных отечественных и зарубежных производителей подобных светофоров приведен в [11–33].

В подавляющем большинстве разработок светодиодные светофоры представляют собой СДМ, которые состоят из нескольких параллельных цепей с последовательным соединением нескольких единичных светодиодов в каждой [34, 35]. Формирование требуемой величины тока через светодиоды в каждой параллельной цепи осуществляется, обычно, при помощи активного резистора или линейного стабилизатора постоянного напряжения. Такая схемная реализация позволяет с одной стороны существенно упростить схему управления излучателем, однако с другой стороны снижается энергетическая эффективность устройства и ухудшаются эксплуатационные показатели.

С энергетической точки зрения существенно более эффективными являются схемы формирования тока через светодиоды, в которых используются реактивные элементы: индуктивности или конденсаторы [36–45].

Для целей формирования тока через светодиоды СДМ применяются также микроэлектронные драйверы, функционально выполненные в виде интегральных импульсных стабилизаторов постоянного напряжения. В настоящее время номенклатура подобных отечественных и зарубежных драйверов велика и вполне достаточна для их практического применения в схемах управления светофорами [46, 47]. Так как КПД подобных микроэлектронных драйверов довольно высок и

составляет 0,85–0,95, то их большая энергетическая эффективность по отношению к устройствам с применением активных резисторов несомненна. Кроме того, стоимость существующих интегральных, в том числе и силовых, микросхем относительно невысока, поэтому применение их в устройствах железнодорожной автоматики является целесообразным. Некоторым ограничением применения известных интегральных микросхем (ИМС) в некоторых случаях служат ограничения по температурному диапазону эксплуатации светофоров, в частности, в области низких температур, которые имеют место на железнодорожном транспорте.

Оригинальными техническими решениями светофоров являются устройства, основанные на смешении цветов светодиодов, имеющих различный цвет излучения [39, 48, 49]. Эти схемы позволяют при наличии в схеме двух типов светодиодов получать три цвета излучения. Подобные схемы широко применяются в устройствах индикации электронных информационных устройств, например, в устройствах вокзальной автоматики. Очевидно, что количество цветов излучения может быть увеличено путем увеличения светодиодов различного цвета излучения. Конструктивным требованием для этих устройств является необходимость размещения кристаллов *p-n* переходов различных светодиодов в непосредственной близости друг от друга.

Подобные технические устройства обладают определенной степенью ограниченности в практическом применении, обусловленной трудностью получения требуемых длин излучения различных показаний светофоров, изложенных в нормативных документах [3, 4].

Возможности применения различных огневых реле для контроля функционирования светофора в режиме излучения предложены в [51]. Здесь осуществляется регулировка моментов срабатывания и отпускания огневого реле, что является критичным для светодиодных светофоров, ток потребления которых имеет существенно меньшие величины, чем у ламповых. Это не позволяет применять стандартные огневые реле и в светодиодных светофорах. Однако существенная нестабильность технологической и температурной вольтамперной характеристики светодиодов делает применение подобных устройств на практике весьма пробле-

матичной. До сих пор проблема контроля функционирования светодиодного светофора в различных режимах его работы не может считаться полностью решенной.

Кроме описанных имеется большое число других отечественных и зарубежных схмотехнических решений светодиодных светофоров, отличие которых от известных не является кардинальным.

Первые светодиодные светофоры на зарубежных железных дорогах появились в середине 90-х гг. прошлого века [53,54]. Несмотря на гораздо более раннюю известность применения светодиодов для целей индикации и вывода информации [55, 56, 90], применение их в светофорах различного типа наталкивалось на ряд трудностей. В первую очередь это относилось к тому, что спектральная характеристика их излучения не соответствовала требуемым нормам по диапазонам длин волн излучения (цветности излучения). Например, в то время отсутствовали светодиоды с зеленым цветом излучения. Наиболее известными были светодиоды с красным цветом излучения. Значительная трудность заключалась также в создании требуемой яркости и фокусировки излучения светодиодов и СДМ светофора. Известны также полностью нерешенные вопросы конструктивно-технологического и нормативного порядка. На начальной стадии использования светодиодной техники это обусловило применение светодиодов лишь в переездных светофорах, где использовался только красный цвет излучения.

Одновременно с этим начинаются и расширяются исследования в области применения светодиодных светофоров для целей регулирования городского уличного движения [88]. Для этих целей анализируются фотометрические характеристики светодиодов различных типов [89] и возможности реализации светодиодов голубого и зеленого цвета излучения [91, 92].

На отечественных железных дорогах первые светодиодные светофоры, выполняющие нормативные требования [93,94], появились в конце 90-х гг. прошлого века [34, 35, 95]. Структурно они представляли из себя СДМ с несколькими параллельными цепями, в каждой из которых последовательно включены единичные светодиоды. Формирование требуемой величины тока через светодиоды осу-

ществлялось энергетически неэффективно при помощи активных резисторов или путем использования последовательно включенного линейного стабилизатора постоянного напряжения.

За последнее время на зарубежных железных дорогах имеются попытки использования излучения светодиодных светофоров для передачи ответственной информации на локомотив [110]. Очевидно, что это является принципиально новой функциональной возможностью применения светофоров, которая позволяет существенно увеличить объем передаваемой на локомотив информации для безопасного и более эффективного регулирования движением поездов

1.2 Состояние и направления научных исследований светодиодных светофоров

Одновременно с разработками по созданию практических систем, схем и конструкций светодиодных светофоров были выполнены и научные исследования в этой области. Постановка необходимости выполнения подобных исследований изложена в [52], где определены основные и необходимые направления работ в этой области.

Выполненный анализ показал, что практически все применяемые на сети железных дорог светодиодные светофоры обладают невысокой энергетической эффективностью [57, 59, 60, 83, 96], на основании чего предложен ряд оригинальных технических решений [36, 38, 39, 41, 42, 103]. Они позволяют снизить энергопотребление таких светофоров в полтора-три раза.

Широкая номенклатура специализированных зарубежных и отечественных микроэлектронных драйверов, предназначенных для управления светодиодами и СДМ, позволила в еще большей степени улучшить энергетические показатели светофоров [46, 47].

Показано, что для получения минимального энергопотребления СДМ возможно применение способа формирования тока, протекающего через светодиоды, путем применения реактивных элементов – конденсаторов переменного напряжения или индуктивностей [84–86]. Разработанные на основе выполненного анализа устройства [37, 39, 41, 43, 84, 102] позволяют довести КПД устройств формирования тока через светодиоды до значений, близких к 100 %. Определено, что при использовании подобных методов формирования тока для снижения массы, габаритов и стоимости реактивных элементов целесообразным является использование повышенной частоты переменного напряжения для питания светодиодов и СДМ [45, 76, 82, 104]. В результате применения разработанных положений установлено, что использование подобного принципа позволяет отказаться от применения низкочастотного понижающего сигнального трансформатора. Вместе с этим показано, что подобный принцип управления может быть использован не только в светодиодных, но и в существующих светофорах с лампами накаливания.

Проведены исследования специфики работы *p-n* перехода и вопросов длины волны излучения СДМ, а также фокусировки ее светового потока [2]. Определено, что возможна практическая реализация получения различной цветности излучения СДМ путем определенного пространственного геометрического расположения кристаллов *p-n* переходов с различными длинами волн излучения. Результирующий спектр излучения подобной конструкции СДМ позволяет получать широкий диапазон цветности. На основании выполненных исследований предложены оригинальные технические решения светодиодных светофоров [40, 49, 50].

Выполнена научная и инженерная проработка вопросов конструктивной реализации светодиодных светофоров и требований унификации с существующими конструкциями ламповых светофоров, которые до сих пор используются на сети железных дорог [2, 93, 94].

На основе анализа электрических процессов и принципов действия оптоэлектронных устройств определены возможности контроля наличия или отсутствия излучения СДМ светофоров. Для непосредственного контроля излучения мо-

гут использоваться как фотодиоды, так и фоторезистивные N-элементные матрицы [39, 42]. Контроль излучения может быть реализован также при помощи измерения тока, протекающего через светодиоды, или наличия на них соответствующего напряжения [51, 102]. Принципиально возможно регулирование яркости излучения СДМ, которое необходимо для реализации режимов двойного снижения напряжения и светомаскировки [42].

Светодиоды, несмотря на их высокую энергетическую эффективность, являются источниками точечного излучения. В небольшом объеме $p-n$ перехода рассеивается значительная удельная мощность. Это в отличие от излучателей с лампами накаливания, остается проблемой при конструировании СДМ и требует применения специальных теплоотводов с малым тепловым переходным сопротивлением между поверхностью $p-n$ перехода светодиода и специально вводимой теплоотводящей поверхностью. Решение некоторых вопросов расчета тепловых характеристик светодиодов и СДМ предложено в [2], где показано также, что температура кристалла $p-n$ перехода влияет на спектральные характеристики излучения светодиодов. Определены вопросы деградации спектра излучения светодиодов с течением времени их эксплуатации [2].

Переход на питание светофора от постоянного напряжения и возможность повышения его величины дают возможности исключения подсветки ненадлежащего показания светофора и увеличения длины цепей управления от поста ЭЦ до светофора до нескольких километров и более без экономически неэффективного дублирования жил кабеля управления.

Вопросы импульсного управления излучением светодиодов рассмотрены в [97]. Этот принцип управления светофором позволяет улучшить энергетические характеристики светодиода и получить его новое функциональное свойство – служить источником передачи информации, например, на приближающийся локомотив. Одновременно с этим результаты анализа импульсного управления светодиодами применяются и при рассмотрении процессов функционирования конденсаторных схем управления [2].

Для целей повышения точности и качества регулирования излучения светодиодного светофора предложены конструктивные решения СДМ и единичных светодиодов, заключающиеся в совмещении функций контроля, регулирования яркости излучения и определения температуры кристалла *p-n* перехода в одном конструктивном модуле [2].

ГЛАВА 2

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ВОПРОСОВ ПОВЫШЕНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СВЕТОДИОДНЫХ СВЕТОФОРОВ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

В настоящее время существуют две системы управления и электропитания светофоров, которые основаны на применении постоянного или переменного напряжений. Светофоры с использованием постоянного напряжения питания применяются при относительно небольших расстояниях от излучателя до схемы сигнальных реле или их повторителей. В основном это устройства автоблокировки или станционные системы управления светофорами с местным управлением, когда в горловинах станций устанавливаются соответствующие управляющие релейные шкафы.

2.1 Исследование характеристик существующих светодиодных светофоров

Существуют различные схемы включения светодиодов в СДМ светофоров, которые в общем виде могут быть представлены в виде двух существующих на сети железных дорог типов (рисунки 2.1, *а* и 2.1, *б*). Рассмотрим энергетические характеристики светодиодных светофоров с питанием от постоянного напряжения, то есть схем светофоров с местным управлением, к которым, в частности, относятся перегонные сигнальные точки и некоторые типы станционных светофоров. При этом учтем следующие практически всегда выполняющиеся условия [75, 77].

Далее в диссертации за исключением случаев, оговариваемых особо, рассматриваются процессы, относящиеся лишь к одному из показаний светофора, так как с функциональной и энергетической точек зрения работа других показаний

идентична. В частности, полное энергопотребление светофора при наличии включенного состояния нескольких излучателей может быть найдено путем простого суммирования мощностей отдельных показаний[39].

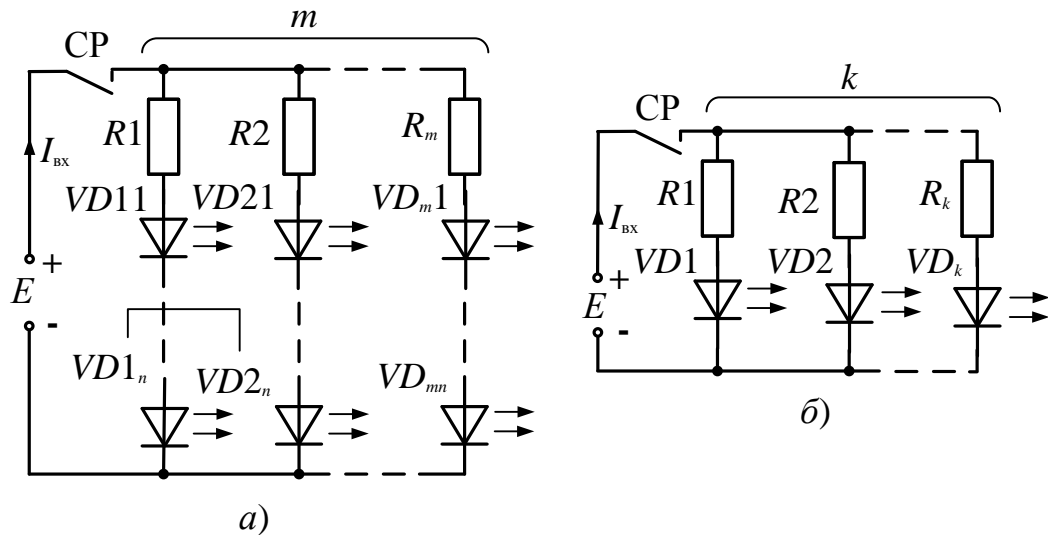


Рисунок 2.1 – Съемы подключения светодиодов в СДМ со смешанным соединением светодиодов (а) и с одиночным (б)

Так как требуемая яркость излучения любого показания светофора определяется суммарным количеством светодиодов в СДМ, то для обеих схем выполняется соотношение:

$$k = m \cdot n = \text{const}, \quad (2.1)$$

где аргументы k , m , n соответствуют нумерации в обозначениях светодиодов, приведенных на схемах рисунков 2.1, а, б.

Допустим также, что формирование токов, протекающих через светодиоды, осуществляется показанными на схемах активными резисторами. Особенности применения для этой цели микроэлектронных драйверов будут рассмотрены далее.

Практический выбор схемы включения СДМ в светофоре зависит от следующих факторов.

Со стороны долговечности функционирования светофора наиболее приемлема схема рисунка 2.1, б, в которой при обрыве p - n перехода в одном или нескольких светодиодах, светоотдача всей СДМ уменьшится незначительно (по сравнению с обрывом одного из светодиодов в схеме рисунка 2.1, а). Однако в схеме рисунка 2.1, а существенно меньше резисторов, которые формируют токи, протекающие через светодиоды. Попыткой учесть вышеизложенные факторы в известных светофорах является применение схем, в которых число последовательно включенных светодиодов $n = (3-6)$, а количество параллельно включенных цепей определяется как $m = k/n$. Нет научно обоснованного и достаточно корректного критерия для выбора соотношения между количественными характеристиками m и n при нормированном числе k .

В большинстве случаев критерием выбора той или иной схемы является величина питающего напряжения E , в качестве которого обычно назначается стандартное для систем СЦБ напряжение питания схем $E = 12$ В, иногда $E = 24$ В. Это обстоятельство во многих случаях обуславливает наличие некоторых энергетических и эксплуатационных недостатков, которые будут рассмотрены ниже.

Выражения, для определения падения напряжения на светодиодах СДМ, для схем рисунков 2.1, а и 2.1, б соответственно имеют вид:

$$U_{\text{св}} = n(U_{\text{д0}} + I_{\text{св}} \cdot R_{\text{дф}}), \quad (2.2, a)$$

$$U_{\text{св}} = U_{\text{д0}} + I_{\text{св}} \cdot R_{\text{дф}}, \quad (2.2, б)$$

где $U_{\text{д0}}$ и $R_{\text{дф}}$ – параметры нелинейной вольтамперной характеристики (ВАХ) светодиода, представляющей собой общеизвестную ломаную, которая состоит из двух прямых линий, В и Ом.

Напряжение, необходимое для обеспечения нормированного тока $I_{\text{св}}$, протекающего через светодиоды, определяется соответствующими выражениями:

$$E = n(\alpha + 1)(U_{\text{д0}} + I_{\text{св}} \cdot R_{\text{дф}}), \quad (2.3, a)$$

$$E = (\alpha + 1)(U_{\text{д0}} + I_{\text{св}} \cdot R_{\text{дф}}), \quad (2.3, б)$$

где $\alpha = \frac{U_R}{U_{д0} + I_{св}R_{дф}}$;

U_R – падение напряжения на каждом из токозадающих резисторов, В.

Очевидно, что для соблюдения относительной независимости тока светодиодов при всех условиях эксплуатации и технологических разбросах параметров светодиодов требуется обязательное выполнение условия: $\alpha \geq 1$.

В случае возможности выбора величины напряжения E , мощность, потребляемая схемами рисунков 2.1, *а* и 2.1, *б*, определится:

$$\sum P_{св} = mnI_{св}(\alpha + 1)(U_{д0} + I_{св}R_{дф}), \quad (2.4, а)$$

$$\sum P_{св} = kI_{св}(\alpha + 1)(U_{д0} + I_{св}R_{дф}). \quad (2.4, б)$$

Если сравнивать полученные выражения с уравнением (2.1), то можно сделать вывод что с энергетической точки зрения схемы рисунков 2.1, *а* и 2.1, *б* равноценны. Однако это относится к случаю, когда активные резисторы формируют ток, одинаковый для всех светодиодов обеих схем и не зависящий от напряжения питания E , что не всегда выполнимо на практике.

В случае применения какой-либо стандартной для устройств СЦБ величины напряжения питания $E_{ст}$, для схемы светофора по рисунку 2.1, *а* появляется условие максимально возможного количества последовательно включенных светодиодов для заданного значения напряжения питания схемы светофора:

$$n \leq \frac{E_{ст}}{(\alpha + 1)(U_{д0} + I_{св}R_{дф})}. \quad (2.5)$$

Несоблюдение этого условия приводит к уменьшению тока через светодиод, которое задается для выполнения нормированной яркости излучения СДМ. И наоборот, усиление этого неравенства обуславливает появление излишней мощности, потребляемой светофором.

Очевидно, что достижение энергетической идеальности функционирования схемы по рисунку 2.1, *a* возможно лишь при превращении условия (2.5) в равенство. Однако практически это невозможно из-за наличия технологического разброса параметров вольтамперных характеристик (ВАХ) светодиодов, входящих в состав СДМ и их дискретности по отношению к величине стандартного напряжения питания $E_{ст}$ для устройств СЦБ.

Таким образом, для стандартных напряжений питания полная мощность, потребляемая светофором (одного из показаний, как было условлено выше), находится из выражений:

$$\sum P_{св.} = I_{вх} E_{ст} = m I_{св} E_{ст}, \quad (2.6, a)$$

$$\sum P_{св} = I_{вх} E_{ст} = k I_{св} E_{ст}, \quad (2.6, б)$$

которые показывают, что для одного и того же значения $E_{ст}$ схема (рисунок 2.1, *a*) обладает меньшей потребляемой мощностью.

Численное сравнение падения напряжения на светодиоде $U_{св} = (U_{д0} + I_{св} R_{дф})$, которое составляет $U_{св} = 0,3-0,4$ В, с напряжением $E_{ст}$ 12 В (или, что еще более радикально, $E_{ст} = 24$ В) показывает, что применение схемы рисунка 2.1, *б* с точки зрения КПД нерационально. Основным условием получения максимального КПД светофора служит неравенство (2.5), преобразованное в равенство.

Примем, что КПД приведенных схем светофоров определяется:

$$\eta_{св} = \frac{P_{св}}{P_{св} + P_R} = \frac{1}{1 + \frac{P_R}{P_{св}}}, \quad (2.7)$$

где $P_{св}$ – мощность, рассеиваемая светодиодами схемы, Вт.

Эта мощность для двух схем соответственно определяется:

$$P_{св} = mn I_{св} (U_{д0} + I_{св} R_{дф}), \quad (2.8, a)$$

$$P_{\text{св}} = kI_{\text{св}}(U_{\text{д0}} + I_{\text{св}}R_{\text{дф}}), \quad (2.8, б)$$

а мощность, рассеиваемая резисторами:

$$P_{\text{R}} = mI_{\text{св}}[E_{\text{ст}} - n(U_{\text{д0}} + I_{\text{св}}R_{\text{дф}})], \quad (2.9, а)$$

$$P_{\text{R}} = kI_{\text{св}}[E_{\text{ст}} - (U_{\text{д0}} + I_{\text{св}}R_{\text{дф}})]. \quad (2.9, б)$$

Подстановка выражений (2.8, а), (2.8, б), (2.9, а) и (2.9, б) в (2.7) дает два уравнения для определения КПД схем рисунков 2.1, а и 2.1, б соответственно:

$$\eta = n \frac{(U_{\text{д0}} + I_{\text{св}}R_{\text{дф}})}{E_{\text{ст}}}, \quad (2.10, а)$$

$$\eta = \frac{(U_{\text{д0}} + I_{\text{св}}R_{\text{дф}})}{E_{\text{ст}}}. \quad (2.10, б)$$

Численное решение этих выражений показано на графиках рисунка 2.2. При построении графиков принято, что $(U_{\text{д0}} + I_{\text{св}}R_{\text{дф}}) = 0,3 \text{ В}$, что практически соответствует существующим значениям падения напряжения на реальных светодиодах. График, соответствующий значению $n = 1$, получен при решении выражения (2.10, б).

Так как в уравнениях (2.10, а) и (2.10, б) отсутствует ограничение решаемых функций, задаваемых условием (2.5), то области действительных значений построенных графиков рисунка 2.2 соответствует области $\eta \leq 1$, лежащей ниже показанной пунктирной линии.

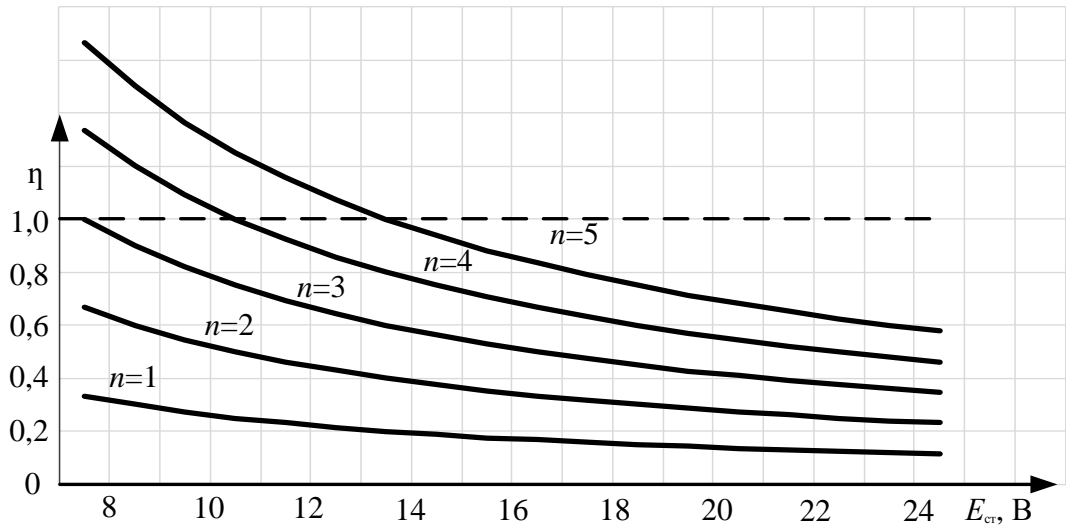


Рисунок 2.2 – График зависимости КПД светофора от изменения величины напряжения питания при различном числе последовательно соединенных светодиодов в параллельной цепи

Графики рисунка 2.2 показывают закономерное снижение КПД светофора при увеличении напряжения питания $E_{ст}$. Причем в наиболее значительной степени эта закономерность проявляется при уменьшении количества светодиодов, включенных в каждой из последовательных цепей. Минимум КПД имеет место в схеме светофора рисунка 2.1, б, для которой $n = 1$. Следовательно, если в схеме светофора применяется стандартное напряжение питания, которое невозможно изменить, то эта схема является энергетически наименее эффективной.

Определим основные вопросы применения микроэлектронных драйверов в схемах светодиодных светофоров, которые в настоящее время широко применяются в бытовой и промышленной светотехнике.

Наиболее широко распространенным видом драйвера для питания светодиодных устройств является схема импульсного стабилизатора постоянного напряжения понижающего типа [46, 47]. Однако подобные схемы не выполняют требования безопасности, то есть при различных видах отказов полупроводниковых элементов микросхемы драйвера на ее выходе появляется сигнал на включение

СДМ при разомкнутом состоянии контакта сигнального реле СР, то есть при отсутствии управляющего сигнала. В этом случае необходимо применение специализированных драйверов, реализованных на схемах импульсных стабилизаторов постоянного напряжения, которые имеют гальваническую развязку выходного напряжения от напряжения питания светофора [45, 82, 104].

Микроэлектронные драйверы обладают высоким КПД, лежащим в пределах 90–95%. Для рассматриваемых схем мощность, потребляемая светофором с использованием микроэлектронного драйвера, определяется:

$$\Sigma P_{\text{св}} = \frac{n I_{\text{св}} (U_{\text{д0}} + I_{\text{св}} R_{\text{диф}})}{\eta_{\text{др}}}, \quad (2.11, a)$$

$$\Sigma P_{\text{св}} = \frac{k I_{\text{св}} (U_{\text{д0}} + I_{\text{св}} R_{\text{диф}})}{\eta_{\text{др}}}. \quad (2.11, б)$$

где $\eta_{\text{др}}$ – КПД микроэлектронного драйвера.

Как видно из этих выражений, так как $m \cdot n = k$, то независимо от схемы подключения светодиодов СДМ мощность, потребляемая светофором, не изменяется. Очевидно, что применение микроэлектронных драйверов является существенным преимуществом по отношению к рассмотренным выше простым схемам светодиодных светофоров.

В качестве примера на рисунке 2.3 приведены, рассчитанные по выражениям (2.11), графики полной потребляемой светофором мощности $\Sigma P_{\text{св}}$ при различных значениях КПД микроэлектронного драйвера для трех величин тока $I_{\text{св}}$, протекающего через светодиоды. Здесь принято, что $m \cdot n = k = \text{const}$, $E = 24\text{В}$ и, кроме того, $(U_{\text{д0}} + I_{\text{св}} R_{\text{дф}}) = 0,3\text{ В}$.

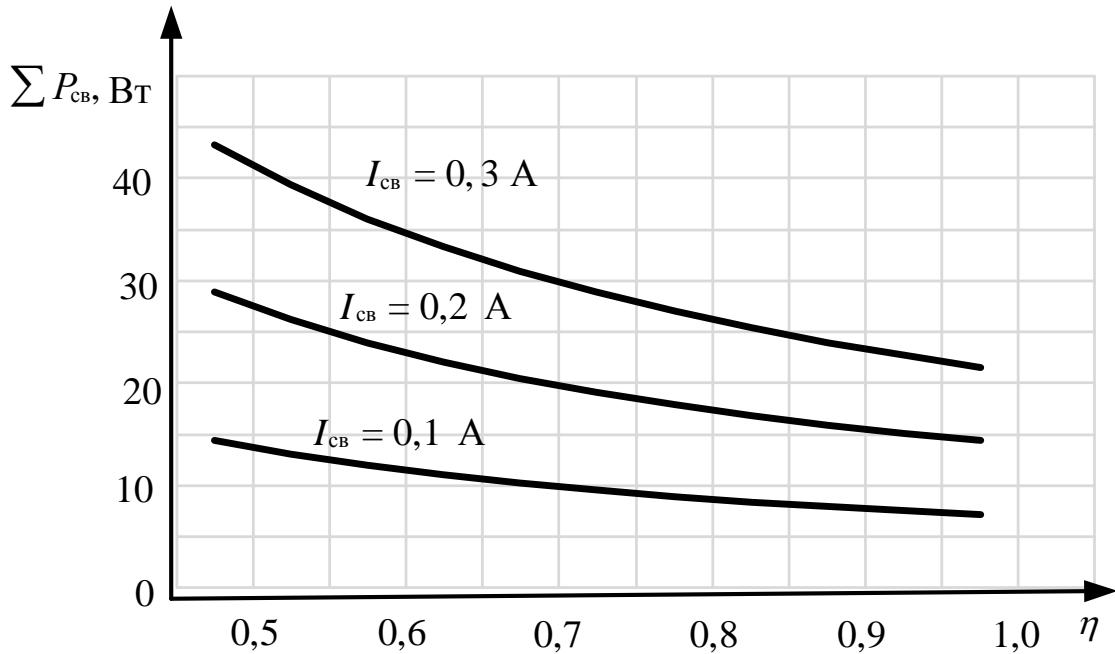


Рисунок 2.3 – Зависимость полной мощности, потребляемой светофором, при изменении КПД драйвера

Графики показывают существенное изменение мощности, потребляемой светофором при установке драйверов с различными величинами КПД. Одновременно с этим видно, что при $\eta = 1$ полная потребляемая мощность определяется лишь энергетическими характеристиками светодиодов, входящих в СДМ.

Необходимо учитывать, что применение интегральных микросхем (ИМС) в устройствах автоматики и телемеханики железнодорожного транспорта имеет определенную специфику. Она заключается в том, что ИМС обладают невысокой стойкостью к воздействию различного вида мощных электрических и электромагнитных помех.

Для обеспечения надежной работы ИМС требуется применение различного вида защитных устройств, ограничивающих амплитуду импульсных помех на питающих и управляющих выводах ИМС [45]. Очевидно, что это приводит к усложнению устройств СЦБ. В этом отношении специфика инфраструктуры железнодорожного транспорта заключается в наличии мощных источников электрических и электромагнитных помех, генераторами которых являются грозовые разряды,

тяговые подстанции, распределенная контактная сеть и многие мощные электротехнические контакторы, переключающие токи величиной в сотни и тысячи ампер и напряжения в десятки киловольт. До сих пор проблема защиты полупроводниковых приборов является актуальной и не может считаться полностью решенной.

Таким образом, существующие схемы светодиодных светофоров с формированием тока через светодиоды при помощи активных резисторов обладают невысокой энергетической эффективностью. Их КПД и потребляемую мощность можно определить при помощи приведенных выше выражений. Наиболее экономичными с энергетической точки зрения являются устройства с применением микроэлектронных драйверов. Вопросы их применения обладают определенной спецификой, которая отсутствует в простых схемах с применением в качестве источников тока активных резисторов.

Кроме того, так как питание излучателей осуществляется от довольно невысокой величины постоянного напряжения, то падение напряжения на сигнальных кабелях соизмеримо с указанным напряжением питания. Это ограничивает длину кабелей от поста управления до светофора. Поэтому с точки зрения использования постоянного напряжения, невозможно применять местное управление светофорами при длинах сигнальных кабелей более нескольких десятков-сотен метров.

2.2 Исследование резервированных светодиодных светофоров

Кроме описанных в предыдущем разделе недостатков, известные схемы светофоров обладают недостаточно высокой долговечностью работы. Это принципиально обусловлено следующими обстоятельствами. В энергетически более эффективных схемах со смешанным соединением светодиодов (рисунок 2.1, *а*) обрыв в одном из последовательно включенных светодиодов приводит к отказу всей группы светодиодов. В схемах с одиночным соединением (рисунок 2.1, *б*)

этот недостаток отсутствует, однако они потребляют существенно большую мощность. Это противоречие возможно разрешить, применяя схемы резервированных светодиодных светофоров [73, 75], один из вариантов которой показан на рисунке 2.4 [79].

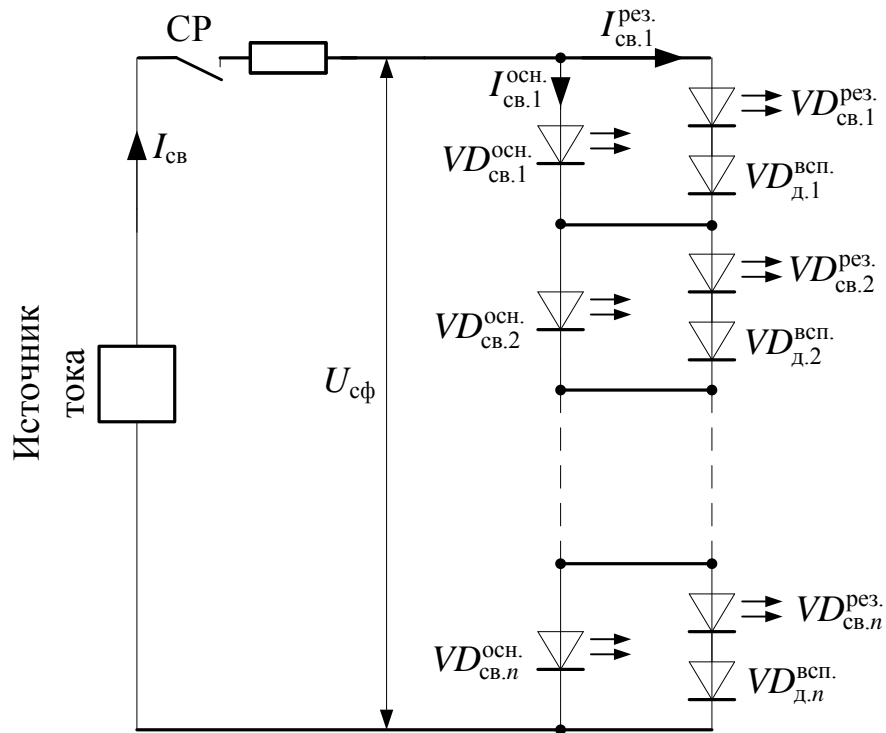


Рисунок 2.4 – Схема резервированного светодиодного светофора

Здесь основные светодиоды – $VD_{св.1}^{осн.}, VD_{св.2}^{осн.} \dots VD_{св.N}^{осн.}$ (излучающие в нормальном режиме работы при отсутствии обрывов в любом из них), светодиоды $VD_{св.1}^{рез.}, VD_{св.1}^{рез.} \dots VD_{св.1}^{рез.}$ – резервные и включенные последовательно с ними вспомогательные диоды – $VD_{д.1}^{всп.}, VD_{д.2}^{всп.} \dots VD_{д.N}^{всп.}$. При обрыве в любом из основных светодиодов начинает излучать соответствующий ему резервный светодиод, включенный параллельно. Фактически схема светофора (рисунок 2.4) представляет собой цепь, состоящую из последовательно включенных светодиодов. Такая структура упрощает схему управления светодиодами, а также позволяет повысить напряжение

питания светофора, а значит увеличить дальность управления светофором до нескольких километров и более.

Выполним анализ функционирования рассматриваемой схемы, используя известные методы графоаналитического исследования электронных схем. Определим условия ее работоспособности в состоянии, когда любой из основных светодиодов $VD_{св.i}^{очн}$ излучает, а соответствующий ему резервный светодиод $VD_{св.i}^{рез}$ не должен излучать при воздействии всех дестабилизирующих факторов, которые могут привести к нарушению функционирования светофора. А в случае, когда в $p-n$ переходе основного светодиода $VD_{св.i}^{очн}$ произойдет обрыв, включение резервного светодиода $VD_{св.i}^{рез}$ несомненно и анализу не подлежит.

Как и ранее, условимся, что вольтамперные характеристики (ВАХ) $p-n$ переходов всех светодиодов и диодов представляют собой составные функции, состоящее из двух прямых:

$$U_{д} = \begin{cases} U_{д0} (I_{св} = 0), & \text{при } U_{д} \leq U_{д0}; \\ U_{д0} + I_{св} R_{дф} (I_{св} > 0), & \text{при } U_{д} \geq U_{д0}, \end{cases} \quad (2.12)$$

где $U_{д0}$ – пороговое напряжение включения $p-n$ перехода (при $U_{д} < U_{д0}$ ток через $p-n$ переход $I_{д}$ равен нулю), В;

$R_{дф}$ – дифференциальное сопротивление $p-n$ перехода, Ом.

Также допустим, что при замкнутом контакте сигнального реле СР ток от источника не зависит от параметров светодиодов, входящих в схему светофора, а определяется характеристиками примененной схемы источника тока, то есть $I_{св} = \text{const}$.

Для обеспечения работы схемы резервированного светофора (рисунок 2.4) в нормальном режиме, т. е. при отсутствии обрывов в основных светодиодах, для каждой из параллельных цепочек $VD_{св.i}^{очн} \parallel (VD_{д0i}^{всп} + VD_{св.i}^{рез})$ необходимо выполнение следующего неравенства, выражающего требуемое соотношение падений напряжений на цепи основного светодиода и соответствующего цепи резервного:

$$\frac{(U_{д.0}^{всп} + U_{св.0}^{рез} + I_{св} R_{дф}^{всп} + I_{св} R_{дф}^{рез})}{(U_{св.0}^{осн} + I_{св} R_{дф}^{осн})} > 1, \quad (2.13)$$

где $U_{св.0}^{осн}$, $U_{св.0}^{рез}$ и $U_{д.0}^{всп}$ – пороговое напряжение включения основных $VD_{св.1}^{осн}, VD_{св.2}^{осн}, \dots, VD_{св.N}^{осн}$ и $VD_{св.1}^{рез}, VD_{св.1}^{рез}, \dots, VD_{св.1}^{рез}$ резервных светодиодов, а также вспомогательных диодов $VD_{д.1}^{всп}, VD_{д.2}^{всп}, \dots, VD_{д.N}^{всп}$ соответственно, В;

$R_{дф}^{осн}, R_{дф}^{всп}$ и $R_{дф}^{рез}$ – дифференциальное сопротивление каждого из основных светодиодов, вспомогательных диодов и резервных светодиодов соответственно, Ом.

В данном случае критерием работоспособности схемы является отсутствие излучения резервных светодиодов $VD_{св.i}^{рез}$ при исправности основных $VD_{св.i}^{осн}$ (рисунок 2.4).

На графиках рисунков 2.5, а и 2.5, б приведена иллюстрация пояснения двух различных режимов работы рассматриваемого устройства.

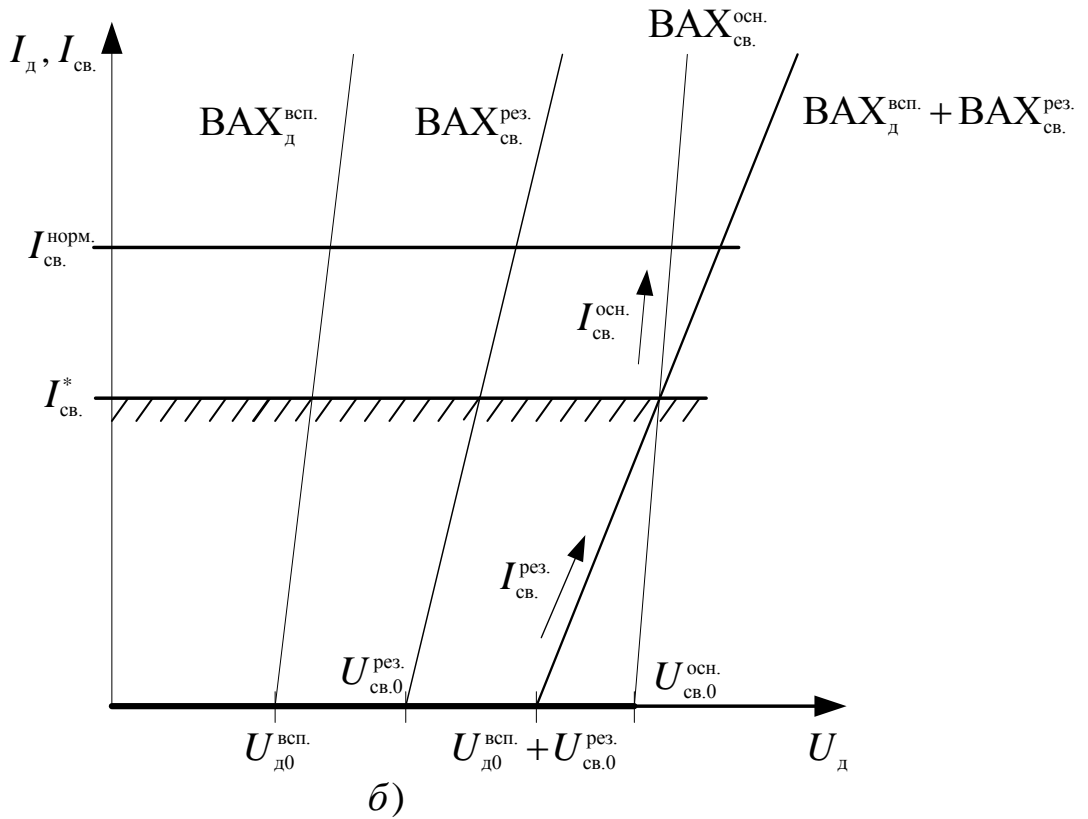
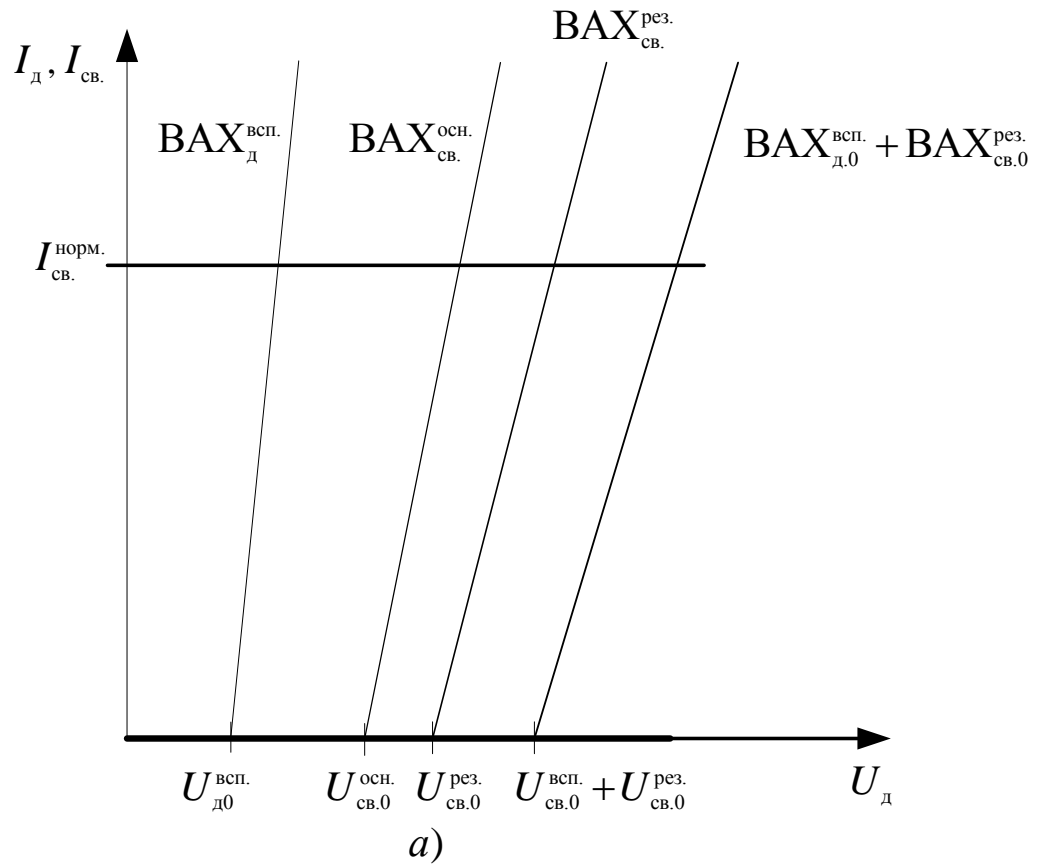


Рисунок 2.5 – ВАХ диодов и светодиодов при независимости их характеристик (а) и при связанных между собой параметрах (б)

Первый график (рисунок 2.5, а) определяет нормальное функционирование СДМ при различных значениях параметров вольтамперных характеристик $ВАХ_{св}^{осн}$ и $ВАХ_{св}^{рез}$. Здесь при излучении основного светодиода обеспечивается отсутствие излучения соответствующего резервного светодиода.

Второй график (рисунок 2.5, б) имеет ограничение в области нормальной работы схемы и показывает, что работоспособность светофора обеспечивается лишь при значении тока через соответствующий основной светодиод $VD_{св.i}^{осн}$, равном $I_{св}^{норм} > I_{св}^*$, где $I_{св}^{норм}$ – нормированная величина тока через светодиоды, который требуется для обеспечения заданной яркости излучения светодиодной матрицы светофора.

Это утверждение иллюстрируется графиками вольтамперных характеристик рисунок 2.5, б при движении стрелок по направлению увеличения величины тока через светодиоды $I_{св}$.

Так как точка $I_{св}^*$ является аргументом двух непрерывных функций $ВАХ_{св}^{осн}$ и $(ВАХ_{д.0}^{всп} + ВАХ_{св.0}^{рез})$, то ее значение определяется точкой пересечения этих функций в следующем уравнении:

$$I_{св}^* = \begin{cases} \frac{U_{св}^{осн}}{R_{дф}^{осн}} \\ \frac{U_{д}^{всп}}{R_{дф}^{всп}} + \frac{U_{св}^{рез}}{R_{дф}^{рез}} \end{cases} \quad (2.14)$$

Если электрические характеристики полупроводниковых приборов $VD_{св.i}^{осн}$, $VD_{св.i}^{рез}$ и $VD_{д.i}^{всп}$ таковы, что обеспечивается отсутствие пересечения функций $ВАХ_{св}^{осн}$ и $(ВАХ_{д.0}^{всп} + ВАХ_{св.0}^{рез})$, то схема работоспособна. Если эти функции пересекаются, то появляется необходимость численного определения координаты точки $I_{св}^*$. Данное действие может быть выполнено графическим методом путем сравнения соответствующего геометрического сложения нормативных ВАХ ис-

пользуемых полупроводниковых приборов $VD_{CB,i}^{осн}$, $VD_{CB,i}^{рез}$, $VD_{CB,i}^{всп}$ и последующего практического нахождения требуемой точки I_{CB}^* .

Заметим, что процедура сравнения параметров не обеспечивает гарантированной работоспособности светофора при изменении температуры окружающей среды и при технологическом разбросе параметров полупроводниковых приборов.

Рассмотрим влияние температуры окружающей среды на функционирование светофора. Падение напряжения на $p-n$ переходе в области прямой проводимости нормируется температурным коэффициентом напряжения:

$$TKH = -\frac{\Delta U}{\Delta T}, \quad (2.15)$$

где ΔU – изменение падения напряжения на $p-n$ переходе светодиода, мВ;

ΔT – изменение температуры, °С.

Изменение падения напряжения на переходе равняется:

$$U_d(T) = U_d^{+20^\circ C} - \Delta T \cdot TKH, \quad (2.16)$$

где $U_d^{+20^\circ C}$ – падение напряжения на переходе при температуре $T = +20^\circ C$ (нормальные условия), В.

Так как нормированное значение ТКН имеет отрицательный знак, при уменьшении температуры напряжение $U_d(T)$ будет увеличиваться.

Влияние ТКН на функционирование анализируемого светофора будет максимально при температуре окружающей среды или корпуса полупроводникового прибора ниже нуля. Поскольку температурный режим основных и резервных светодиодов, а также вспомогательных диодов различен, то в случае, когда основной светодиод излучает, температура его $p-n$ перехода будет больше, чем у резервного

светодиода и вспомогательного диода, что приведет к уменьшению падения напряжения на нем.

На рисунке 2.6 приведены графики, показывающие изменения положения $VAX_{св}^{осн}$ и $(VAX_{д.0}^{всп} + VAX_{св.0}^{рез})$ при изменении температуры $p-n$ переходов. В частности, если рассматривать повышение температуры кристалла $p-n$ перехода основного светодиода $VD_{св.i}^{осн}$, то его вольтамперная характеристика сдвинется влево и примет вид графика $(VAX_{св}^{осн})_{+T}$.

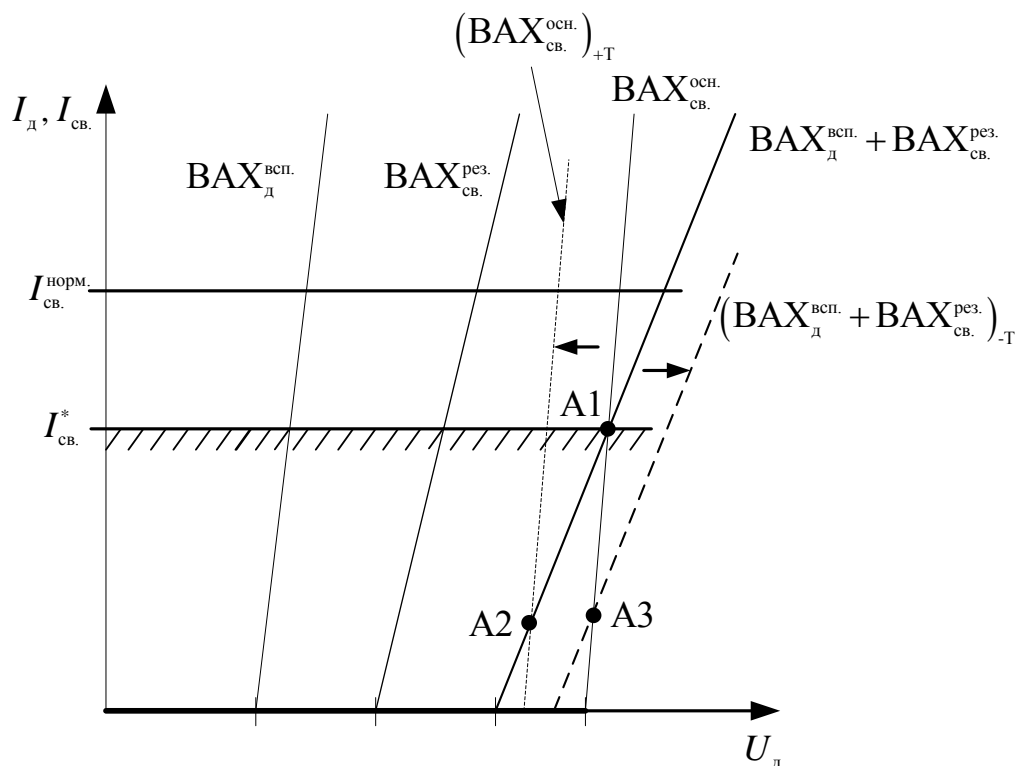


Рисунок 2.6 – Температурные изменения ВАХ полупроводниковых приборов

Если температура кристаллов диодов и светодиодов ($VAX_{д.0}^{всп} + VAX_{св.0}^{рез}$) уменьшится и станет ниже по отношению к светодиоду $VD_{св.i}^{осн}$, то их вольтамперная характеристика сдвигается вправо $(VAX_{д.0}^{всп} + VAX_{св.0}^{рез})_{-T}$.

Графики рисунка 2.6 показывают, что при подобных температурных воздействиях точка $I_{св.}^*$, соответствующая критическому состоянию функционирова-

ния схемы светофора, перемещается в область более низких значений тока, увеличивая разность $\Delta I_{\text{св}} = I_{\text{св}} - I_{\text{св}}^*$.

Это показано перемещением исходной точки А1 в положения А3 и А2 соответственно. Следовательно, различие в температурных параметрах ВАХ светодиодов и вспомогательного диода не приводит к снижению долговечности работы светофора.

Однако это относится к статическому режиму работы светофора, когда тепловые режимы полупроводниковых приборов являются установившимися. Напомним, что появление обрыва в основных светодиодах должно приводить к включению соответствующих резервных светодиодов. Если температура окружающей среды будет отрицательна, это станет причиной большого суммарного падения напряжения на вспомогательном диоде и резервном светодиоде ($VD_{\text{до}i}^{\text{всп}} + VD_{\text{св.}i}^{\text{рез}}$). Например, в зимнее время различие в реальных температурах p - n переходов «холодных» и «горячих» полупроводниковых приборов может достигать величин $\Delta T = (60 - 80)^\circ\text{C}$ и более. Так как в нормальном режиме «холодной» является резервная цепочка ($VD_{\text{до}i}^{\text{всп}} + VD_{\text{св.}i}^{\text{рез}}$), то в данном случае негативных последствий не будет. А после выхода этих полупроводниковых приборов в режим излучения выводы, сделанные выше по выражениям (2.13), (2.14) и (2.16), остаются в силе.

Другим фактором, влияющим на работоспособность схемы, является технологический разброс значений прямого падения напряжения и дифференциального сопротивления p - n переходов полупроводниковых приборов. Учет этих факторов ведется путем замены в уравнениях (2.13) и (2.14) аргументов $U_{\text{св.}0}$, $U_{\text{до}}$ и $R_{\text{дф}}$ на соответствующие предельные величины, приведенные в нормативных документах на используемые в схеме полупроводниковые приборы.

Уравнение для определения работоспособности анализируемой схемы может быть получено путем введения функций учитывающих относительные изменения параметров любого из диодов и светодиодов схемы:

$$\Delta U_{д0}^{\text{техн}} = \Delta U_{д0} (1 \pm \delta^U), \quad (2.17, a)$$

$$\Delta R_{дф}^{\text{техн}} = \Delta R_{дф} (1 \pm \delta^R), \quad (2.17, б)$$

где $\delta^U = \frac{\Delta U_{д}^{\text{техн}}}{\Delta U_{д0}}$ – относительное изменение падения напряжения на светодиоде

или диоде вследствие разброса их технологических и температурных параметров;

$\Delta U_{д}^{\text{техн}}$ – абсолютное изменение падения напряжения, В;

$\delta^R = \frac{\Delta R_{дф}^{\text{техн}}}{\Delta R_{дф}}$ – относительное изменение величины дифференциального сопротивления

светодиода или диода вследствие разброса их технологических и температурных параметров;

$\Delta R_{дф}^{\text{техн}}$ – абсолютное изменение дифференциального сопротивления, Ом.

При учете функций (2.17, а) и (2.17, б), выражение (2.13) примет вид уравнения, полностью определяющего области работоспособности анализируемой схемы при воздействии дестабилизирующих технологических и температурных факторов:

$$\begin{aligned} & \left[\Delta U_{д0} (1 \pm \delta^U) \right]^{\text{всп.}} + \left[\Delta U_{д0} (1 \pm \delta^U) \right]^{\text{рез.}} + I_{\text{св}} \left\{ \left[R_{дф} (1 \pm \delta^R) \right]^{\text{всп.}} + \left[R_{дф} (1 \pm \delta^R) \right]^{\text{рез.}} \right\} > \\ & > \left[\Delta U_{д0} (1 \pm \delta^U) \right]^{\text{очн}} + I_{\text{св}} \left\{ \left[R_{дф} (1 \pm \delta^R) \right]^{\text{очн}} \right\}. \end{aligned} \quad (2.18)$$

Определим отличительные свойства анализируемой схемы, появляющиеся при введении в схему светофора со смешанным соединением (рисунок 2.1, а) устройства с резервированием светодиодов.

Для схемы со смешанным соединением напряжение на входе светофора определяется:

$$U_{\text{сф}}^{\text{смеш}} = E_{\text{г}} - I_{\text{св}} (R_{\text{каб}} m - R_{\text{г}}) + (U_{\text{св.0}} + I_{\text{св}} R_{\text{дф}}) n. \quad (2.19)$$

Так как основной функцией рассматриваемого резервированного светофора является «подмена» отказавшего светодиода на резервный, то для последующего анализа необходимо ввести параметр L , равный числу отказавших основных светодиодов $VD_{св.i}^{осн}$.

В этом случае для схемы резервированного светофора, у которого $m = 1$ и $k = n$, аналогичное выражение имеет вид:

$$U_{сф}^{рез} = E_T - I_{св} (R_{каб} - R_T) + (U_{св.0}^{осн} + I_{св} R_{дф}^{осн})(n-L) + (U_{д.0}^{всп} + U_{св.0}^{рез} + I_{св} R_{дф}^{всп} + I_{св} R_{дф}^{рез})L. \quad (2.20)$$

При практическом использовании результатов проведенного графоаналитического анализа необходимо учитывать, что светодиоды с различной длиной волны излучения (различной цветности излучения) имеют различные значения напряжения $U_{д0}$. Это потребует необходимости отдельного расчета для каждого из показаний светофора, если цветность их излучения различна.

Выражение (2.20) справедливо также и для схемы рисунка 2.4. Очевидно, что $U_{сф}^{рез} > U_{сф}^{смеш}$. Следовательно, при возникновении процесса переключения отказавшего основного светодиода на резервный происходит уменьшение тока через соответствующую цепь светодиодов. Причем увеличение количества включенных резервных светодиодов вызовет увеличение напряжения $U_{сф}^{рез}$. При формировании токов путем использования активных резисторов увеличение количества отказавших основных светодиодов обусловит снижение яркости излучения светофора, однако он будет продолжать функционировать. Это может служить признаком наличия частичного отказа СДМ, который может использоваться электромехаником СЦБ при обходе участка или машинистом приближающегося поезда.

Если необходима высокая стабильность поддержания тока через светодиоды СДМ, то может потребоваться применение не активных резисторов, а интегрального драйвера, обеспечивающего высокую стабильность тока при всех условиях эксплуатации и при широких изменениях тока нагрузки.

Степенью увеличения тока через светодиоды может служить величина относительного увеличения напряжения $U_{\text{сф}}^{\text{рез}}$, которая выражается равенством:

$$\delta_U = \frac{U_{\text{сф}}^{\text{рез}}}{U_{\text{сф}}^{\text{смеш}}}, \quad (2.21)$$

аргументы которого находятся из уравнений (2.20) и (2.19).

Для обеспечения надежного функционирования светофоров требуется, чтобы при использовании кабеля различной длины l_k напряжение $U_{\text{сф}}$ оставалось в пределах нормированных значений, для которых обеспечивается заданная яркость излучения светодиодов. Практически величина l_k для выходных или переездных светодиодных светофоров со смешанным соединением светодиодов в СДМ составляет несколько десятков метров, а, например, у входных светофоров длина сигнального кабеля может составлять 1-2 км. Для таких больших расстояний применение параллельно включенных жил кабеля становится экономически нецелесообразным, и приходится применять специальные структурные схемы организации управления светофорами в горловинах станций. Примером является питание светофоров высоким переменным напряжением через сигнальный трансформатор и соответствующий выпрямитель. При этом возникает проблема появлением эффекта засветки ненадлежащего показания светофора из-за влияния емкостей между жилами и между парами жил в сигнальном кабеле. Очевидно, что применение высокого постоянного напряжения может исключить эту проблему и одновременно дает возможность убрать из состава аппаратуры сигнальные трансформаторы и выпрямители.

Сопротивление жил сигнального кабеля равно: $R_{\text{каб}} = 2 \frac{l_k \rho}{l}$, где ρ – удельное сопротивление одной жилы кабеля, Ом/км; l – количество параллельных жил кабеля (с учетом прямой и обратной жил). Тогда падение напряжения на кабеле для светофоров (рисунки 2.4, 2.1, а) при равных удаленности от поста управления l_k и

количестве параллельно включенных жил l определится соответствующими выражениями:

$$\Delta U_{\text{каб}}^{\text{рез}} = 2I_{\text{св}} \frac{l_{\text{к}} \rho}{l}; \quad (2.22, a)$$

$$\Delta U_{\text{каб}}^{\text{смеш}} = 2mI_{\text{св}} \frac{l_{\text{к}} \rho}{l}. \quad (2.22, б)$$

Из этих выражений могут быть получены соответствующие формулы для расчета длины кабеля для заданных допустимых величин падения напряжения в кабеле:

$$l_{\text{к}} = \frac{\Delta U_{\text{каб}}^{\text{рез}}}{2I_{\text{св}} \rho}, \quad (2.23, a)$$

$$l_{\text{к}} = \frac{\Delta U_{\text{каб}}^{\text{смеш}}}{2mI_{\text{св}} \rho}. \quad (2.23, б)$$

На графиках рисунка 2.7 приведены рассчитанные по формуле (2.23, б) данные допустимой длины кабеля различных схем светофоров для равных заданных величин падения напряжения $\Delta U_{\text{каб}} = 10 \text{ В}$, $\rho = 48 \text{ Ом/км}$ (для используемой жилы диаметром $d = 0,7 \text{ мм}$ стандартного кабеля СЦБ), $l = 1$, где график $m = 1$ соответствует схеме резервированного светофора.

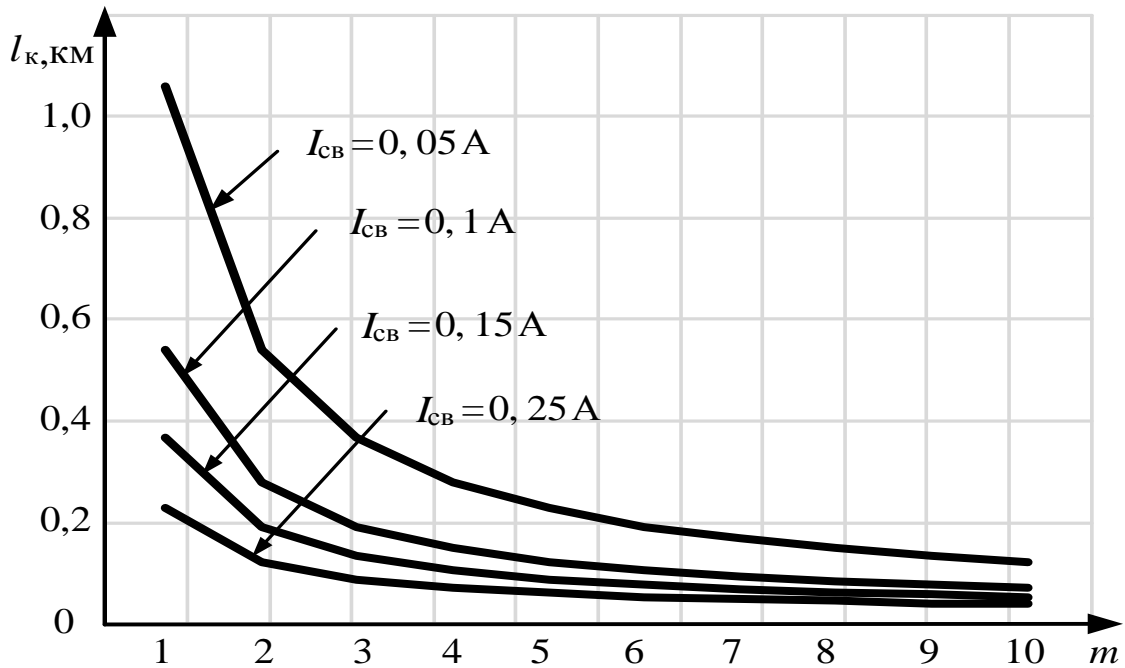


Рисунок 2.7 – Зависимость длины кабеля от параметров СДМ

Графики рисунка 2.7 показывают существенную нелинейность допустимой длины кабеля управления светофором от числа m . Этот же вывод можно сделать и относительно тока через светодиоды $I_{\text{св}}$, что обуславливает тот факт, что увеличение количество n светодиодов в последовательной цепи их соединения приводит к возможности увеличения длины кабеля. Однако этот вывод справедлив для равенства $k = m \cdot n = \text{const}$, то есть для светофоров с одинаковым суммарным количеством светодиодов в СДМ.

Если принять, что величина напряжения E_T является независимой переменной, которая может задаваться при проектировании схемы светофора, то напряжение на входе схем светофоров по рисункам 2.4 и 2.1, a выражается соответствующими уравнениями:

$$U_{\text{сф}}^{\text{рез}} = (U_{\text{св.0}}^{\text{очн}} + I_{\text{св}} R_{\text{дф}}^{\text{очн}}) n; \quad (2.24, a)$$

$$U_{\text{сф}}^{\text{смеш}} = I_{\text{св}} R_T + (U_{\text{св.0}} + I_{\text{св}} R_{\text{дф}}) n, \quad (2.24, б)$$

где в формуле (2.24, *a*) принято, что резервированный светофор функционирует в нормальном режиме работы.

Анализ полученных выражений позволяет выявить некоторые закономерности функционирования различных типов светодиодных светофоров и предложить пути улучшения их характеристик.

Обеспечение долговечности функционирования резервированного светофора при отказе на обрыв одного или нескольких светодиодов возможно при определенных соотношениях ВАХ полупроводниковых приборов, входящих в его состав, которые определяются формулами (2.13) и (2.18) с учетом величины температурного коэффициента напряжения, определяемого выражением (2.16).

Как видно из выражений (2.23, *a*) и (2.23, *б*), применение резервированного светофора с резервированным включением элементов СДМ, где $m = 1$, позволяет существенно увеличить длины сигнального кабеля, что наиболее актуально для входных светофоров станций с центральным управлением, расстояние до которых в горловине станций велико. Это приводит к упрощению схем управления светофорами и снижению их стоимости. В этой части наибольший выигрыш по отношению к устройствам со смешанным соединением светодиодов в СДМ будет от применения схемы резервированного светофора в случае использования СДМ с большим количеством последовательно включенных светодиодов n . Одновременно с этим применение подобной схемы рационально для перегонных устройств с управлением устройствами СЦБ, в частности, перегонными светофорами со станции. Это же может относиться и к известным системам ЦАБ и функционально аналогичным устройствам железнодорожной автоматики и телемеханики.

2.3 Выводы и заключение по главе 2

Приведенный в настоящей главе диссертации анализ процессов работы известных и предложенных схем включения светодиодов в СДМ светофоров с пи-

танием от источника постоянного напряжения определил следующие закономерности их разработки, функционирования и эксплуатации.

1. Известные и широко применяющиеся схемы светодиодных светофоров обладают невысокой энергетической эффективностью, что обусловлено необходимостью применения в них смешанного соединения светодиодов в СДМ, когда обычно имеет место неравенство: $m > n$.

2. Длина сигнального кабеля от светофора до поста управления в известных схемах светофоров при питании светофора от постоянного напряжения невелика и не превышает нескольких десятков метров. Причина этого заключается в том, что число n последовательно включаемых светодиодов в СДМ подобных светофоров невелико.

3. Вследствие наличия некоторого количества последовательно включаемых светодиодов в каждой параллельной цепи в типовых схемах управления светофором долговечность функционирования светодиодных светофоров невелика и при обрыве в последовательной цепи яркость излучения СДМ существенно снижается.

4. Выполненный анализ предложенных оригинальных схем светодиодных светофоров показывает, что они имеют преимущества перед известными и их применение на сети железных дорог предпочтительно.

5. Применение схемы резервированного светодиодного светофора не только увеличивает долговечность его работы, но и создает предпосылки диагностики функционирования СДМ при наличии в ней отказов одного или нескольких светодиодов путем субъективной оценки яркости его излучения.

6. Анализируемая схема резервированного светодиодного светофора за счет возможности повышения напряжения питания позволяет осуществлять централизованное управление светофорами при существенно больших длинах сигнальных кабелей, что позволяет реализовать более простую и экономически эффективную структуру управления выходными, маневровыми и входными светофорами на станциях.

ГЛАВА 3

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ВОПРОСОВ ПОВЫШЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СВЕТОДИОДНЫХ СВЕТОФОРОВ ПЕРЕМЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

3.1. Исследование влияния емкостей между соседними парами жил сигнального кабеля на функционирование светофора

В общем объеме инфраструктуры устройств автоматики и телемеханики железнодорожного транспорта значительная часть светофоров располагается на большом расстоянии от устройств управления. В частности, это относится к стационарным светофорам с централизованным питанием и управлением от поста электрической централизации или к системам автоматики с централизованным управлением объектами. При этом возникает вопрос о необходимости исключения засветки ненадлежащего показания светофора, которая может возникать из-за влияния паразитных емкостей, существующих между жилами сигнальных кабелей.

Практически это решается путем ограничения длины сигнального кабеля от поста управления до светофора, которая задается в соответствующих нормативных документах [106, 107]. Типичные погонные параметры наиболее широко применяемых кабелей СЦБ: емкость между жилами кабеля $C_{\text{ж}} = 1000$ нФ/км, сопротивление жилы кабеля $R_{\text{ж}} = 25$ Ом/км при диаметре жилы $d_{\text{ж}} = 1,0$ мм [108]. Очевидно, что приведенное значение емкости ориентировочно, так как геометрическое пространственное расположение жил в кабеле и их скрутках между собой не может быть определено достаточно точно. Для компенсации падения напряжения в длинных сигнальных кабелях требуется увеличение количества параллельно включенных жил кабеля. При этом изменяется соотношение емкостей между жилами внутри одной сигнальной пары и между различными сигнальными парами

показаний светофора. Поэтому введение параллельно включенных жил кабелей при неопределенности величин названных емкостей может ухудшить условия для появления засветки ненадлежащего показания светофора. Кроме того, применение сигнальных кабелей с парной скруткой жил усложняет анализ и практический учет негативного влияния емкости как между основной парой жил светофора, так и между этой и другой парой в другой скрутке показания светофора. В настоящее время вопрос определения максимальной длины сигнальных кабелей решается эмпирически и не обладает достаточной степенью точности и гарантированности не появления эффекта засветки ненадлежащего показания.

Как указывается в [106], при больших длинах кабеля для исключения засветки ненадлежащего сигнала светофора иногда приходится размещать сигнальные жилы для различных показаний светофора в отдельных кабелях. Это приводит к возрастанию стоимости кабельных сетей, обуславливает увеличение эксплуатационных расходов и снижение надежности работы станционных устройств СЦБ.

Проблема исключения засветки обостряется в настоящее время в связи с широким внедрением светодиодных светофоров, которые обладают существенно меньшим потреблением мощности по отношению к светофорам с лампами накаливания, что обуславливает намного большую степень влияния емкостей в кабеле на возможность появления засветки ненадлежащего показания [73]. Кроме того, необходимость пропуска тяжеловесных поездов требует увеличения длин станционных путей, что приводит к увеличению длин сигнальных кабелей.

В качестве излучателя светодиодного светофора используется светодиодная матрица (СДМ), состоящая, как было показано выше, из светодиодов суммарным количеством равным: $k = m \cdot n$, где m – число параллельно включенных цепочек, каждая из которых состоит из n последовательно соединенных единичных светодиодов.

Выполним анализ функционирования светофора с удаленным управлением по кабельной линии с учетом негативного влияния паразитных емкостей между

жилами кабеля по одной сигнальной паре и между парами различных показаний светофора.

Известно, что питание стационарного светофора по кабелю осуществляется от источника переменного напряжения $U_{\text{вх}}$ (обычно 220 В) частоты $f = 50$ Гц, где требуемое снижение напряжения непосредственно для излучателя осуществляется при помощи сигнального трансформатора СТ. При необходимости вводится соответствующий выпрямитель с источником тока для формирования токов через светодиоды СДМ.

Рассмотрим вольтамперные характеристики (ВАХ) лампы накаливания и светодиода (рисунок 3.1, а, б). Очевидно, что если вольтамперная характеристика лампы накаливания с некоторой степенью приближения может быть принята за линейную, то для СДМ эта характеристика является существенно нелинейной.

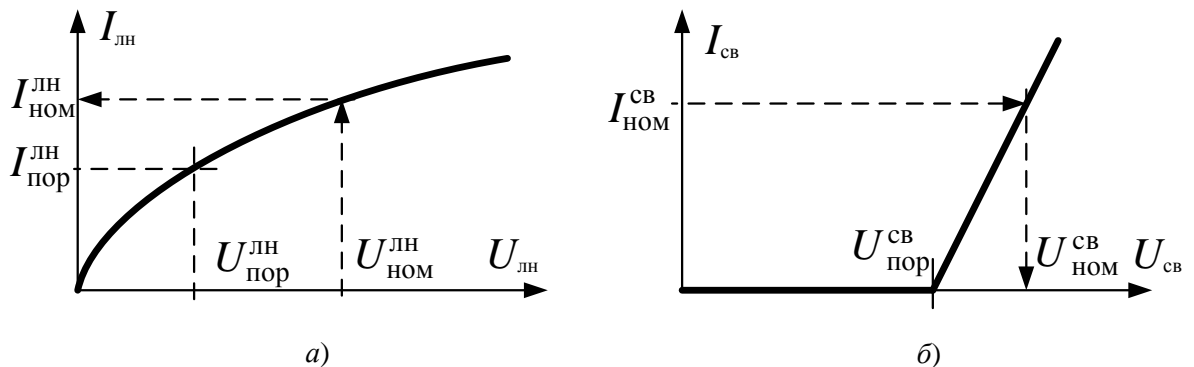


Рисунок 3.1– Вольтамперные характеристики лампы накаливания (а)и светодиода (б)

Варианты схем излучателей, соответствующие применению в светофоре лампы накаливания и СДМ, показаны на рисунках 3.2, а, б.

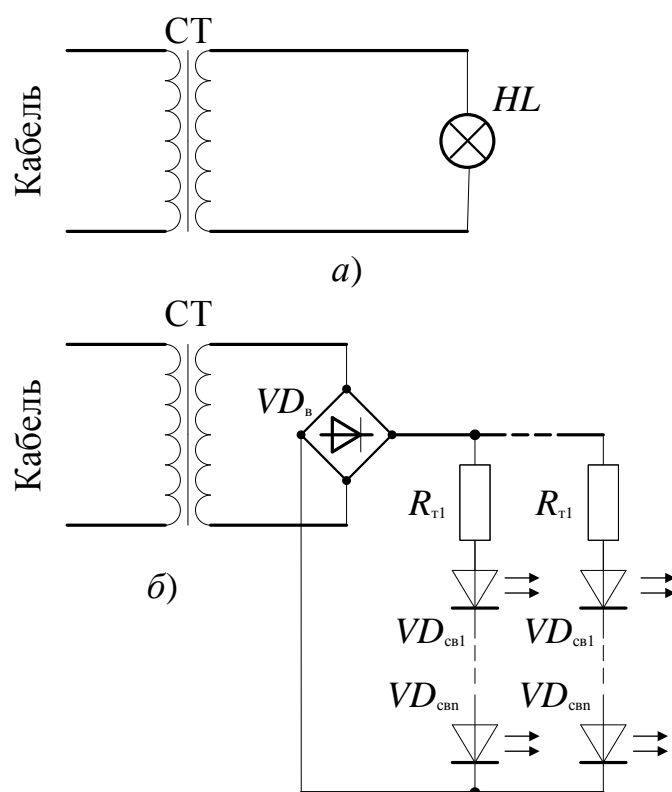


Рисунок 3.2 – Варианты схем подключения излучателей светофора, лампы накаливания (а) и СДМ (б)

Номинальный режим излучения лампового светофора обеспечивается путем задания напряжения $U_{\text{НОМ}}^{\text{ЛН}}$, а у светодиодного светофора задающим параметром является ток $I_{\text{НОМ}}^{\text{СВ}}$, что показано стрелками на ВАХ (рисунки 3.1, а, б). Известно, что в отличие от ламп накаливания практические значения величин напряжений $U_{\text{НОМ}}^{\text{СВ}}$ и $U_{\text{ПОР}}^{\text{СВ}}$ имеют значительный технологический и температурный разброс при любых значениях тока $I_{\text{СВ}}$, в том числе и при $I_{\text{НОМ}}^{\text{СВ}} = \text{const}$, $I_{\text{НОМ}}^{\text{СВ}} = 0$. Это определяет тот факт, что если пороговое напряжение $U_{\text{ПОР}}^{\text{ЛН}}$ для конкретного типа лампы накаливания может быть принято за нормированную величину, то напряжение $U_{\text{ПОР}}^{\text{СВ}}$, определяющее начало излучения СДМ, является в некоторых пределах неопределенной величиной.

Входное напряжение излучателя, которое может быть принято за исходную точку при назначении нормы недопустимого уровня напряжения на входе лампы-

вого светофора (рисунок 3.1, *a*), при котором отсутствует его излучение, должна соответствовать неравенству:

$$U_{\text{вх}}^{\text{лн}} < U_{\text{пор}}^{\text{лн}}. \quad (3.1)$$

Для светодиодного светофора (рисунок 3.1, *б*), где для задания тока через светодиоды СДМ применяются активные резисторы $R_{\text{т}}$, аналогичное неравенство имеет вид

$$U_{\text{вх}}^{\text{св}} < (nU_{\text{пор}}^{\text{св}} + U_{\text{впр}} + U_{\text{ток}}), \quad (3.2)$$

где $U_{\text{ток}}$ – падение напряжения на токозадающих резисторах $R_{\text{т}}$.

Так как для питания СДМ требуется постоянное напряжение, то в выражении (3.2) величина $U_{\text{впр}}$ соответствует падению напряжения на выпрямителе $VD_{\text{в}}$ (рисунок 3.2, *б*), включенном на выходе сигнального трансформатора. Обычно в качестве выпрямителя используется мостовая схема, поэтому напряжение $U_{\text{впр}}$ равно падению напряжения на двух последовательно включенных выпрямительных диодах.

Практически для ламповых и светодиодных светофоров выполняется соотношение: $U_{\text{вх}}^{\text{лн}} > U_{\text{вх}}^{\text{св}}$. То есть, с точки зрения появления и негативного влияния эффекта засветки ненадлежащего показания, светофоры с применением СДМ являются менее эффективными, что может нарушить условия безопасности движения поездов.

Обобщенный принцип функционирования светофора и емкостного взаимодействия двух кабельных пар в одном сигнальном кабеле показан на структурной схеме рисунка 3.3. Она справедлива как для ламповых, так и для светодиодных светофоров. Здесь для показанного состояния контактов сигнальных реле СР1 и СР2 указаны состояния функционирования двух излучателей схемы, подключенных к посту управления через две пары жил одного кабеля длиной $l_{\text{к}}$. Рассмотрим

случай функционирования светофора, когда для обеспечения требований безопасности движения первый из излучателей – Изл.1 излучать не должен, второй Изл.2 – должен излучать.

Каждый из резисторов $R11$, $R12$ и $R21$, $R22$ выражает половину суммарного активного сопротивления прямой и обратной жил первой и второй пар жил кабеля. Первая пара жил кабеля, ведущая к излучателю Изл.1, отключена от источника переменного напряжения $U_{вх}$ контактом сигнального реле CP1.

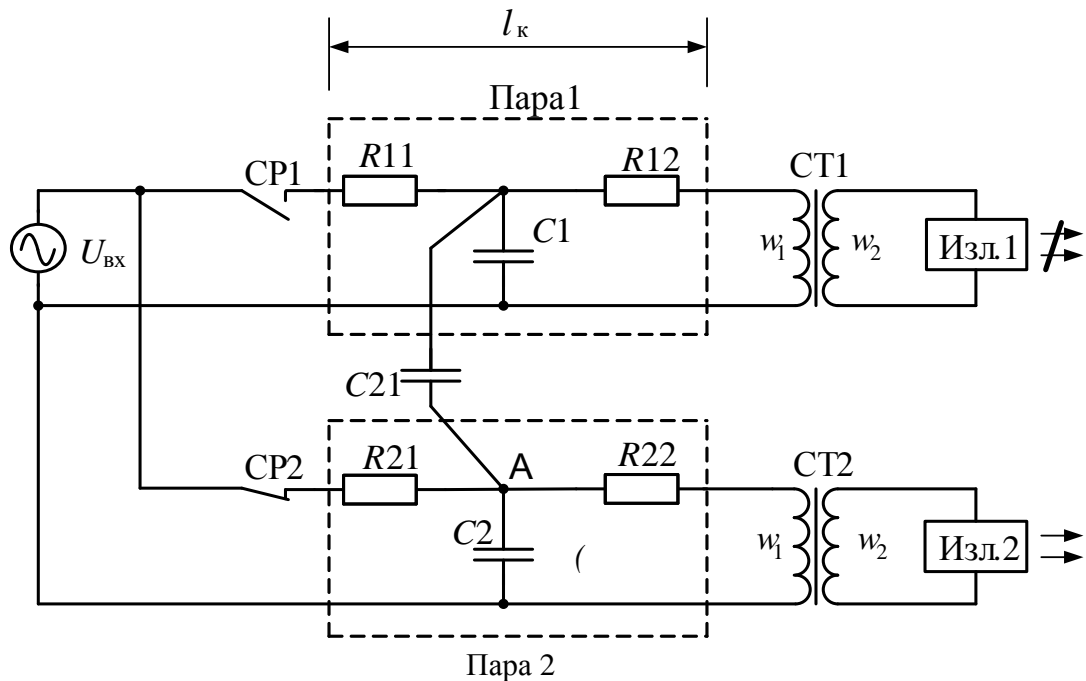


Рисунок 3.3– Структурная схема подключения удаленного светофора по сигнальной кабельной линии

Вторая пара жил подключена к излучателю Изл.2 и напряжению $U_{вх}$ замкнутым контактом другого сигнального реле CP2.

Таким образом, в показанном состоянии сигнальных реле CP1 и CP2 излучение Изл.1 должно отсутствовать. Переменное напряжение, существующее во второй паре, через емкость $C21$ воздействует на первую пару, в которой напряжение и ток для исключения излучения должны отсутствовать.

Электрическая эквивалентная схема светофора, соответствующая показанному на схеме рисунка 3.3 состоянию контактов сигнальных реле СР1 (разомкнутому) и СР2 (замкнутому), приведена на рисунке 3.4.

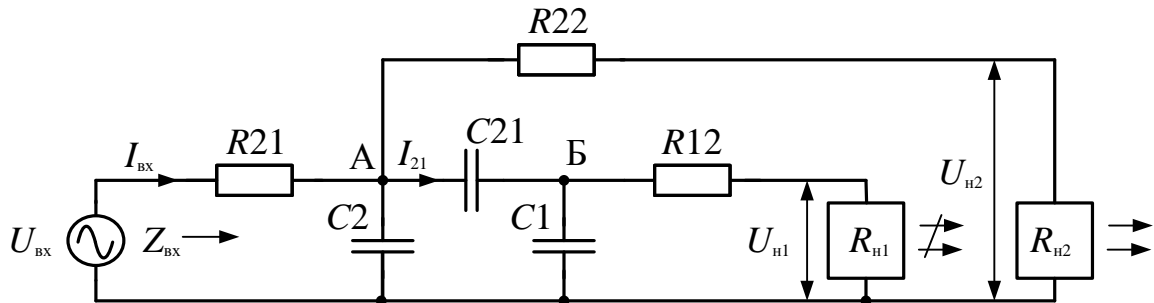


Рисунок 3.4 – Эквивалентная схема светофора, соответствующая замкнутому состоянию контакта сигнального реле СР2

Здесь принято, что сигнальные трансформаторы СТ1 и СТ2 входят в состав излучателей R_{H1} и R_{H2} . Кроме того, примем также, что индуктивность намагничивания сигнальных трансформаторов равна: $L_{\mu} = \infty$, индуктивность рассеяния обмоток сигнального трансформатора: $L_S = 0$, а активное сопротивление обмоток трансформаторов: $R_{w1} = 0$, $R_{w2} = 0$.

При использовании в качестве излучателей ламп накаливания величина сопротивлений R_{H1} и R_{H2} может быть найдена исходя из величины активной мощности, которую они потребляют. Если в качестве излучателей используются светодиоды, то в состав этих сопротивлений входят параметры вольтамперных характеристик выпрямительных диодов и СДМ с учетом количества m и n входящих в нее светодиодов.

Определим процессы передачи напряжения от источника U_{BX} на излучающий излучатель R_{H2} .

В соответствии с эквивалентной схемой рисунка 3.4, суммарный входной ток, потребляемый светофором, состоящим из двух показаний, от источника переменного напряжения U_{BX} (одно из показаний светофора излучает, у другого излучение должно отсутствовать) определяется выражением:

$$I_{\text{вх}} = U_{\text{вх}} \frac{X_2 + \frac{R_2 \left(X_{21} + \frac{R_1 X_1}{R_1 + X_1} \right)}{R_2 + X_{21} + \frac{R_1 X_1}{R_1 + X_1}}}{\frac{X_2 R_2 \left(X_{21} + \frac{R_1 X_1}{R_1 + X_1} \right)}{R_2 + X_{21} + \frac{R_1 X_1}{R_1 + X_1}}}, \quad (3.3)$$

где $R_1 = R_{12} + R_{\text{н1}}$; $R_2 = R_{22} + R_{\text{н2}}$; $X_1 = \frac{1}{2\pi f C_1}$; $X_{21} = \frac{1}{2\pi f C_{21}}$; $X_2 = \frac{1}{2\pi f C_2}$.

Так как величина напряжения в точке А схемы рисунка 3.4 определяется величиной $U_A = U_{\text{вх}} - I_{\text{вх}} R_{21}$, то напряжение на входе излучателя Изл.2, который находится в состоянии излучения, определится:

$$U_{\text{н2}} = \frac{U_A R_{\text{н2}}}{R_{22} + R_{\text{н2}}}. \quad (3.4)$$

Откуда после соответствующих подстановок и преобразований получим:

$$U_{\text{н2}} = \left(\frac{U_{\text{вх}} R_{\text{н2}}}{R_{22} + R_{\text{н2}}} \right) \left\{ 1 - R_{21} \left[\frac{X_2 + \frac{R_2 \left(X_{21} + \frac{R_1 X_1}{R_1 + X_1} \right)}{R_2 + X_{21} + \frac{R_1 X_1}{R_1 + X_1}}}{\frac{X_2 R_2 \left(X_{21} + \frac{R_1 X_1}{R_1 + X_1} \right)}{R_2 + X_{21} + \frac{R_1 X_1}{R_1 + X_1}}} \right] \right\}. \quad (3.5)$$

Анализ выражения (3.5) показывает, что увеличение сопротивления $R_{\text{н2}}$ и уменьшение сопротивления R_{22} обуславливают увеличение напряжения $U_{\text{н2}}$. Получение величины напряжения $U_{\text{н2}}$, достаточной для выполнения требуемых норм яркости излучения излучателя $R_{\text{н2}}$, обычно не вызывает затруднений, в частности, за счет возможности увеличения значения напряжения $U_{\text{вх}}$ или соответствующего

изменения коэффициента трансформации сигнальных трансформаторов СТ (рисунок 3.3), что реализуется переключением выводов их вторичных обмоток.

Уравнение (3.5) определяет величину переменного напряжения на первичной обмотке сигнального трансформатора СТ2. С учетом выражений (3.1) и (3.2) для создания требуемой яркости излучения соответствующего показания светофора величина напряжения на лампе накаливания и на светодиодах СДМ определяется соответственно следующими выражениями:

$$U_{\text{лн}} = \frac{U_{\text{н2}}}{n_2}; \quad (3.6)$$

$$U_{\text{СДМ}} = \frac{U_{\text{н2}}}{n_2} - U_{\text{впр}}, \quad (3.7)$$

где $n_2 = \frac{w_1}{w_2}$ – коэффициент трансформации СТ2, который, в частности, для сигнального трансформатора типа СТ-5 равен $n = 18,3$ с возможностью подстройки в пределах $\Delta n = \pm 10 \%$.

Таким образом, выражения (3.4), (3.6) и (3.7) позволяют определить параметры схемы управления светофором для каждого из применяемых видов излучателей, находящегося в состоянии излучения, и найти требуемый коэффициент трансформации СТ2.

Рассмотрим процессы передачи напряжения $U_{\text{вх}}$ на излучатель $R_{\text{н1}}$, который в схеме рисунка 3.4 излучать не должен.

Напряжение в точке Б схемы рисунка 3.4 равно $U_{\text{Б}} = U_{\text{А}} - I_{21} X_{21}$, где ток I_{21} , определяющий возможность появления подсветки излучателя $R_{\text{н1}}$, находится из уравнения:

$$I_{21} = \frac{U_{\text{вх}} - I_{\text{вх}} R_{21}}{X_{21} + \frac{(R_{12} + R_{\text{н1}}) X_1}{R_{12} + R_{\text{н1}} + X_1}}. \quad (3.8)$$

Так как сопротивление X_{21} выражает величину емкости между соседними жилами кабеля, то уменьшение этого сопротивления приводит к закономерному увеличению тока I_{21} . Одновременно с этим уменьшение сопротивления X_1 обуславливает увеличение тока I_{21} , однако, так как емкость C_1 включена параллельно нагрузке этой части схемы, то это вызовет снижение напряжения на излучателе $R_{н1}$. Следовательно, показанное на схеме рисунка 3.4 соединение емкостей C_{21} и C_1 является делителем напряжения, соотношение сопротивлений которого в наиболее значительной степени определяет величину напряжения на излучателе $R_{н1}$, который излучать не должен. В частности, как видно из выражения (3.8), при $C_{21} = 0$, что соответствует значению $X_{21} = \infty$, получим величину $I_{21} = 0$.

Напряжение в точке Б схемы рисунка. 3.4 находится:

$$U_B = U_A \left[1 - \frac{X_{21}}{X_{21} + \frac{(R_{12} + R_{н1}) X_1}{R_{12} + R_{н1} + X_1}} \right], \quad (3.9)$$

где

$$U_A = U_{вх} \left[1 - R_{21} \frac{X_2 + \frac{R_{21} \left(X_{21} + \frac{R_1 X_1}{R_1 + X_1} \right)}{R_{21} + X_{21} + \frac{R_1 X_1}{R_1 + X_1}}}{\frac{X_2 R_{21} \left(X_{21} + \frac{R_1 X_1}{R_1 + X_1} \right)}{R_{21} + X_{21} + \frac{R_1 X_1}{R_1 + X_1}}} \right]. \quad (3.10)$$

На основании выражения (3.9) после соответствующих преобразований напряжение на излучателе $R_{н1}$ определится:

$$U_{н1} = \frac{U_A R_{н1}}{R_{н1} + R12} \left[1 - \frac{X21}{X21 + \frac{(R12 + R_{н1}) X1}{R12 + R_{н1} + X1}} \right]. \quad (3.11)$$

Напряжение непосредственно на излучателе $R_{н1}$ находится из выражений (3.6) и (3.7) с заменой величины коэффициента трансформации n_2 на величину n_1 и напряжения $U_{н2}$ на $U_{н1}$. При этом для исключения подсветки ненадлежащего показания светофора получившееся значение $U_{н1}$ должно удовлетворять условиям неравенств (3.1) или (3.2) в зависимости от вида излучателя: с лампой накаливания или с СДМ.

Следовательно, полученные выражения позволяют рассчитать величины напряжений на излучателях двух типов: с лампой накаливания и со светодиодной матрицей. Это позволяет определить максимальную длину кабеля, при которой напряжение на излучателе, который не должен излучать, не превысит величин, задаваемых выражениями (3.1) или (3.2). В полной мере это относится и к резервированным светодиодным светофорам, схемотехническое построение которых позволяет реализовать принципиально новый подход к повышению надежности их работы.

Определим закономерности изменения напряжения на излучателях Изл.1 и Изл.2 схем управления светофором при изменении входящих в эту схему параметров. Примем, что искомыми и анализируемыми выходными параметрами являются напряжения $U_{н1}$ и $U_{н2}$, соответствующие напряжениям на входе сигнальных трансформаторов СТ1 и СТ2 соответственно. Это обусловлено тем, что выполняемый анализ должен быть применим как для ламповых излучателей, так и для светодиодных. Пересчет напряжений $U_{н1}$ и $U_{н2}$ в напряжения непосредственно на излучателях того или иного типа может быть выполнен при помощи простых выражений (3.6) и (3.7) с учетом параметров источника тока для светодиодных светофоров. Это допущение дает возможность получить достаточно наглядные результаты исследования и вполне корректные практические результаты, которые

можно применять на практике при выборе возможности или невозможности использования той или иной схемы управления светофором.

С учетом принятого допущения результаты расчета по полученным уравнениям приведены на графиках (рисунки 3.5–3.10). Их анализ позволяет сделать следующие основные выводы.

График рисунка 3.5 иллюстрирует зависимость напряжения $U_{н1}$ на излучателе Изл.1 (который излучать не должен) при использовании излучателей с различной потребляемой мощностью $P_{н1}$ для двух величин погонных емкостей между жилами кабелей, входящих в схему светофора: $C_{каб} = 500$ нФ/км и $C_{каб} = 1500$ нФ/км. Здесь и далее принято, что входное переменное напряжение схемы управления светофором: $U_{вх} = 220$ В, а по потребляемой мощности $P_{н}$ оба излучателя Изл.1 и Изл.2 идентичны. Для выполнения условий безопасности необходимо, чтобы при всех значениях параметров элементов схемы управления светофором напряжение $U_{изл1}$ было минимальным.

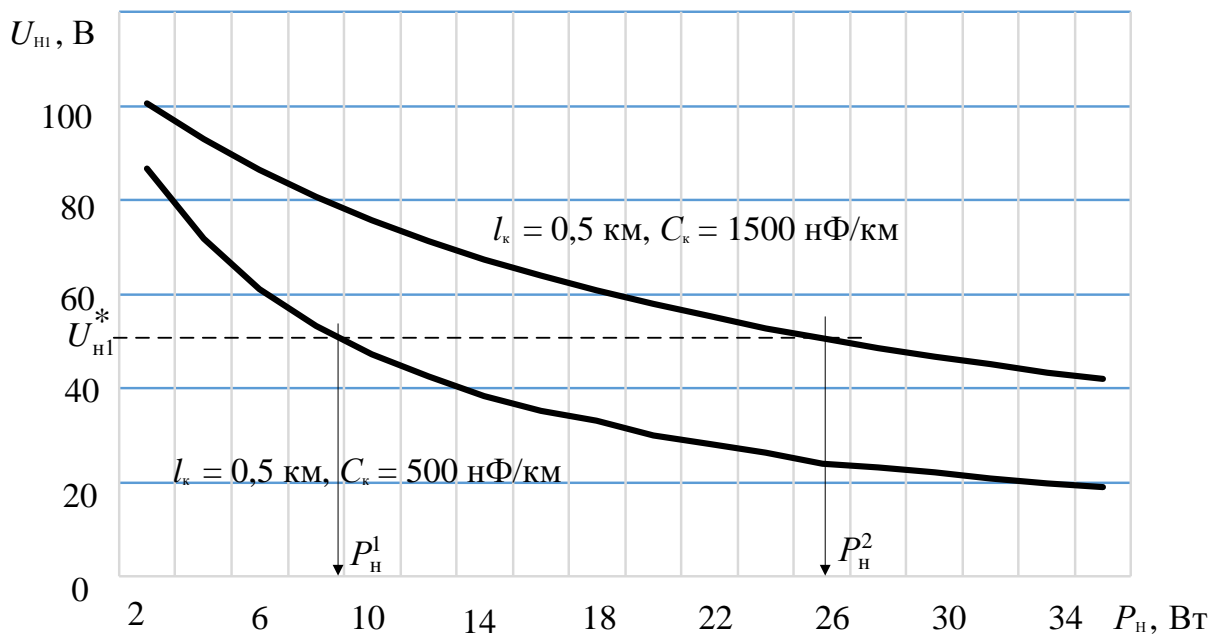


Рисунок 3.5 –График зависимости $U_{н1}=f(P_{н})$ для длины сигнала кабеля $l_k = 0,5$ км

Очевидно, что при нахождении точки $U_{н1}^*$, которая будет определять отсутствие засветки ненадлежащего показания светофора, необходимо назначить величину относительного напряжения на этом излучателе: $\delta_{н1} = \frac{U_{н1}^*}{U_{вх}}$, для выбранной величины мощности $P_{н1}$ излучателя Изл.1. В частности, на графике (рисунок 3.5) значение напряжения $U_{н1}^*$ показано линией, параллельной оси мощности излучателей.

График (рисунок 3.5) показывает, что если для системы управления светофором назначено показанное максимально допустимое напряжение $U_{н}^*$, то для значений $l_k = 0,5$ км, $C_k = 500$ нФ/км работоспособность схемы будет обеспечена при выполнении условия: $P_{н} > P_{н}^1$. Для больших значений емкости C_k , то есть для области параметров $l_k = 0,5$ км, $C_k = 1500$ нФ/км, получим подобное условие: $P_{н} > P_{н}^2$. Как видно, увеличение емкости C_k приводит к уменьшению диапазона возможных минимально допустимых величин мощности излучателей $P_{н}$.

На рисунке 3.6 приведены зависимости тех же функций, но при увеличенной длине кабеля $l_k = 2$ км. Сравнение графиков (рисунки 3.5 и 3.6) показывает, что возрастание длины кабеля обуславливает уменьшение области минимально допустимых значений мощности $P_{н}$.

Приведенные данные свидетельствуют, что уменьшение мощности, потребляемой излучателями, существенно сужает области работоспособности светофора при увеличении длины сигнального кабеля. Следовательно, в этом отношении наиболее критичными являются схемы светофоров с применением СДМ, энергопотребление которых существенно меньше чем у ламповых.

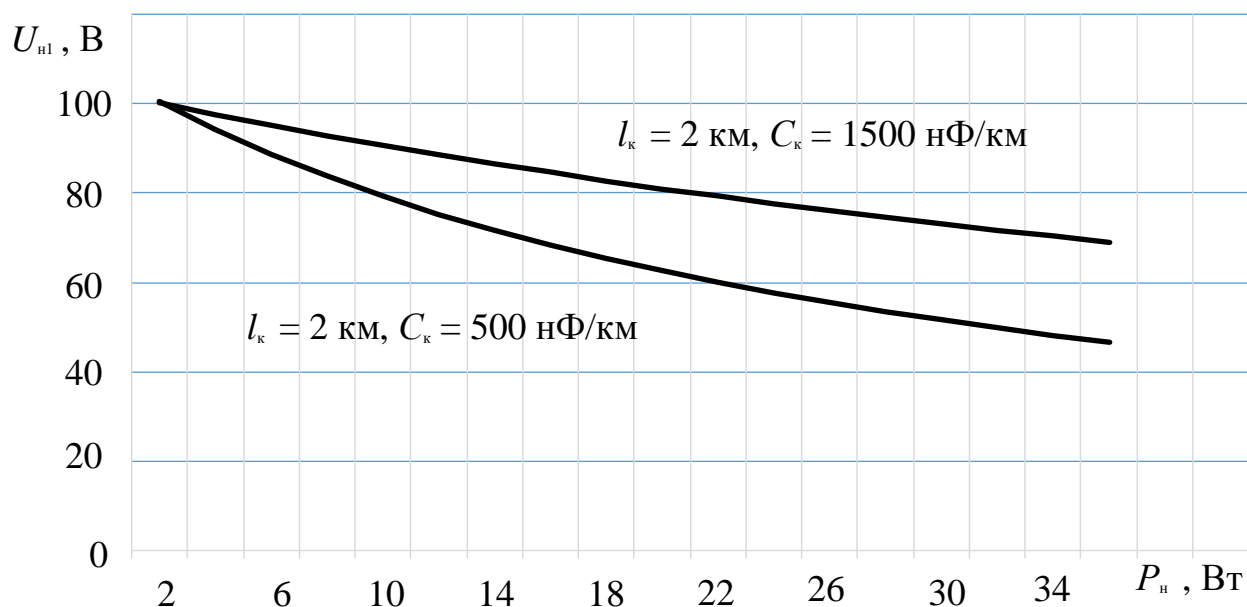


Рисунок 3.6 – График зависимости $U_{н1} = f(P_{н})$ для длины сигнального кабеля $l_{к} = 2$ км

Следовательно, графики свидетельствуют о меньшей степени негативного влияния емкостей кабеля на систему управления светофоров с ламповым излучателем. В качестве примера можно рассмотреть области изменения показанных на графиках функций при значениях мощности $P_{н}$ в несколько десятков ватт. Если в настоящее время существуют ограничения на максимально допустимое значение длины сигнального кабеля для ламповых светофоров, то очевидно, что применение светофоров с СДМ в аналогичных случаях невозможно даже при длинах сигнального кабеля в несколько десятков метров. Это подтверждается на практике тем, что светодиодные светофоры обычно не применяются в централизованных стационарных системах управления светофорами со значительными длинами сигнальных кабелей.

Наличие емкостей $C_{к}$ сказывается и на величине напряжения на нормально функционирующем излучателе Изл.2 (рисунок 3.7). Здесь уменьшение напряжения $U_{н2}$ при увеличении длины сигнального кабеля $l_{к}$ обусловливается шунтирующим влиянием емкости во входной цепи $R21C2$.

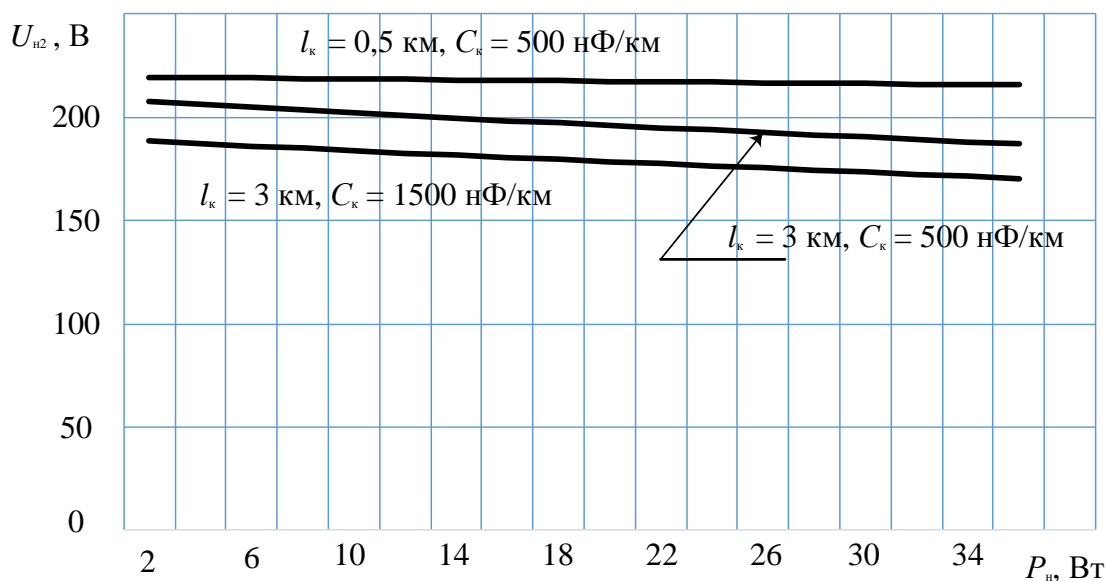


Рисунок 3.7 – График зависимости $U_{н2} = f(P_n)$
для различных длин сигнального кабеля l_k и емкости C_k

Таким образом, величины емкостей C_k определяют не только наличие или отсутствие засветки ненадлежащего показания светофора, но их величина также влияет на напряжение на нормально излучающем излучателе Изл.2. Причем увеличение емкостей C_k приводит к уменьшению напряжения $U_{н2}$. Это требует необходимости увеличения выходного напряжения сигнального трансформатора СТ2, что достигается путем переключения соответствующих выводов его вторичной обмотки.

На графиках рисунков 3.8–3.10 приведены зависимости величины напряжения $U_{н1}$ на излучателе Изл.1 при изменении длины l_k сигнального кабеля для различных значений емкости между парами жил C_k . Они показывают закономерное снижение напряжения $U_{н1}$ с величин 70 и 95 В (рисунок 3.8) до 25 и 49 В (рисунок 3.10) для мощностей, равных 4 и 28 Вт соответственно.

Наиболее значимое снижение величины напряжения $U_{н1}$ при значительных длинах сигнального кабеля (2 км и более) и аналогично больших величинах емкости C_k и больших величинах сопротивления R_{21} (см. рисунок 3.4) обусловлено

снижением коэффициента передачи делителя напряжения, состоящего из сопротивления R_{21} и емкостного сопротивления конденсаторов C_2 , C_{21} и C_1 .

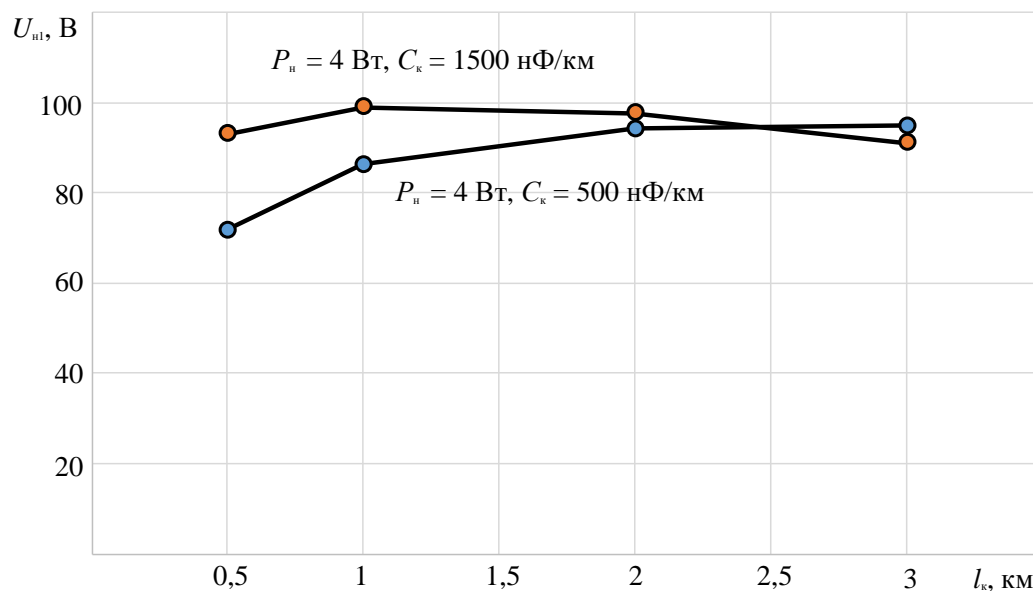


Рисунок 3.8 – График зависимости $U_{н1} = f(l_{к})$ для различных значений емкости $C_{к}$ при мощности, потребляемой излучателем $P_{н} = 4$ Вт

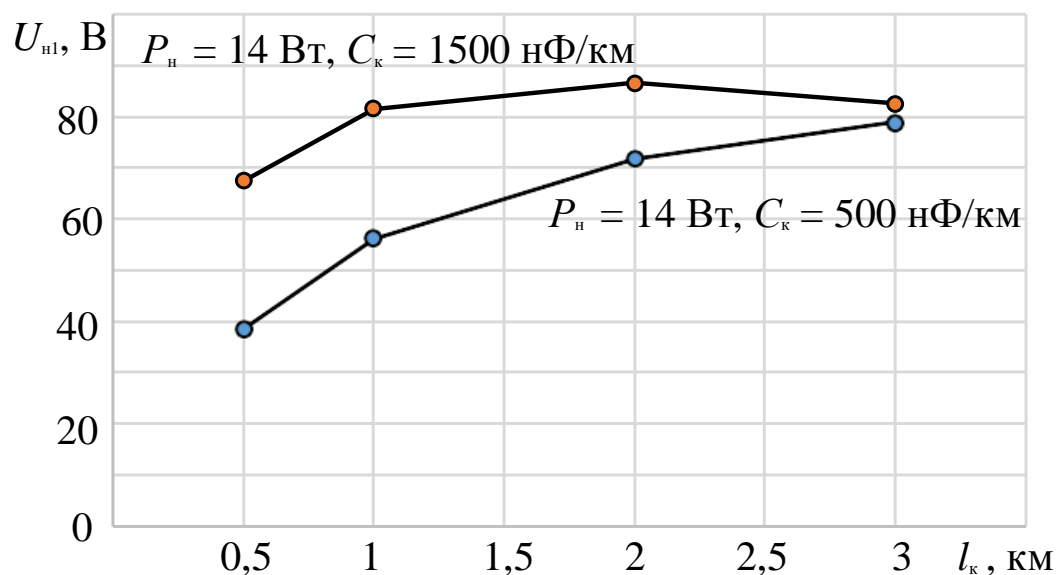


Рисунок 3.9 – График зависимости $U_{н1} = f(l_{к})$ для различных значений емкости $C_{к}$ при мощности, потребляемой излучателем $P_{н} = 14$ Вт

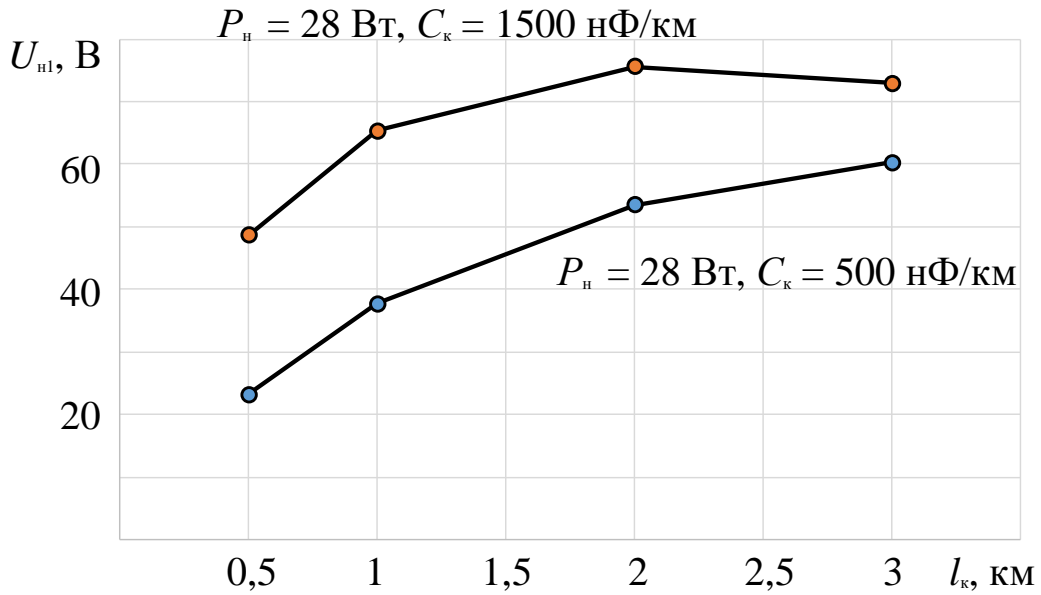


Рисунок 3.10 – График зависимости $U_{н1} = f(l_к)$ для различных значений емкости $C_к$ при мощности, потребляемой излучателем $P_н = 28$ Вт

Таким образом, выполненный анализ схемы централизованного управления светофорами при питании переменным напряжением для различных длин сигнального кабеля показывает невозможность во многих случаях его применения с точки зрения появления негативного эффекта засветки ненадлежащего показания светофора и, соответственно, выполнения требований безопасности движения. Принятый в настоящее время принцип исключения засветки, заключающийся в применении отдельных кабелей для каждого из показаний светофора, экономически нецелесообразен, так как увеличивает объем кабельной сети на станции с соответствующим возрастанием эксплуатационных расходов.

3.2 Направления совершенствования схем управления светофорами при питании от переменного напряжения

Можно определить несколько направлений возможности увеличения длины сигнальных кабелей управления светофорами.

Первый из них заключается в переходе на питание светофора от повышенного постоянного напряжения величиной в несколько десятков вольт и более. Примером этому может служить схема резервированного светодиодного светофора, описанная в главе 2 (см. рисунок 2.4). Наряду с тем, что в этом устройстве обеспечивается исключение параллельных светодиодных цепей, здесь напряжение на входе СДМ увеличивается по сравнению с традиционными схемами до величины

$$U_{\text{сф}} > NU_{\text{св}}, \quad (3.12)$$

где аргументы уравнения соответствуют обозначениям схемы рисунка 2.4. Очевидно, что при выборе величины постоянного напряжения необходимо учитывать падение напряжения на токозадающем резисторе (см. рисунок 2.4) или другом формирователе тока, выполненном, например, на микроэлектронном драйвере.

Практически для применяемого количества светодиодов СДМ, используемых в светофорах, и учитывая, что прямое падение напряжения на светодиоде лежит в пределах $U_{\text{св}} = 0,3\text{--}0,4$ В, напряжение $U_{\text{сф}}$ может достигать величин в несколько десятков вольт и более.

Это техническое решение позволяет не только практически полностью исключить засветку ненадлежащего показания светофора, но и снизить потери мощности в кабеле по отношению к существующим традиционным схемам питания светофоров от источника постоянного напряжения низкого уровня (схемы местного управления светофорами).

Другое техническое решение, исключающее засветку ненадлежащего показания светофора, заключается в том, что при питании светофора от источника переменного напряжения в систему управления светофором вводится вспомогательное реле, контакты которого подключают источник переменного напряжения непосредственно к излучателю.

Схема управления светофором для реализации подобного принципа приведена на рисунке 3.11[80]. Как видно из схемы, появление любого постороннего напряжения в основных жилах сигнального кабеля не приведет к появлению напряжения на излучателе. Здесь в качестве напряжения питания вспомогательного реле ВР может быть использовано стандартное для устройств СЦБ постоянное напряжение 12 или 24 В, а малый ток срабатывания реле не приведет к необходимости введения в кабель дублирующих жил.

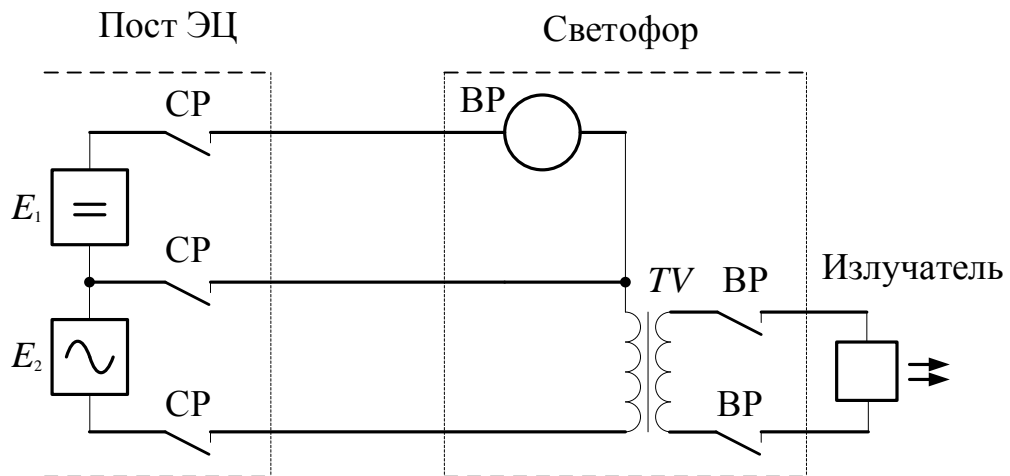


Рисунок 3.11 – Схема управления светофором с однополюсным управлением обмоткой вспомогательного реле ВР

Другой вариант схемы с введением двухполюсного размыкания обмотки при управлении реле ВР, которая повышает надежность работы светофора, приведен на рисунке 3.12.

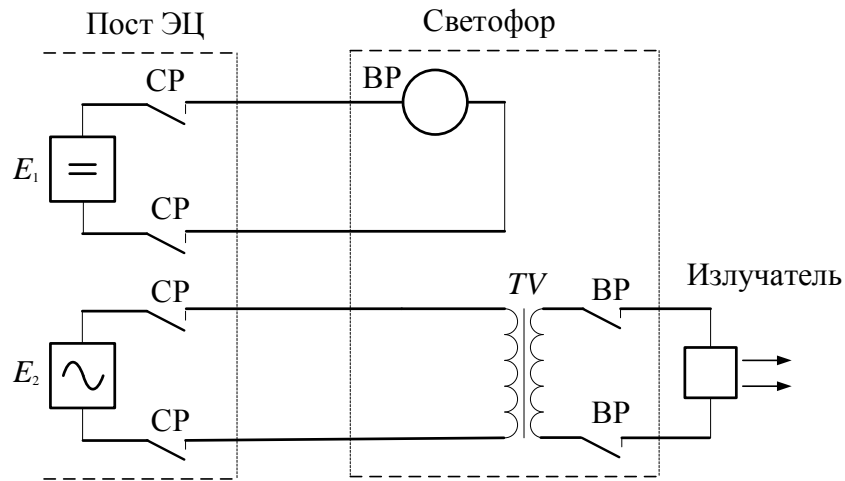


Рисунок 3.12 – Схема управления светофором с двухполюсным управлением обмоткой вспомогательного реле ВР

Другое техническое решение, исключающее засветку ненадлежащего показания светофора при питании его от переменного напряжения, приведено на рисунке 3.13 [82]. Здесь для управления светофором не требуется введения дополнительных жил сигнального кабеля. Управление реле ВР осуществляется при использовании постоянного напряжения E_1 , передаваемого по той же сигнальной кабельной паре, что и переменное напряжение питания излучателя.

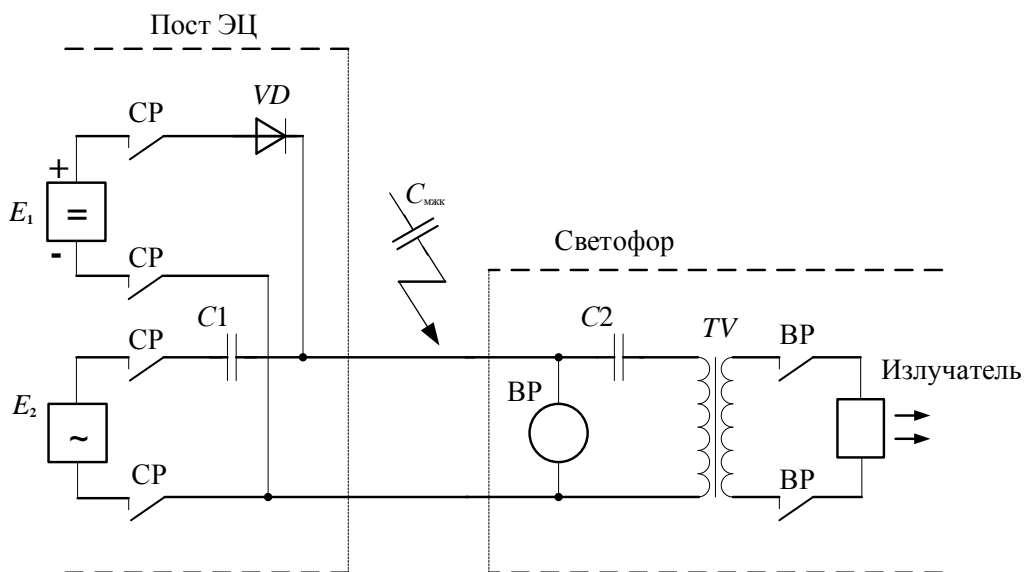


Рисунок 3.13– Схема управления светофором с совмещением сигналов

постоянного и переменного напряжения

Для обеспечения работоспособности приведенной схемы управления необходимо выполнение следующих условий:

$$\begin{aligned} E_1 &> E_{2\max} \\ \Delta U_{C1} &\ll E_2 \\ \Delta U_{C2} &\ll E_2, \end{aligned} \quad (3.13)$$

где $E_{2\max}$ – амплитудное значение функции переменного напряжения E_2 , В; ΔU_{C1} – падение переменного напряжения на конденсаторе $C1$, В; ΔU_{C2} – падение переменного напряжения на конденсаторе $C2$, В; E_2 – действующее значение переменного напряжения питания светофора, В.

3.3 Выводы и заключение по главе 3

1. Приведенный в настоящей главе диссертации анализ процессов работы известных систем централизованного управления светофорами на переменном напряжении показал, что применение светодиодных светофоров при длинах сигнального кабеля в несколько сотен, а иногда и десятков метров не обеспечивает исключения засветки ненадлежащего показания светофора, что не удовлетворяет требованиям безопасности движения.

2. Предложены несколько вариантов устройств с исключением засветки ненадлежащего показания светофора (рисунок 3.14).

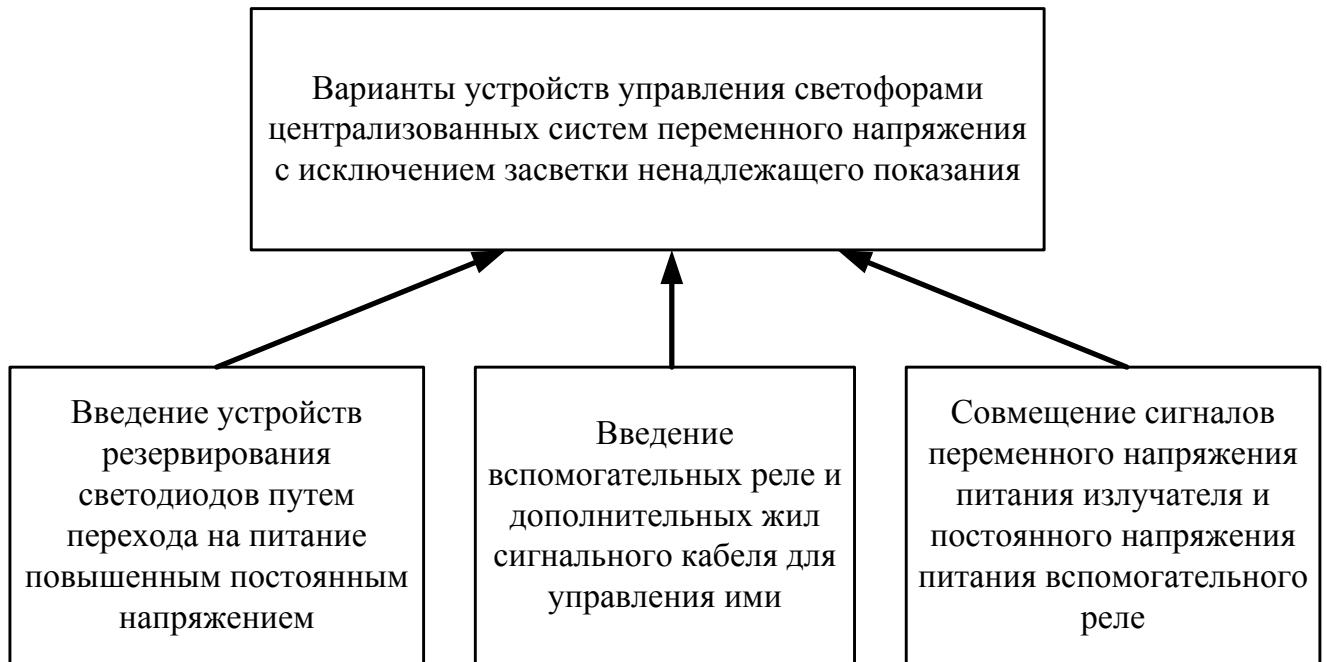


Рисунок 3.14 – Структурная схема вариантов реализации централизованных систем управления светофорами

Каждый из вариантов имеет свои преимущества и недостатки, которые заключаются в следующем.

С точки зрения законов электротехники наиболее простым и вместе с этим наиболее радикальным является переход на управление светофором от источника постоянного напряжения. Однако если в СДМ применяются группы из параллельного включения светодиодов (см. рисунок 2.1), то длина сигнального кабеля ограничивается большим током, потребляемым СДМ. Энергетические характеристики и предельные возможности увеличения длины сигнального кабеля определены в главе 2. В этом случае рациональным является применение схем с одной последовательной группой светодиодов и резервированием светодиодов в СДМ, где наравне с возможностью увеличения длины кабеля исключено исчезновение излучения показания светофора при появлении обрыва в любом из светодиодов СДМ. Возможности повышения величины постоянного питающего напряжения рассмотрены в главе 2.

Однако переход на управление светофором от источника постоянного напряжения требует изменения структуры источников электропитания поста ЭЦ, требующихся для обеспечения функционирования системы управления стационарными светофорами.

Использование в системе управления светофорами вспомогательных реле позволяет полностью исключить влияние емкости между жилами сигнального кабеля при сколь угодно больших длинах кабеля.

Однако применение этого варианта требует введения дополнительных жил (одной или двух) в сигнальный кабель и вспомогательное реле, которое должно располагаться в непосредственной близости от излучателя светофора.

Применение в системе управления светофорами рассмотренного метода совмещения двух электрических сигналов – постоянного и переменного напряжения позволяет применять лишь одну пару жил.

Однако, как видно из условия (3.13) значение напряжения постоянного тока должно быть определенным и довольно большим и равным: $E_1 > \sqrt{2}E_2$. В частности, при $E_2 = 220$ В получим $E_1 > 311,2$ В. Очевидно, что это приведет к пересмотру структуры электропитания системы управления светофорами и может создавать определенные трудности при эксплуатации устройств.

Следовательно, области применения тех или иных вариантов систем управления светофорами определяются как функциональными параметрами вариантов, так и возможностями их применения в конкретных устройствах СЦБ и получаемыми технико-экономическими характеристиками, позволяющими определить области их внедрения.

ГЛАВА 4

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И УСТРОЙСТВ
КОНТРОЛЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ
РАБОТОСПОСОБНОСТИ СВЕТОДИОДНЫХ СВЕТОФОРОВ
ПЕРЕМЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ**

В настоящем разделе рассматриваются два режима работы светофора. Первый из них заключается в контроле функционирования светофора в состоянии излучения соответствующего показания. Это осуществляется путем определения величины тока, протекающего через излучающую СДМ. Во втором режиме должна осуществляться функция определения целостности светодиодов СДМ при отсутствии излучения любого из показаний светофора (контроль «холодного» состояния СДМ).

Если сравнивать вольтамперные характеристики лампы накаливания и светодиодов (см. рисунок 3.1, *а*, *б*), то можно сделать следующие выводы о функциональной возможности осуществления контроля работоспособности светофоров в двух режимах работы.

В режиме контроля функционирования светофора требуется выполнение следующих функциональных уравнений, которые относятся к схемам лампового и светодиодного светофоров рисунка 3.1, *а* и *б* соответственно:

$$I_{\text{контр}}^{\text{ЛН}} \leq I_{\text{НОМ}}^{\text{ЛН}}, \quad (4.1, a)$$

$$I_{\text{контр}}^{\text{СВ}} \leq nI_{\text{НОМ}}^{\text{СВ}}, \quad (4.1, б)$$

где $I_{\text{контр}}^{\text{ЛН}}$ – величина тока, которая должна измеряться контрольным устройством, в качестве которого обычно используется огневое реле ОР, А.

Режимы выполнения контроля работоспособности для лампы накаливания и светодиодов различны, и аналогичные условия имеют вид следующих функциональных уравнений:

$$I_{\text{контр}}^{\text{ЛН}} \leq I_{\text{пор}}^{\text{ЛН}}, \quad (4.2, a)$$

$$F_{\text{контр}}^{\text{СВ}} \leq (I_{\text{пор}}^{\text{СВ}} = 0 \text{ и } U_{\text{СВ}} < U_{\text{пор}}^{\text{СВ}}), \quad (4.2, б)$$

где в выражении (4.2, б) параметром контроля работоспособности не может являться ток $I_{\text{контр}}^{\text{СВ}}$, так как величина напряжения $U_{\text{пор}}^{\text{СВ}}$ имеет существенный технологический и температурный разброс. Это определяет тот факт, что контроль работоспособности светодиодного светофора должен производиться при условии нулевого значения тока через светодиоды СДМ, и функция реализуемости контроля работоспособности $F_{\text{контр}}^{\text{СВ}}$ не может быть параметром измерения тока. При этом необходимо выполнение условия: $U_{\text{СВ}} < U_{\text{пор}}^{\text{СВ}}$, где $U_{\text{СВ}}$ – напряжение, которое может подаваться на светодиоды для реализации режима контроля работоспособности светофора и при котором излучение СДМ отсутствует, В.

Если для лампового светофора выполнение условия (4.2, а) не вызывает затруднений или негативных последствий, то для светодиодного светофора невыполнение условия (4.2, б) может привести к появлению засветки ненадлежащего показания светофора, а это не соответствует требованиями безопасности движения.

4.1 Исследование электрических параметров устройств в режиме контроля функционирования светофоров

Типовая схема контроля излучения лампового или светодиодного светофора, реализующая функциональные зависимости (4.1, а) и (4.1, б), основана на применении типового огневого реле переменного тока ОР, осуществляющего определение величины тока излучателя $I_{\text{контр}}^{\text{лн}}$ или $I_{\text{контр}}^{\text{св}}$ соответственно (рисунок 4.1). Следовательно, реле ОР является измерительным органом, к точностным характеристикам которого предъявляются определенные требования. Они определяются нормированными значениями тока полного притяжения и тока отпуска этого реле.

Очевидно, что схема (рисунок 4.1) не определяет всех реальных процессов работы излучателя светофора. В ней не учитывается влияние емкостей между жилами в сигнальном кабеле.

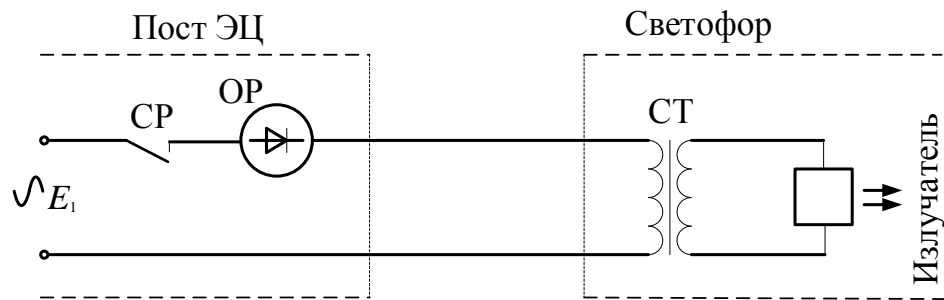


Рисунок 4.1 – Типовая электрическая схема контроля функционирования светофора

Схема с достаточной для практики точностью с учетом этой емкости приведена на рисунке 4.2, где сопротивления $R1$, $R2$ и емкость $C2$ отображают параметры Т-образного четырехполюсника, которые задаются нормированными погонными параметрами кабелей. Однако, как показано в главе 3, наличие в сигнальном кабеле нескольких пар сигнальных жил, связанных между собой емкостными связями, делает реальную эквивалентную схему более сложной. Она показана на

рисунке 4.3, где емкость $C2$ является емкостью между парами сигнальных жил кабеля, а емкости $C1$ и $C3$ отображают емкости между жилами в одной паре сигнального кабеля. Принимается, что индуктивности кабельных жил пренебрежимо малы. Это допущение тем более обосновано, что величины их не нормируются в паспортных данных на сигнальные кабели СЦБ. Кроме того, принятое отсутствие в эквивалентной схеме индуктивности является случаем, который увеличивает степень гарантированности выполняемого анализа и проводимого на его основе практического расчета.

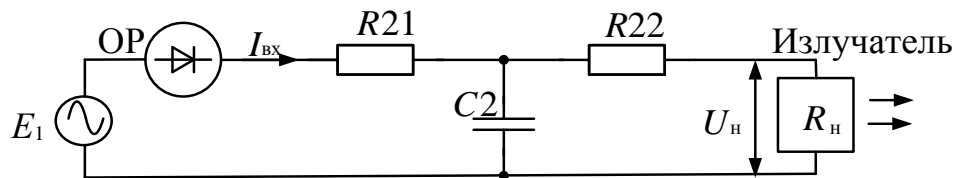


Рисунок 4.2 – Схема, учитывающая шунтирующее влияние емкости между жилами в одной сигнальной паре кабеля

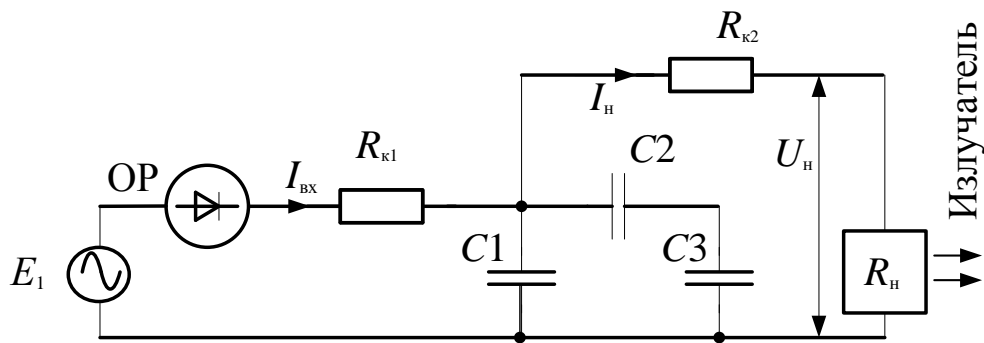


Рисунок 4.3 – Эквивалентная схема светофора с учетом емкостей между парами жил сигнального кабеля

Определенная сложность выполняемого анализа обуславливается тем, что если величина емкости между жилами в одной парной скрутке задается в паспортных данных кабеля, то емкость между жилами кабеля различных сигнальных пар не нормируется. Поэтому при реальном использовании полученных результатов анализа необходимо ориентироваться на величины емкостей, которые норми-

руются для характеристики емкости между жилами в одной парной скрутке. Это обусловлено требованиями гарантированности выполнения тех или иных функций работы излучателя, то есть светофора.

При анализе необходимо рассмотреть два практически существующих случая. Первый из них соответствует наличию излучения соответствующего показания светофора, то есть при протекании через него тока I_H . Второй случай описывает появление обрыва в цепи излучателя, когда $I_H = 0$ и $R_H = \infty$, который также должен контролироваться огневым реле. Если первому случаю соответствует эквивалентная схема рисунка 4.3, то для второго случая схема имеет вид, показанный на рисунке 4.4.

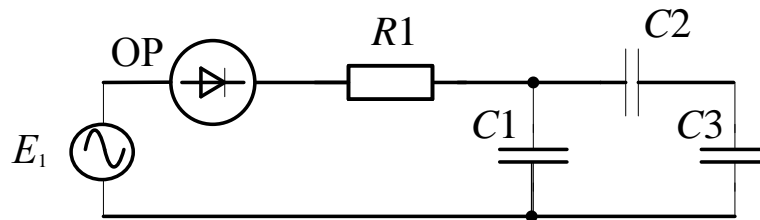


Рисунок 4.4 – Эквивалентная схема светофора при обрыве в цепи тока излучателя

Для схемы рисунка 4.3 входной ток, потребляемый от источника переменного напряжения E_1 , равный току, протекающему через обмотку огневого реле, определяется:

$$\dot{I}_{\text{вх}} = \dot{E}_1 \left[(R_{\text{к1}} + R_{\text{OP}}) + \frac{\left(\frac{1}{j\omega C1} \right) \frac{\frac{1}{C2} + \frac{1}{C3}}{1} (R_{\text{к2}} + R_{\text{H}})}{\frac{1}{C1} + \frac{1}{C2} + \frac{1}{C3}} \right]^{-1} \cdot \quad (4.3)$$

Ток, протекающий через излучатель, соответствующий схеме рисунка 4.3 находится из следующего уравнения:

$$i_H = \frac{R_{к1} + R_{OP}}{R_{к2} + R_H} \left\{ \dot{E}_1 \left[(R_{к1} + R_{OP}) + \frac{\left(\frac{1}{j\omega C1} \right) \frac{\frac{1}{C2} + \frac{1}{C3}}{1} (R_{к2} + R_H)}{\frac{1}{C1} + \frac{1}{C2} + \frac{1}{C3}} \right]^{-1} \right\}. \quad (4.4)$$

Входной ток, потребляемый схемой, представленной на рисунке 4.4, то есть при отсутствии в ней излучателя, равен:

$$i_{вх} = \dot{E}_1 \left[(R_{OP} + R_{к1}) + \left(\frac{1}{j\omega C1} \right) \frac{\frac{1}{C2} + \frac{1}{C3}}{1} \right]^{-1}. \quad (4.5)$$

Уравнения (4.3), (4.4) и (4.5) полностью определяют входные и выходные параметры схем рисунков 4.3 и 4.4, а также основные закономерности поведения этих функций в различных областях изменения их аргументов.

Выполним анализ работы схем рисунков 4.3 и 4.4, используя решения уравнений (4.3)–(4.5) для различных значений входящих в уравнения аргументов.

При этом для упрощения результатов анализа и получения достаточно наглядно представленных расчетных данных примем, что вследствие относительно низкой частоты $f = \frac{\omega}{2\pi}$, используемого в устройствах СЦБ переменного напряже-

ния, равного $E_1 = E_{\max} \sin \omega t$, сопротивление конденсаторов, входящих в схемы, будем считать: $X_C = \frac{1}{\omega C}$.

Построение соответствующих графических зависимостей выполним для двух величин погонной емкости кабелей: $C_k = 500$ нФ/км и $C_k = 1500$ нФ/км, погонного продольного сопротивления жил кабеля $R_k = 25$ Ом/км при входном напряжении $E_1 = 220$ В. Для определения влияния параметров кабельных линий на функционирование системы управления светофором примем, что сопротивление обмотки огневого реле R_{OP} входит в состав сопротивления $R1$. При необходимости выполнения конкретных практических расчетов величина сопротивления резистора $R1$ может быть изменена в зависимости от примененного типа огневого реле.

При анализе необходимо рассмотреть два случая функционирования схемы. Первый из них соответствует нормальному режиму работы светофора, когда излучатель R_n излучает и потребляет соответствующий ток. Во втором случае ток, потребляемый излучателем R_n , равен нулю, что соответствует обрыву в цепи СДМ. Выполним также анализ изменений входного тока $I_{вх}$ при изменении величин электрических параметров кабеля его длины l_k , которые соответствуют $R1, R2 \Rightarrow \frac{R_k}{2}$, $C1, C2, C3 \Rightarrow C_k$, где R_k и C_k соответствуют введенным выше погонным параметрам кабелей.

Определим расчетные закономерности изменение функций входных и выходных параметров схемы рисунка 4.3, которая соответствует первому случаю анализа, когда существует излучение соответствующего показания светофора.

На рисунке 4.5 показан график результатов одного из расчетов изменения входного тока $I_{вх}$ и тока, протекающего через излучатель I_n в функции изменения мощности P_n , потребляемой излучателем для емкостей кабеля: $C_k = 500$ нФ/км и длины кабеля, равной $l_k = 0,5$ км.

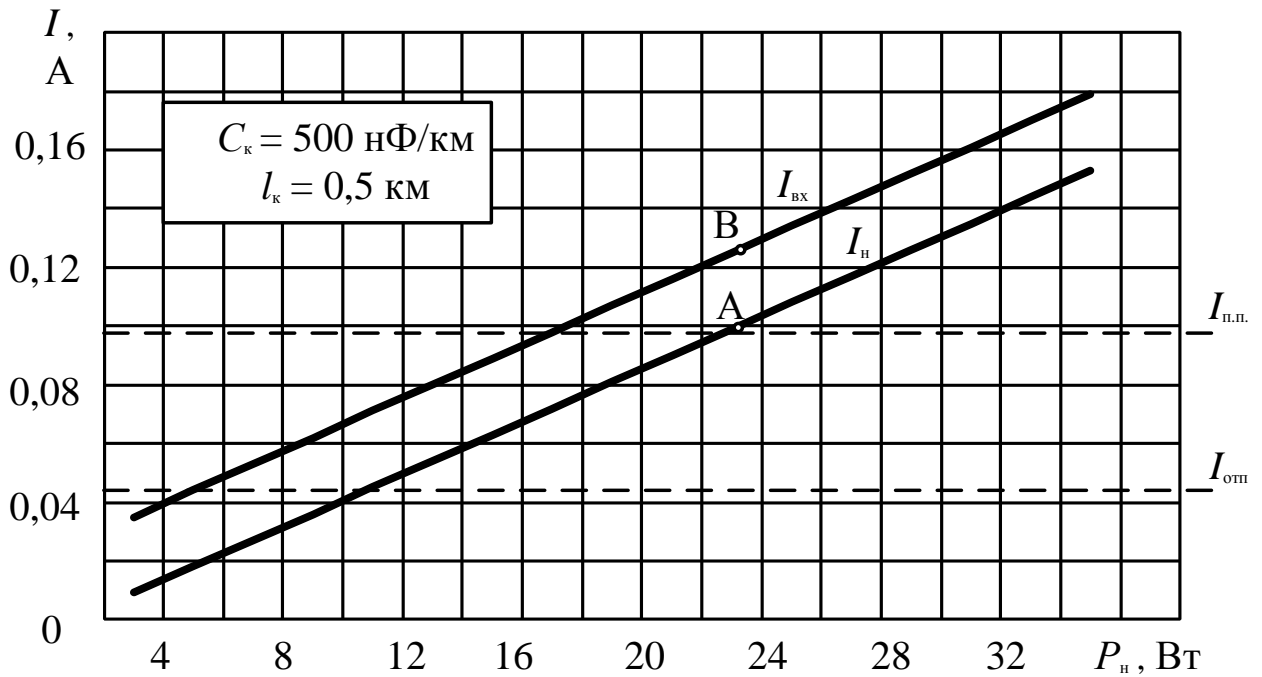


Рисунок 4.5 – Зависимости токов $I_{вх}$ и $I_{н}$ от мощности излучателя $P_{н}$ для $C_k = 500$ нФ/км при длине кабеля $l_k = 0,5$ км

На графике (рисунок 4.5) пунктирными линиями показаны ток $I_{п.п.}$ полного притяжения огневого реле и ток $I_{отп.}$ его отпускания, которые ориентировочно равны параметрам типичного реле контроля тока, применяющегося в устройствах СЦБ. Связь между этими токами определяется коэффициентом возврата реле:

$$k_B = \frac{I_{отп.}}{I_{п.п.}}, \text{ который лежит в пределах } k_B = 0,4-0,6.$$

Графики являются линейными функциями и обладают параллельностью линий токов входного $I_{вх}$ и излучателя $I_{н}$; также закономерно увеличение величины этих токов при увеличении мощности излучателя $P_{н}$.

Изменения входных и выходных параметров для схемы рисунка 4.3 показаны на рисунке 4.6. Они соответствуют увеличенной длине кабеля до $l_k = 1$ км при тех же погонных значениях его электрических параметров. Как видно, если для графика, представленного на рисунке 4.5, разница токов составляет $\Delta I = I_{вх} - I_{н} = 0,025$ А, то для графика, представленного на рисунке 4.6, будем иметь увеличен-

ное значение: $\Delta I = 0,05$ А. Очевидно, это объясняется влиянием увеличенного значения емкостей кабелей.

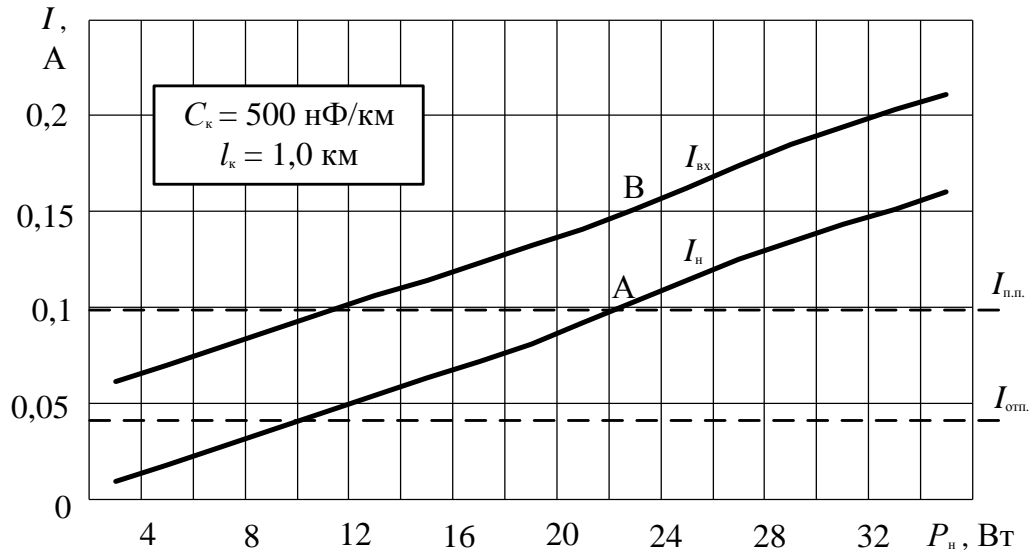


Рисунок 4.6 – Зависимости токов $I_{вх}$ и I_n от мощности излучателя P_n для $C_k = 500$ нФ/км при длине кабеля $l_k = 1,0$ км

Дальнейшее увеличение разницы между входным током и током излучателя до величины $\Delta I = 0,15$ А при увеличении длины кабеля до $l_k = 3$ км показано на рисунке 4.7.

Для сравнительного определения влияния величины погонной емкости на входные параметры схемы графиками рисунка 4.8 показаны зависимости, аналогичные вышеприведенным, но для $C_k = 1500$ нФ/км при $l_k = 3$ км. Как видно, здесь разница в токах $I_{вх}$ и I_n гораздо более существенна и составляет $\Delta I = 0,42$ А.

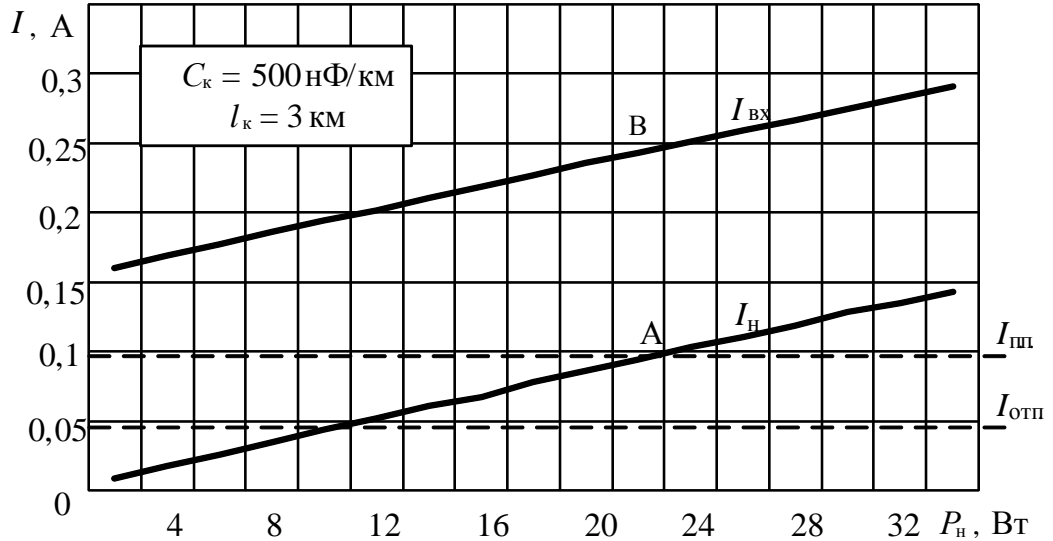


Рисунок 4.7 – Зависимости токов I_{BX} и I_H от мощности излучателя P_H
для $C_k = 500$ нФ/км при длине кабеля $l_k = 3,0$ км

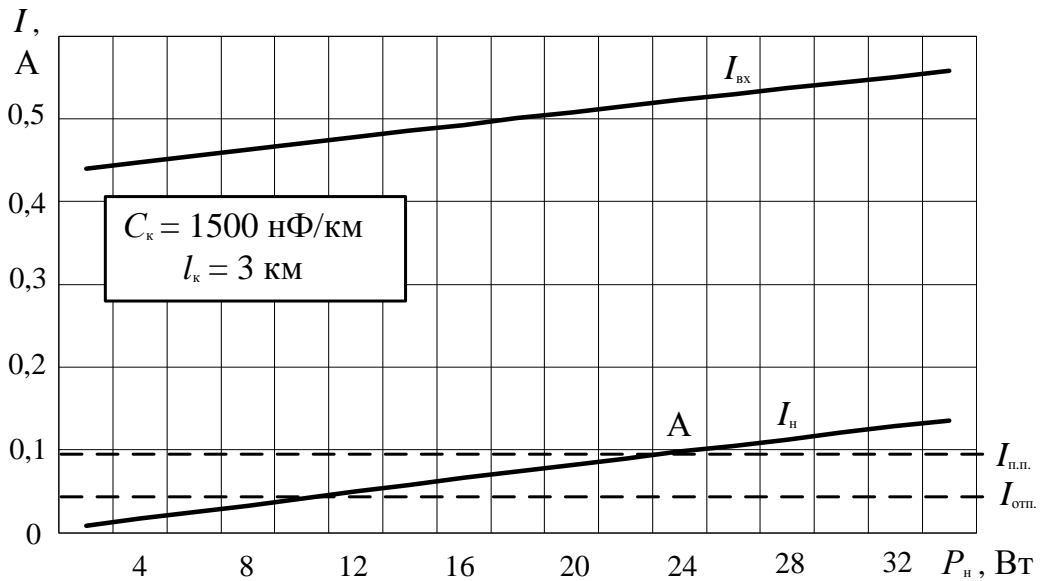


Рисунок 4.8 – Зависимость величины токов I_{BX} и I_H от мощности излучателя P_H
для $C_k = 1500$ нФ/км при длине кабеля $l_k = 3,0$ км

На рисунке. 4.9 приведены графики зависимости входного тока схемы при изменении длины кабеля для мощности, потребляемой излучателем $P_H = 10$ Вт при двух значениях емкости C_k .

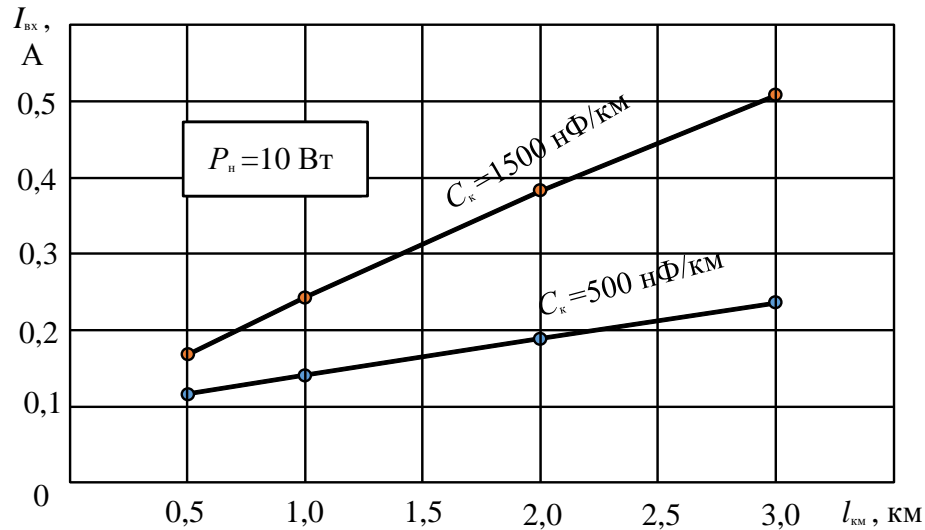


Рисунок 4.9 – Зависимость входного тока схемы от длины кабеля при мощности, потребляемой излучателем $P_{н} = 10$ Вт

Эти графики (рисунок 4.9) показывают, что, например, при длине кабеля, равной 3 км, значение входного тока $I_{вх}$ при увеличении погонной емкости кабеля с 500 нФ/км до 1500 нФ/км возрастает примерно в два раза.

Для сравнения на графиках рисунка 4.10 показаны аналогичные зависимости, но для меньшей мощности – $P_{н} = 4$ Вт.

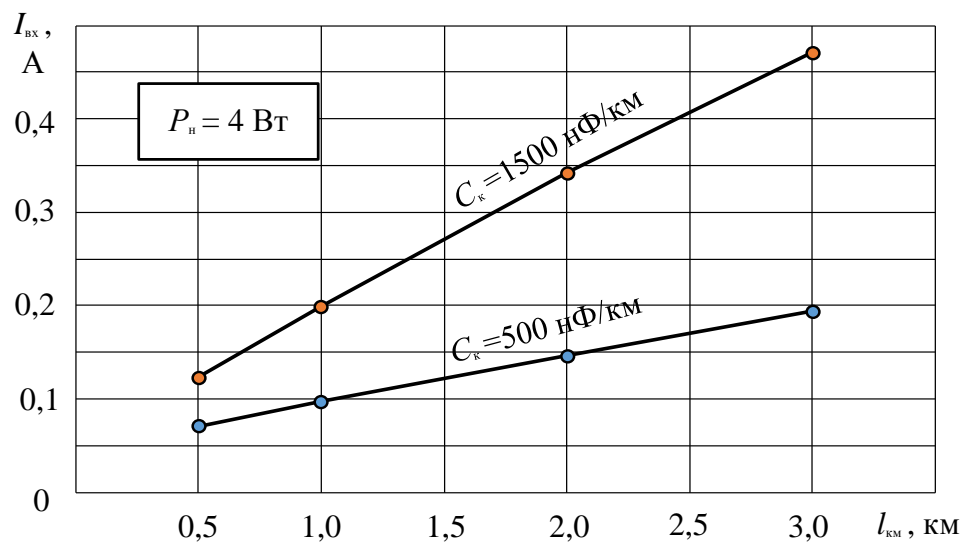


Рисунок 4.10 – Зависимость входного тока схемы от длины кабеля при мощности, потребляемой излучателем $P_{н} = 4$ Вт

Закономерность изменения введенного выше показателя разницы токов, равного $\Delta I = I_{\text{вх}} - I_{\text{н}}$, приведена на рисунке 4.11. Они показывают существенно бóльшую степень возрастания значения ΔI при увеличении погонной емкости $C_{\text{к}}$. Причем бóльшая степень возрастания имеет место при увеличивающихся величинах длины кабеля $l_{\text{к}}$.

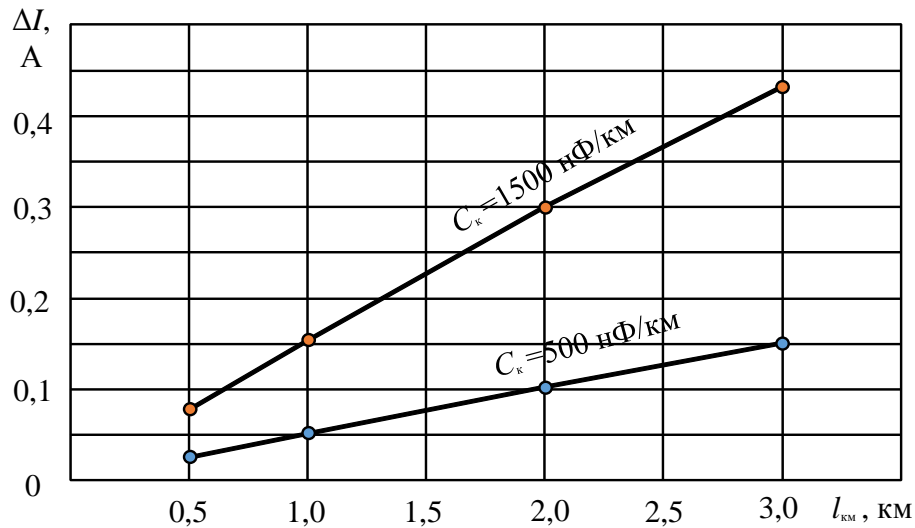


Рисунок 4.11 – Зависимость показателя ΔI от длины кабеля при изменении емкости $C_{\text{к}}$

Зависимость входного тока $I_{\text{вх}}$ от длины кабеля $l_{\text{к}}$ схемы рисунка 4.4, то есть при обрыве в цепи излучателя, показана на рисунке 4.12. Они показывают, что при увеличении длины кабеля с 0,5 км до 3 км имеет место существенное увеличение тока $I_{\text{вх}}$: в пять раз для погонной емкости $C_{\text{к}} = 500$ нФ/км и в почти в шесть раз для емкости, равной $C_{\text{к}} = 1500$ нФ/км.

Очевидно, что для контроля целостности цепи излучателя требуется устанавливать огневое реле с величинами тока отпускания $I_{\text{отп}}$, которые при выбранных значениях $l_{\text{к}}$ должны превышать данные графиков рисунка 4.12.

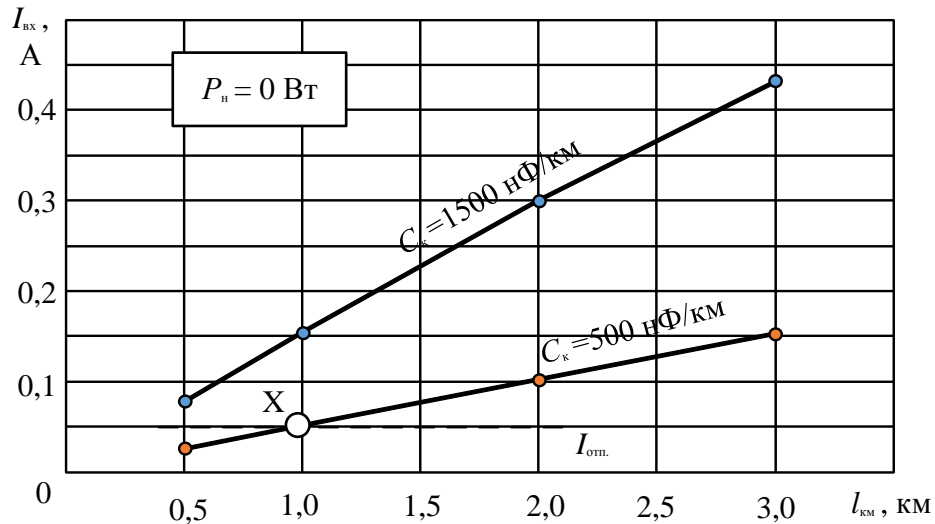


Рисунок 4.12 – Зависимость величины входного тока $I_{вх}$ от длины кабеля при обрыве в цепи излучателя, когда $P_n = 0$ Вт

Обобщенный анализ графиков рисунков 4.5–4.12 позволяет сделать следующие основные выводы.

Графики, приведенные на рисунках 4.5 и 4.6, показывают, что пересечение функций $I_{п.п} = f(P_n)$ и $I_n = f(P_n)$ соответствует точкам А. При этом соответствующее увеличение тока $I_{вх}$, обусловленное увеличением длины сигнального кабеля l_k с 0,5 км до 1,0 км, показано точками В графиков. Это же обуславливает увеличение разницы токов ΔI , что также показано на рисунке 4.11. Дальнейшее существенное увеличение разницы токов ΔI приводит к тому, что точка В в области показанных аргументов отсутствует (рисунки 4.7, 4.8).

Таким образом, существующие параметры кабелей и широкого диапазона мощности, потребляемой излучателями, вполне гарантируют выполнение норм тока полного притяжения огневых реле различного типа.

Рассмотрим количественные соотношения параметров схемы рисунка 4.4, которая соответствует обрыву в цепи излучателя, то есть при мощности излучателя $P_n = 0$ Вт. Результаты расчетов для этого режима работы, полученные при решении выражения (4.5) для тех же допущений, которые были приняты при исследовании уравнения (4.4), приведены на рисунке 4.12.

Графики показывают, что при обрыве в цепи излучателя заданная величина тока отпускания огневого реле $I_{\text{отп}}$ обеспечивается лишь при погонной емкости кабеля $C_k = 500$ нФ/км и длине сигнального кабеля около 1 км. Это показано точкой X на рисунке 4.12. При больших величинах C_k и l_k обрыв в цепи излучателя не контролируется, так как в области изменений длины сигнального кабеля l_k и погонной емкости C_k необходимое для контроля целостности цепи излучателя неравенство $I_{\text{вх}} < I_{\text{отп}}$ не выполняется.

Следовательно, существующие схемы контроля светофора при помощи типовых огневого реле могут не выполнять заданных требований безопасности функционирования устройств СЦБ.

4.2 Анализ и выбор направлений улучшения эксплуатационных характеристик светофоров для режима контроля функционирования светофоров

Реализация принципов устранения указанного недостатка схем контроля целостности цепи излучателя возможна по нескольким направлениям.

Первое направление заключается в использовании для управления светофорами постоянного относительно высокого напряжения (см. главу 3).

При этом во всех рассмотренных в главах 3 и 4 схемах можно принять, что все емкости $C_k \rightarrow 0$, а вместо них в схемы должны быть введены активные резисторы, определяющие сопротивления между жилами кабелей. Однако, как известно, эти сопротивления составляют величины $R = 10^4 - 10^6$ Ом и более. Величины этих сопротивлений несоизмеримо больше по сравнению со значениями других активных сопротивлений схем.

Поэтому ими можно пренебречь и максимально допустимые длины сигнальных кабелей будут определяться лишь активными сопротивлениями жил.

Примеры подобного представления схем рисунков 4.3 и 4.4 показаны на рисунках 4.13 и 4.14 соответственно.

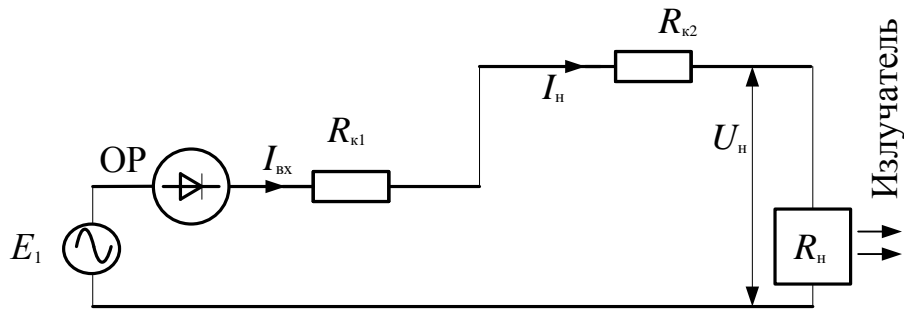


Рисунок 4.13 – Схема рисунка 4.3 при $C_k \rightarrow 0$

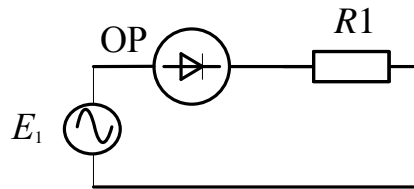


Рисунок 4.14 – Схема рисунка 4.4 при $C_k \rightarrow 0$

Одним из направлений подобной реализации эффективных схем управления светофорами может служить применение резервированных светодиодных светофоров, анализ которых выполнен в главе 2.

Некоторым альтернативным решением, позволяющим увеличить длину сигнальных кабелей, может служить техническое решение с регулируемым коэффициентом возврата k_v огневого реле, которое описано в [51], обычно применяемое лишь при контроле токов постоянного, а не переменного напряжения.

Радикальным методом увеличения длин сигнальных кабелей может служить техническое решение, заключающееся во введении дополнительных жил кабеля (рисунок 4.15) [39].

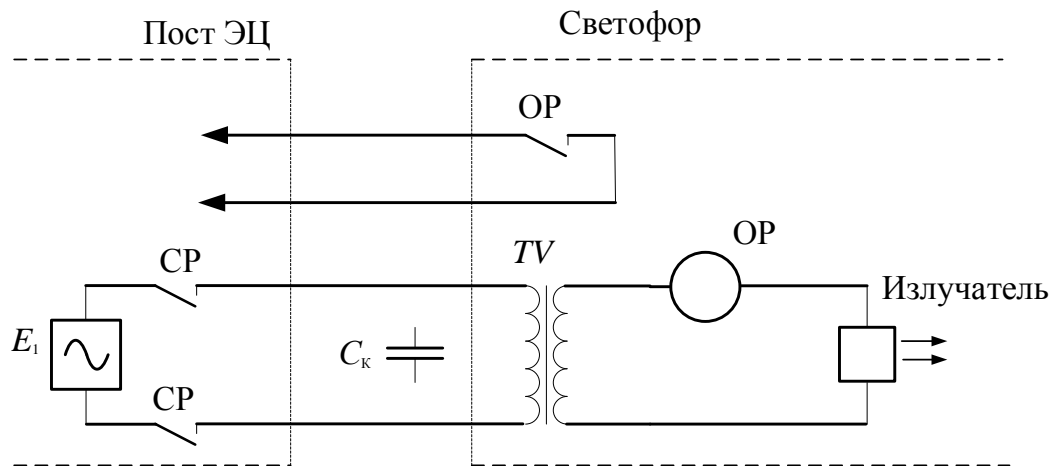


Рисунок 4.13 – Схема контроля функционирования светофора с введением дополнительных жил сигнального кабеля

Здесь вблизи светофора устанавливается огневое реле OP , которое контролирует ток, протекающий непосредственно через излучатель. Поэтому все реально существующие емкостные сопротивления между жилами кабеля, условно показанные конденсатором C_k , не влияют на функции контроля излучения даже при значительных увеличениях входного тока схемы, что, например, показано на рисунках 4.7, 4.8 и 4.12. Поэтому контроль тока, осуществляемый непосредственно в цепи излучателя, позволяет получить гарантированный результат.

4.3 Анализ электрических параметров устройств в режиме определения работоспособности функционирования светофоров

Основным отличием светодиодных светофоров от ламповых является наличие порогового напряжения начала излучения светодиода $U_{св}$. Нестабильность этого параметра обусловлена технологическими факторами и температурой кристалла светодиода. Кроме того, светодиоды различной цветности излучения (раз-

личной длины электромагнитной волны $\lambda_{\text{изл}}$) имеют существенно различные значения порогового напряжения $U_{\text{св}}$, в соответствии с чем изменяются и технологические и температурные разбросы этого напряжения. В соответствии с этим выполнение условия (4.2, б), когда $I_{\text{пор}}^{\text{св}} = 0$ и $U_{\text{св}} < U_{\text{пор}}^{\text{св}}$ вызывают принципиальные трудности.

В смысле обеспечения контроля работоспособности СДМ требуется, чтобы при отсутствии протекания тока через светодиоды матрицы выполнялся контроль их целостности для последующего их нормального излучения.

Для выполнения этой функции возможно использование физических свойств p - n перехода светодиодов, которые могут определять его работоспособность при отсутствии протекания через светодиод тока.

Одним из известных физических свойств диода, а также светодиода является существование барьерной и диффузионной емкости p - n перехода.

Барьерная емкость существует при обратном смещении p - n перехода. Ее используют в известных и широко применяющихся в электронике варикапах. Диффузионная емкость существует при прямом смещении p - n перехода.

В общем случае уравнение для нахождения величины барьерной емкости имеет вид

$$C_{\text{б}} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{l_0} \sqrt{\frac{\Delta\varphi_0}{\Delta\varphi_0 - |U|}}, \quad (4.6)$$

где ε_0 и ε – диэлектрические проницаемость вакуума и материала соответственно;

S – площадь кристалла p - n перехода, м^2 ;

l_0 – ширина перехода, м ;

$\Delta\varphi_0$ – температурный потенциал, В ;

U – обратное напряжение, прикладываемое к p - n переходу, В .

Так как для прямого смещения перехода уравнение (4.6) дает большую погрешность в определении емкости, то для диффузионной емкости справедливо выражение:

$$C_D = \frac{\tau}{r_D} \left(1 - \operatorname{sech} \frac{w}{L} \right), \quad (4.7)$$

где τ – постоянная времени жизни носителей заряда, с;

r_D – сопротивление p - n перехода постоянному току, Ом;

w – толщина базы p - n перехода, м;

L – диффузионная длина электронов, м.

На рисунке 4.14 показана типичная зависимость емкости p - n перехода от прикладываемого к нему напряжения. График показывает существенную нелинейность вольтамперной характеристики, что необходимо учитывать при практическом использовании подобного свойства p - n перехода в разрабатываемых схемах определения работоспособности светофора.

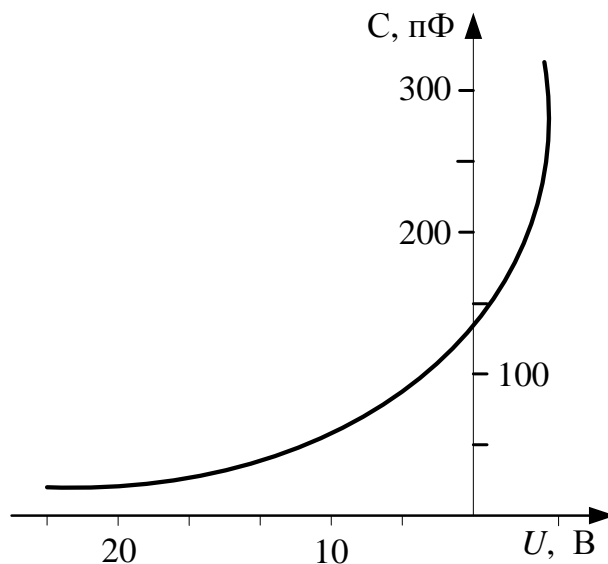


Рисунок 4.14 – График значения емкости p - n перехода от прикладываемого к нему напряжения

Другим физическим свойством p - n перехода, которое может быть использовано при контроле работоспособности светодиодной матрицы, является существование в p - n переходе температурного потенциала напряжения. В общем виде он определяется:

$$\varphi_T = \frac{kT}{q} = \frac{T}{11600}, \quad (4.8)$$

где k – постоянная Больцмана, Дж/К;

q – элементарный заряд, Кл;

T – температура кристалла, К.

Практически для комнатной температуры получим, что температурный потенциал равен:

$$\varphi_T(300^\circ \text{K}) \approx 0,025 \text{ В}. \quad (4.9)$$

Очевидно, что эта величина потенциала единичного светодиода относительно невелика и достаточно точное ее определение в условиях работы реальных устройств СЦБ невозможно. Если в СДМ используется большое количество последовательно включенных светодиодов, например, несколько десятков, то надежная регистрация этого напряжения не вызовет затруднений.

Практически данный случай соответствует случаю применения СДМ в резервированном светофоре, анализ работы которого выполнен в главе 2. В подобной СДМ количество последовательно включенных светодиодов может достигать 30–50 ед.

4.4 Анализ и выбор направлений улучшения эксплуатационных характеристик светофоров для режима определения работоспособности светофоров

Описанные выше физические свойства $p-n$ перехода светодиода позволяют создать схемотехнические решения для практической реализации устройств определения работоспособности СДМ светофора.

Первое из разработанных технических решений приведено на рисунке 4.15, а соответствующие ей вольтамперные характеристики, определяющие принцип ее функционирования, – на рисунке 4.16.

Здесь при обесточенном состоянии сигнального реле СР на светодиоды от генератора G подается переменное напряжение достаточно высокой частоты, и величина тока фиксируется компаратором K через датчик тока ДТ, в качестве которого может использоваться, например, индуктивный трансформатор.

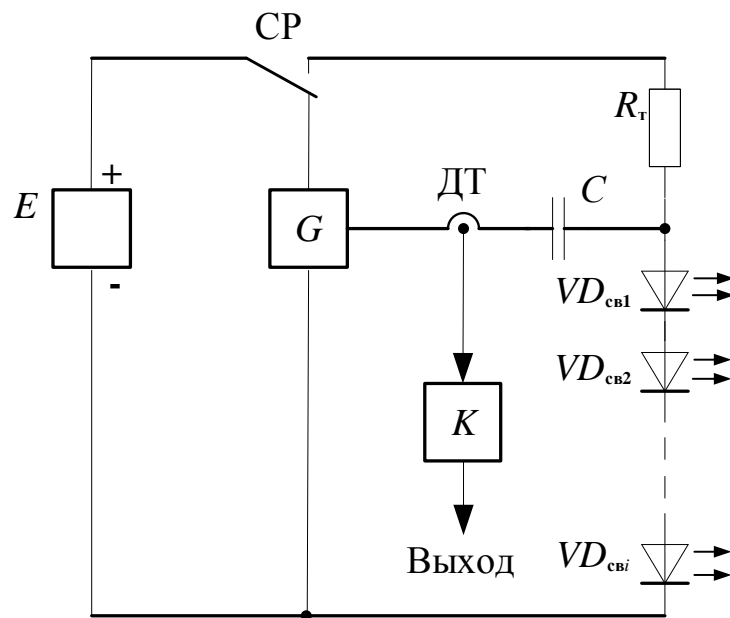


Рисунок 4.15 – Схема контроля светофора с использованием емкостных свойств $p-n$ перехода светодиодов

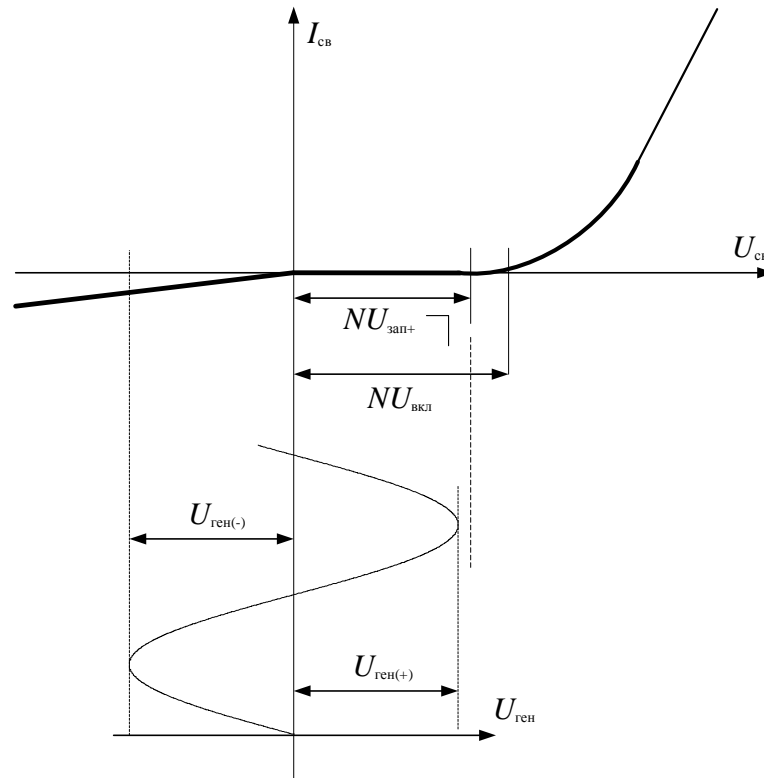


Рисунок 4.16 – Временная диаграмма работы схемы рисунка 4.15

Для обеспечения работоспособности рассматриваемой схемы должно выполняться условие:

$$U_{\text{ген}(+)} < NU_{\text{вкл}}, \quad (4.10)$$

где $U_{\text{ген}(+)}$ – амплитуда положительной полуволны выходного напряжения генератора,

$G, B; N$ – количество последовательно включенных светодиодов в СДМ;

$U_{\text{вкл}}$ – пороговое напряжения включения суммы светодиодов в СДМ, В.

Очевидно, что в этой схеме выходное напряжение генератора G может быть не только синусоидальными, но и прямоугольным вида «меандр».

Схема определения работоспособности светофора, в которой использовано существование в $p-n$ переходе светодиодов температурного потенциала напряжения, приведена на рисунке 4.17.

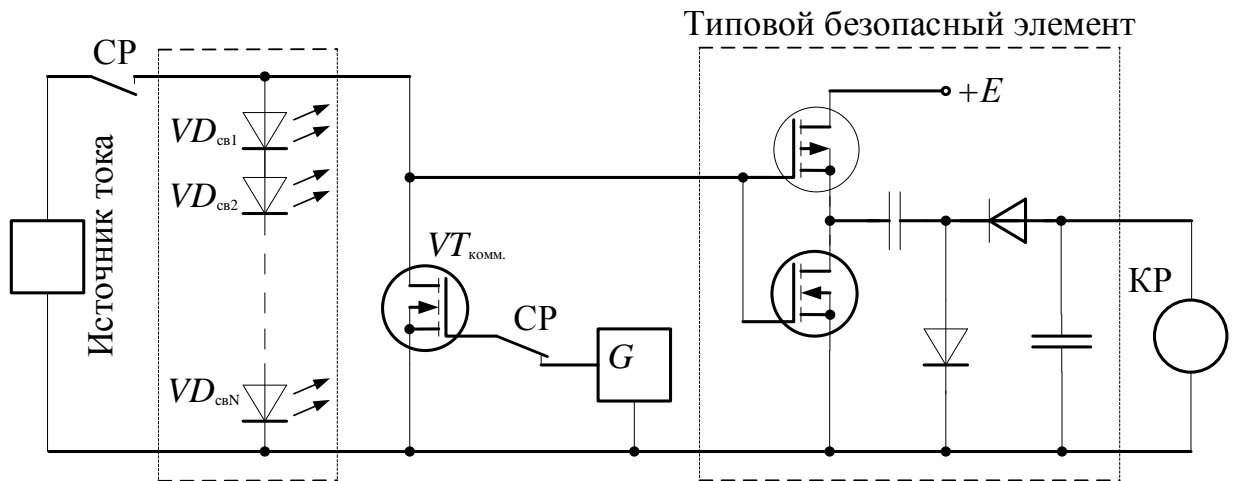


Рисунок 4.17 –Схема определения работоспособности светофора с использованием температурного потенциала $p-n$ перехода

Здесь для безопасного преобразования сигнала температурного потенциала постоянного напряжения используется его коммутация импульсным генератором G и соответствующим транзисторным ключом $VT_{\text{комм.}}$. В схеме используются МОП транзисторы, входное сопротивление которых не оказывает шунтирующего влияния на импульсный сигнал постоянного напряжения.

Для преобразования импульсного сигнала в напряжение включения контрольного реле КР используется типовая стандартная схема безопасного элемента, выполненного также на МОП транзисторах.

Существуют также другие варианты устройства контроля работоспособности СДМ, которые реализованы на аналогичном принципе использования напряжения температурного потенциала $p-n$ перехода[100].

4.5 Выводы и заключение по главе 4

1. Выполненный анализ показал, что существующие принципы контроля функционирования и определения работоспособности СДМ не обеспечивают тре-

бований по безопасности движения поездов, предъявляемых к светофорам железнодорожного транспорта.

2. Для выполнения заданных требований предложено использование двух свойств *p-n* перехода, а именно: емкостной характер его сопротивления и наличие постоянного напряжения температурного потенциала в переходе.

3. На основе этих свойств *p-n* перехода разработаны и проанализированы схемы устройств, которые позволяют обеспечить контроль функционирования светофора при подаче на него сигнала включения СДМ, а также осуществить прогнозирование работоспособности СДМ в режиме «холодного» состояния.

ГЛАВА 5

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОПРОСОВ ПРИМЕНЕНИЯ УСТРОЙСТВ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ СВЕТОДИОДНЫМИ СВЕТОФОРАМИ

В современных устройствах и системах автоматики, телемеханики и информатики широко используются устройства с применением волоконно-оптических линий связи (ВОЛС). Их несомненными преимуществами по сравнению с металлосодержащими кабелями являются большая помехозащищенность, существенно больший объем передаваемой информации и высокая экономическая эффективность в части использования цветных металлов [1]. На железнодорожном транспорте подобные устройства нашли применение для преобразования больших объемов информации различного вида. В частности, в настоящее время на сети железных дорог происходит широкая замена большого объема систем магистральной и иной связи с использованием металлосодержащих кабелей и воздушных линий на системы передачи с использованием аппаратуры ВОЛС[1].

Известно также использование довольно простых волоконно-оптоэлектронных устройств преобразования информации для передачи небольших объемов данных, в частности для управления станционными светофорами [70, 71]. Основной целью их использования является повышение помехозащищенности и надежности работы. В кабелях ВОЛС отсутствует негативное влияние емкостей между парами сигнальных жил и исключено паразитное шунтирующее действие емкостей в одной паре сигнальных жил. Это определяет появление возможности для существенного увеличения длины сигнальных кабелей, и, кроме того, здесь исключается подсветка ненадлежащего показания светофора. Возможность практического применения подобных устройств основана на использовании в канале преобразования информации МОП транзисторов с оптоэлектронным управлением [69].

5.1 Устройство безопасной передачи аналогового оптического сигнала на излучатель светофора

Известны устройства, в которых для управления стационарными светофорами используются ВОЛС [71, 102]. При этом энергетически маломощный оптический сигнал, получаемый по световоду ВОЛС, преобразуется в относительно мощный электрический сигнал для управления излучателем светофора.

Это преобразование должно соответствовать требованиям безопасности, которые предъявляются к устройствам СЦБ. Схема безопасного устройства преобразования сигнала приведена на рисунке 5.1.

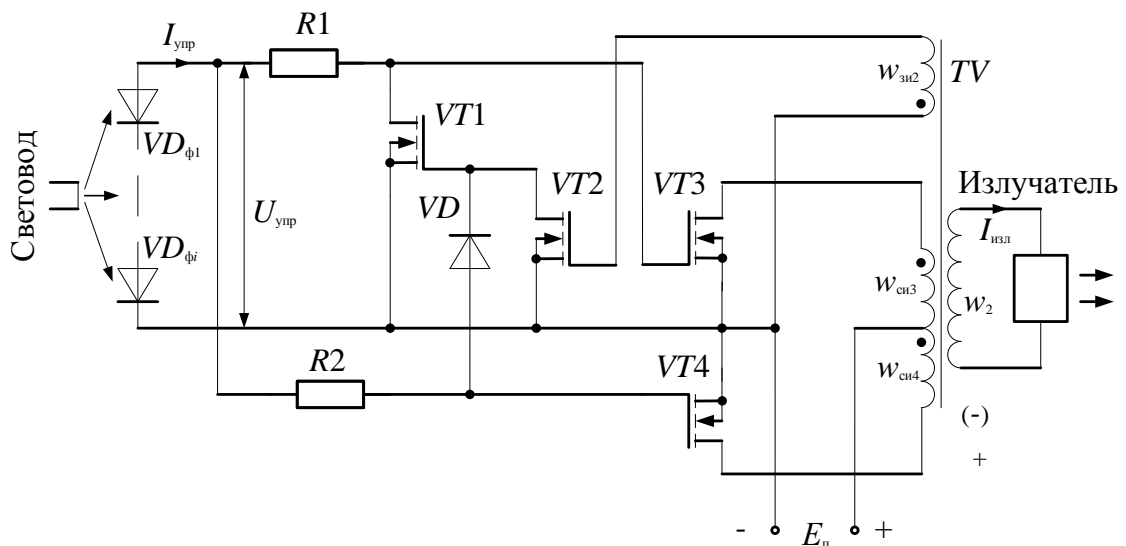


Рисунок 5.1 – Схема безопасного устройства преобразования сигнала управления светофором

Здесь функция выполнения требования безопасности заключается в следующем: сигналом, определяющим включение излучения СДМ, является наличие оптического сигнала, получаемого из световода. Следовательно, при отсутствии сигнала из световода схема должна исключать появление сигнала, который может вызвать излучение СДМ при любых отказах элементов схемы: обрывы, замыкания и другие неисправности полупроводниковых и других элементов. Это дости-

гается использованием в безопасном устройстве специального автогенераторного импульсного транзисторного преобразователя постоянного напряжения, мощность на управление которым должна быть достаточно малой.

Схема устройства безопасной передачи сигнала реализована на МОП транзисторах, которые имеют большое входное сопротивление и в соответствии с этим они не потребляют мощности на управление. Световод, по которому передаётся оптический сигнал от поста электрической централизации или от другого управляющего объекта, передает излучение на фотодиоды $VD_{\phi 1}, VD_{\phi i}$. Они функционально являются элементом солнечной батареи [101], который вырабатывает постоянное напряжение $U_{упр}$, управляющее работой безопасного устройства. Поэтому основы теории работы этого функционального узла, изложенные в [101], могут быть применены в данном случае.

Эквивалентная схема преобразования оптического сигнала в электрический и вольтамперная характеристика фотодиодов приведены на рисунке 5.2, а, б [101]. При анализе примем, что емкостными составляющими $p-n$ перехода светодиодов можно пренебречь, так как сигнал, приходящий от световода, является постоянным и его временные изменения за счёт изменения режима работы светофора гораздо больше, чем постоянные времени изменения инерционных процессов, происходящих в $p-n$ переходе.

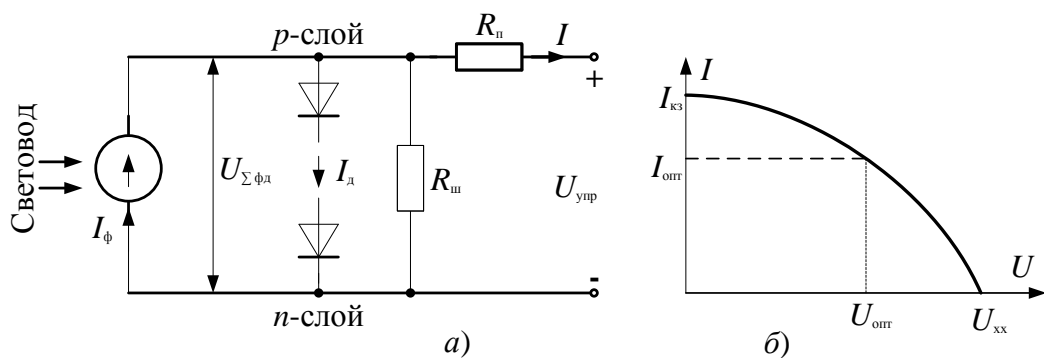


Рисунок 5.2 – Эквивалентная схема фотодиодов (а)
и их вольтамперная характеристика (б)

Как видно из характеристики, приведенной на рисунке 5.2, б, существует оптимальная величина выходного тока фотодиодов $I_{\text{опт}}$, которой соответствует аналогично оптимальное значение напряжения $U_{\text{опт}}$. Они определяют максимальное значение мощности, $P_{\text{н.мах}} = U_{\text{опт}} \cdot I_{\text{опт}}$, отдаваемой в нагрузку. Это соответствует классической теории проектирования солнечных батарей: указанные значения тока и напряжения определяют максимальную мощность, которая будет отдаваться в нагрузку [101].

Уравнение, определяющие параметры нагрузки фотодиодной группы, имеет следующий вид [101]:

$$I_{\text{н}} = I_{\text{ф}} - I_{\text{о.н.}} \left\{ \exp \left[\frac{e(U_{\text{упр}} + I_{\text{н}} R_{\text{п}})}{AkT} \right] - 1 \right\} - \frac{U_{\text{упр}}}{R_{\text{ш}}}, \quad (5.1)$$

где $I_{\text{н}}$ – ток нагрузки (выходной ток) элемента солнечной батареи, А;

A – коэффициент, уточняющий различие между реальной и теоретической вольт-амперной характеристиками;

$R_{\text{п}}$ – последовательное сопротивление солнечного элемента, Ом;

$R_{\text{ш}}$ – шунтовое сопротивление солнечного элемента, Ом;

$I_{\text{ф}}$ – фототок, протекающий через переход, А;

$I_{\text{о.н.}}$ – обратный ток насыщения перехода, А;

e – заряд электрона, Кл;

T – абсолютная температура, К.

Уравнение (5.1) относительно тока $I_{\text{н}}$ и напряжения $U_{\text{упр}}$ является трансцендентным, в общем виде не решаемым. Поэтому практическая реализация энергетических систем солнечных электростанций с точки зрения получения максимальной выходной мощности выполняется при помощи систем автоматического управления. Эти системы методом последовательных приближений непрерывно выполняет промежуточные вычисления величины мощности, определяя на основе этого точку максимума отдаваемой мощности электростанции.

Если в рассматриваемой схеме применяются МОП транзисторы с большим входным сопротивлением, то от известного принципа необходимости получения максимальной мощности в нагрузке можно отказаться. В этом случае за счет появляющейся возможности значительного уменьшения выходного тока фотодиодов, близкого к $I = 0$ А, напряжение $U_{\text{упр}}$ принципиально увеличится до величин, которые требуются для выполнения заданных значений порогового напряжения $U_{\text{зи.пор}}$ существующих МОП транзисторов. Очевидно, что для снижения величины управляющего напряжения $U_{\text{упр}}$ рациональным является использование МОП транзисторов с возможно меньшими значениями порогового напряжения $U_{\text{зи.пор}}$.

В данном случае рациональным является работа фотодиодной системы безопасного устройства в области вольтамперной характеристики, близкой к точке напряжения холостого хода $U_{\text{хх}}$. График вольтамперной характеристики (рисунок 5.2, б) показывает, что с уменьшением тока I выходное напряжение фотодиодной системы увеличивается и в пределе $U_{\text{упр}} \rightarrow U_{\text{хх}}$.

В соответствии с изложенным, для увеличения напряжения $U_{\text{упр}}$ требуется увеличение сопротивления резисторов $R1$ и $R2$ (рисунок 5.1). Так как входное сопротивление МОП транзисторов велико и составляет $R_{\text{вх}} = 10^2 - 10^{12}$ Ом и более, то величины сопротивлений $R1$ и $R2$ могут быть достаточно большими, чтобы выходное напряжение фотодиодной группы приближалось к значению $U_{\text{хх}}$. При этом назначение верхнего предела увеличения сопротивлений $R1$ и $R2$ будет определяться выбором частоты работы импульсного преобразователя, что, в свою очередь, обусловлено влиянием емкостей $p-n$ переходов фотодиодов и соответствующих паразитных межэлектродных емкостей МОП транзисторов схемы, приведенной на рисунке 5.1.

Для практического применения анализируемой схемы и нахождения количества последовательно включенных фотодиодов $N_{\text{фд}}$ можно принять, что напряжение $U_{\text{фд}} = 0,5 - 0,6$ В [101]. Тогда требуемое количество последовательно включенных единичных фотодиодов схемы определяется:

$$N_{\text{фд}} > \frac{U_{\text{упр}}}{U_{\text{фд}}} = \frac{U_{\text{зи}}}{U_{\text{фд}}}, \quad (5.2)$$

где $U_{\text{зи}}$ – напряжение затвор-исток, требующееся для создания открытого состояния МОП транзисторов схемы при протекании по ним тока стока I_c , В.

Так как токи стока транзисторов $VT1$ и $VT2$ достаточно малы, то для них выражение (5.2) может быть представлено в виде:

$$N_{\text{фд}} > \frac{U_{\text{зи.пор}}}{U_{\text{фд}}}, \quad (5.3)$$

где $U_{\text{зи.пор}}$ – пороговое напряжение затвор-исток МОП транзистора, В.

У транзисторов $VT3$ и $VT4$ ток стока существенно больше. Он определяется мощностью излучателя $P_{\text{изл}}$ и напряжением питания $E_{\text{п}}$ схемы: $I_c = \frac{P_{\text{изл}}}{E_{\text{п}}}$. Для этих транзисторов выражение (5.2) приобретает вид

$$N_{\text{фд}} > \frac{\frac{P_{\text{изл}}}{SE_{\text{п}}} + U_{\text{зи.пор}}}{U_{\text{фд}}}, \quad (5.4)$$

где S – крутизна характеристики МОП транзисторов $VT3$ и $VT4$, мА/В.

Нагрузка на фотодиодную группу на различных этапах работы импульсного преобразователя различна. При открытом состоянии транзистора $VT4$ и закрытом состоянии $VT3$ ток нагрузки определяется:

$$I_{\text{упр}} = \frac{E_{\text{упр}} - U_{\text{си1}}}{R1}. \quad (5.5)$$

При открытом состоянии транзистора $VT3$ и закрытом состоянии $VT4$ получим:

$$I_{\text{упр}} = \frac{E_{\text{упр}} - U_{\text{д}} - U_{\text{си3}}}{R2}, \quad (5.6)$$

где $U_{\text{си1}}$ и $U_{\text{си3}}$ –напряжение сток-исток транзисторов $VT1$ и $VT3$ при нахождении их в открытом состоянии, В;

$U_{\text{д}}$ – падение напряжения на диоде VD (рисунок 5.1), В.

Таким образом, если значения напряжений $U_{\text{зи.пор}}$ невелики и составляют несколько единиц В, то различие в нагрузках на фотодиодную группу может быть существенной. Это обусловит появление динамических пульсаций напряжения источника $E_{\text{п}}$, которые могут вызвать сбои в импульсной работе устройства. Поэтому условия (5.3) и (5.4) должны выполняться с определенным коэффициентом запаса: $k = 1,3-1,5$ и с возможным введением сглаживающих конденсаторов по напряжению $E_{\text{п}}$.

Так как наибольшее влияние на быстродействие МОП транзистора, работающего в импульсном режиме, оказывает емкость затвор-исток $C_{\text{зи}}$, то для обеспечения функционирования импульсного преобразователя на достаточно высокой частоте $f_{\text{пр}}$ требуется выполнение условий:

$$R1C_{\text{зи}} \ll \frac{1}{f_{\text{пр}}}, \quad R2C_{\text{зи}} \ll \frac{1}{f_{\text{изл}}}. \quad (5.7)$$

Они служат руководством для выбора частоты преобразования $f_{\text{пр}}$ и величины сопротивлений резисторов $R1$ и $R2$.

Как было показано выше, для увеличения напряжения $U_{\text{упр}}$ необходимо увеличение сопротивлений резисторов $R1$ и $R2$. Это требуется также для уменьшения количества $N_{\text{фд}}$ фотодиодов, что влечет за собой упрощение конструкции фотоприемного устройства и снижение его стоимости. Однако, в соответствии с выражениями (5.7), это препятствует возможности повышения частоты $f_{\text{пр}}$. Известно также, что масса, габариты, материалоемкость и стоимость импульсных преобра-

зователей снижаются с увеличением частоты преобразования электрической энергии.

В соответствии с изложенным, решение вопроса выбора сопротивлений $R1$ и $R2$ заключается в решении целевой функции вида:

$$R1, R2 = F(N_{\text{фд}}, f_{\text{пр}}, G, D), \quad (5.8)$$

где G – условный показатель, выражающий массу, габариты и материалоемкость устройства;

D – аналогичный условный показатель, определяющий стоимость устройства.

Практически решение целевой функции (5.8), то есть достижение оптимальных показателей устройства, заключается в итерационном выборе примененных при разработке элементов схемы и их параметров и определении полученных значений $N_{\text{фд}}, f_{\text{пр}}, G, D$.

Предложенный подход к разработке безопасного устройства передачи и преобразования оптического сигнала дает возможность получить наибольшую эффективность при его проектировании.

Необходимо учитывать, что предложенное техническое устройство для управления светофорами по ВОЛС в некоторых случаях имеет определенное функциональное ограничение по применению. Оно заключается в необходимости наличия в устройстве источника питания $E_{\text{п}}$, который иногда отсутствует в традиционных схемах управления. Хотя при наличии на станциях разветвленной системы постоянных и переменных напряжений это негативное свойство устройства не является принципиальным ограничением. Кроме того, в предлагаемой системе управления стационарными светофорами возможно использование кабелей, содержащих как световодные жилы, так и металлические.

Однако, учитывая получаемые при этом преимущества применения ВОЛС в системах управления светофорами, рациональность отказа от традиционных схем управления и применения предлагаемых устройств, представляется вполне обоснованной.

Необходимо отметить, что использование описанного безопасного устройства возможно не только для управления светодиодными светофорами. Как видно из рисунка 5.1, выходная мощность импульсного преобразователя напряжения определяется лишь выбранным типом МОП транзисторов и крутизной их характеристики. Так как входное сопротивление МОП транзистора велико, то увеличение тока стока не приводит к необходимости значительного увеличения напряжения $U_{упр}$. Поэтому применение подобного устройства возможно и для управления ламповыми светофорами, а также другими устройствами железнодорожной автоматики и телемеханики. Это, например, может относиться к системам централизованной автоблокировки с размещением управляющей аппаратуры, например, на станции.

5.2 Принципы реализации схем контроля функционирования светофора с использованием ВОЛС

Принципы реализации контроля излучения светофора с передачей контрольной информации по волоконно-оптическим линиям связи основываются на том, что последовательно в цепь питания излучателя включается светодиод, излучение которого является признаком функционирования соответствующего показания светофора. Очевидно, что этот оптический сигнал по световоду может быть передан на пост электрической централизации или другой пост управления светофорами.

Возможны различные варианты практической реализации подобного принципа схем контроля [70, 71], два из которых приведены на рисунке 5.3, *а*, *б*. В первой из них (рисунок 5.3, *а*) контроль осуществляется со стороны переменного напряжения. Поэтому эта схема может быть использована в светофорах с лампами накаливания.

Вторая схема (рисунок 5.3, б) контролирует постоянный ток, протекающий через излучатель, выполненный на СДМ с соответствующими схемами реализации источников тока.

Рассмотренные схемы реализуют контроль излучения СДМ, они функционально и конструктивно совместимы с устройствами управления светофорами. Это позволяет полностью отказаться от применения металлосодержащих кабелей с получением соответствующих преимуществ.

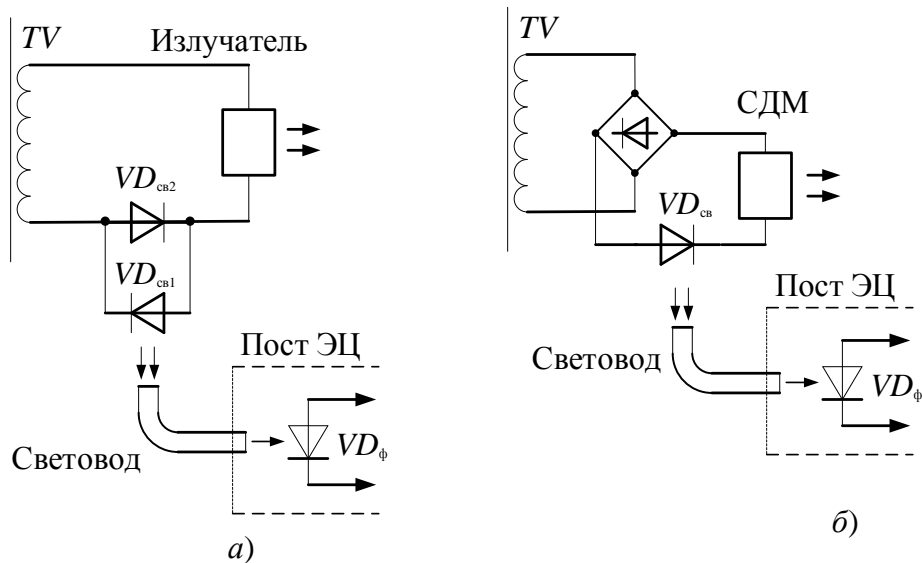


Рисунок 5.3 – Схемы реализации контроля излучения светофора

5.3 Принципы реализации систем управления светофорами с использованием ВОЛС

Исходя из вышеизложенного, могут быть предложены несколько структурных схем управления светофорами по волоконно-оптическим линиям связи.

Первая из них (рисунок 5.4) относится к системе управления входными светофорами станции.

Здесь, вследствие того, что в релейном шкафу (РШ) входного светофора всегда имеется тот или иной источник электропитания, он может быть использован в качестве напряжения $E_{\text{п}}$ безопасного элемента (рисунок 5.1). Следовательно, для этого случая реализации управления светофорами по волоконно-оптическим линиям связи дополнительного источника электропитания не требуется.

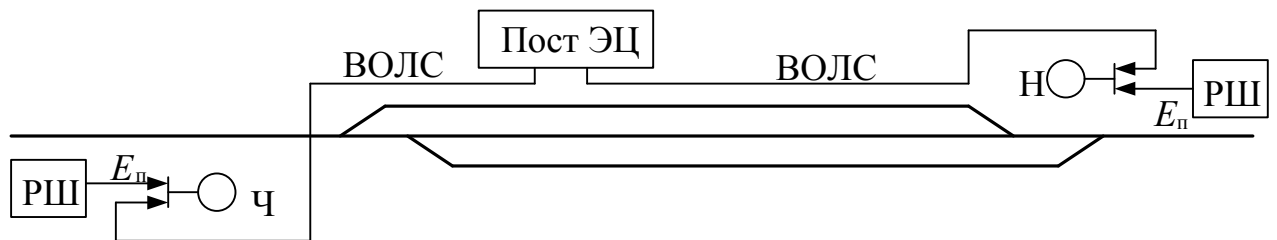


Рисунок 5.4 – Схема управления входными светофорами

Аналогичным образом может быть реализовано управление удаленными перегонными светофорами при централизованной автоблокировке.

На рисунке 5.5 приведена структурная схема управления выходными светофорами станции. Здесь возможны два варианта построения структуры управления. Первый из них заключается в том, что для организации напряжения $E_{\text{п}}$ используется источник питания, расположенный, например, в горловине станции. Другой вариант (условно не показанный) заключается в использовании специального сигнального кабеля, в состав которого входят как жилы ВОЛС, так и металлические жилы для передачи напряжения питания на светофоры. В этом случае питание безопасного устройства (рисунок 5.1) осуществляется от поста электрической централизации.

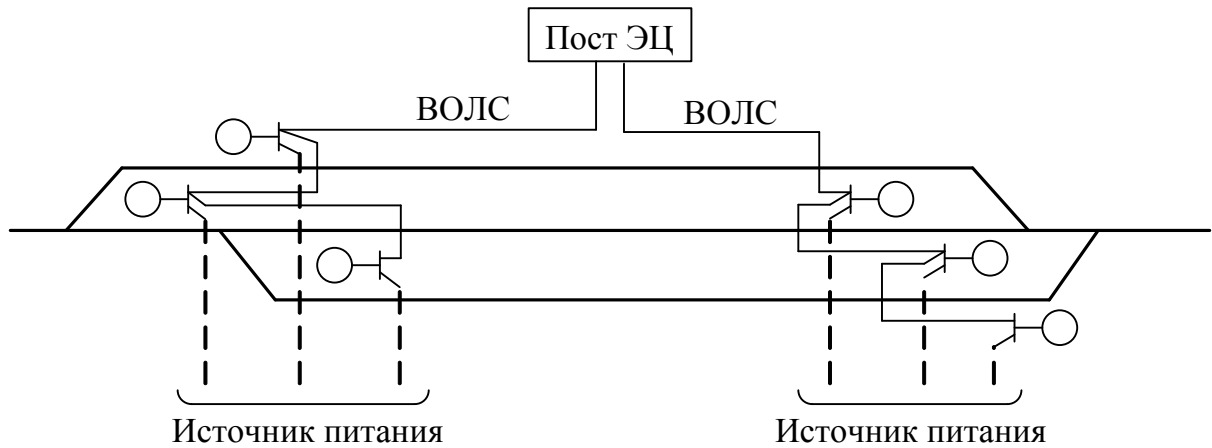


Рисунок 5.5 – Схема управления выходными светофорами

5.4 Выводы и заключение по главе 5

1. Рассмотренные в данной главе вопросы показали практическую возможность применения волоконно-оптических линий связи для управления светофорами. При этом использование данного принципа управления дает ряд преимуществ, заключающихся в повышении безопасности движения поездов и улучшении экономических показателей за счет отказа от использования металло-содержащих сигнальных кабелей.

2. Выполнен анализ работы схемы безопасного устройства, управляющего излучением светофора, и определены необходимые параметры элементов схемы, которые требуются для функционирования устройства и оптимизации его работы.

3. Определено, что использование принципа оптоэлектронного управления МОП транзисторами позволяет реализовать принцип преобразования мало-мощного с энергетической точки зрения оптического сигнала, передаваемого по волоконно-оптическим линиям связи, в достаточно мощный сигнал для управления излучением соответствующих показаний светофора.

4. Выполнен анализ преимуществ и недостатков предлагаемого принципа управления светофорами, который определил области его использования в стационарных и перегонных устройствах СЦБ.

5. Предложен вариант осуществления контроля излучения светофора без огневого электромагнитного реле с передачей контрольной информации на пост электрической централизации по волоконно-оптическим линиям связи.

6. Сделан вывод, что рассмотренные структурные и схмотехнические решения могут быть использованы для управления и контроля как светодиодных светофоров, так и светофоров с лампами накаливания.

7. Предложено несколько вариантов структурных схем управления входными и выходными светофорами на станциях, выбор применения которых определяется конкретными условиями. Показано, что рассмотренный принцип управления применим и для перегонных светофоров, в частности, при автоблокировке с централизованным расположением аппаратуры на станциях.

8. Рассмотренный в данном разделе принцип оптоэлектронного управления МОП транзисторами и реализации безопасного устройства могут более широко применяться в устройствах автоматики и телемеханики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В результате проведенного научного анализа светодиодных светофоров и систем управления ими определены недостатки, влияющие на долговечность, работоспособность, а также на безопасность движения поездов в целом.

2. Предложены направления улучшения характеристик светодиодных светофоров, которые заключаются в использовании схем резервирования светодиодов СДМ. Полученные результаты показали преимущества данных устройств перед известными схемами светодиодных светофоров.

3. На основании научного анализа функционирования удаленного светофора управляемого переменным напряжением с учетом влияния на его работу электромагнитных помех в кабельных линиях, определено, что максимально допустимые длины сигнальных кабелей, при которых исключается засветка ненадлежащего показания светофора составляют не более 1,0 км. Предложенные способы исключения подобного эффекта позволяют увеличить максимально допустимую длину сигнальных кабелей до нескольких десятков километров

4. В результате научного анализа существующих схем контроля функционирования светофоров с управлением переменным напряжением в режиме излучения выявлено, что при больших длинах сигнальных кабелей данные схемы не обеспечивают требований по безопасности движения поездов. Определены критические параметры кабелей и предложены методы, которые дают возможность обеспечить работоспособность схем контроля при любых длинах сигнальных кабелей.

5. Для решения вопроса определения работоспособности СДМ при отсутствии ее излучения (контроль холодного состояния), были предложены принципиально новые методы, заключающиеся в использовании физических свойств *p-n* перехода светодиодов, таких как его емкость и температурный потенциал

6. При рассмотрении проблемы применения ВОЛС для передачи сигнала управления удаленными объектами СЦБ, предложено несколько вариантов орга-

низации структуры управления стационарными светофорами, и выявлены их преимущества и недостатки. Эти решения позволят отказаться от использования металлосодержащих кабелей.

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ВАХ – вольтамперная характеристика

ВОЛС – волоконно-оптические линии связи

ИМС – интегральные микросхемы

КПД – коэффициент полезного действия

МОП – металл-окисел-полупроводник

ОАО «РЖД» – открытое акционерное общество «Российские железные дороги»

СДМ – светодиодная матрица

СЖАТ – системы железнодорожной автоматики и телемеханика

СЦБ – сигнализация, централизация и блокировка

ТКН – температурный коэффициент напряжения

ЦАБ – автоблокировка с централизованным размещением аппаратуры

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ададунов, С.Е. Концепция комплексной программы «Внедрение светодиодной техники в ОАО «РЖД» [Текст] / С.Е. Ададунов, Е.Н. Розенберг, М.А. Мурашова // Автоматика, связь, информатика. – 2009. – № 2. – С. 2–5.
2. Савельев, Е.О. Исследование и разработка направлений совершенствования высокоэффективных светодиодных светофоров [Текст] : дис. ... на соиск. уч. ст. канд. техн. наук: 05.22.08 / Савельев Евгений Олегович. – Екатеринбург: УрГУПС, 2005. – 150 с.
3. ГОСТ Р-56057 – 2014. Системы светодиодные светофорные для железнодорожной автоматической сигнализации. Общие технические требования и методы испытаний. – М. : Стандартинформ, 2014. – 44 с.
4. ТР ТС 003/2014. Технический регламент ТС. О безопасности инфраструктуры железнодорожного транспорта [Электронный ресурс] . – М. : ОАО «РЖД»
http://www.consultant.ru/document/cons_doc. (дата обращения: 12.12.14).
5. Алферов, Ж.И. История и будущее полупроводниковых гетероструктур [Текст] / Жорес Алферов // ФТП, т. 32. – 1998. – № 1. – С. 3–18.
6. Абрамов, В.С. Белые светодиоды [Текст] / В.С. Абрамов, Д.Р. Агафонов, А.В. Шишов и др. // Светодиоды и лазеры. – 2002. – № 1. – С. 25–29.
7. Bullough, J.D. Response to Simulated Traffic Signals Using Light-Emitting diodes and incandescent sources [Текст] / J.D. Bullough and others // Rensselaer Polytechnic Institute Record (1724). – 2001. – P. 39–46. (англ.).
8. Bullough, J.D. Effects of sweeping, color and luminance. Distribution Response to Automotive Stop Lamps [Текст] / J.D. Bullough // SAE Technical Paper Series. – 2002 – 01. (англ.).

9. Nakamura, S. The blue laser diode [Текст] / S. Nakamura, J. Fasol // Springer, 1997. – 296 p. (англ.).
10. LeMunh, P. Silicon light emitting devices for integrated application [Электронный ресурс] / P. LeMunh // 2003. – 144 p. (англ.).
<http://www.readbag.com/> (дата обращения: 15.01.2015).
11. Energy conservation Program: Test procedures for light-emitting diode lamp, 2012. [Электронный ресурс] (англ.).
<https://www.federalregister.gov/-articles/2012/04/09/2012-8469/energy-conservation-program-test-procedures-for-light-emitting-diode-lamps> (дата обращения: 01.03.2015)
12. Высокоскоростные железные дороги мира. [Электронный ресурс]
<http://eriksrailnews.com/archive/hst2.html> (дата обращения: 26.01.15)
13. Светофоры мира. [Электронный ресурс] <http://www.railsigns.uk/>
(дата обращения: 10.09.14).
14. Обзор светодиодных модулей для светофоров. [Электронный ресурс]
<http://www.etrailer.com/TrailerLights/Optronics/STL90AB.html> (дата обращения: 30.01.15).
15. Уральский оптико-механический завод. Екатеринбург [Электронный ресурс] .
http://uomz.ru/products/izdeliya_dlya_jeleznoy_dorogi/ (дата обращения: 28.01.15).
16. ОАО РОСАТ (Санкт-Петербург). [Электронный ресурс]
<http://rosat.org> (дата обращения: 15.01.15)
17. Проэлектро (Н.Новгород). [Электронный ресурс]
http://proelectro.ru/products/-id_-71587 (дата обращения: 06.02.15).
18. Трансигнал (Нижний Новгород). [Электронный ресурс]
<http://www.8e.ru/firms/a2122.php> (дата обращения: 06.02.15).
19. Энергопортал (Ростов-на-Дону). [Электронный ресурс]
<http://rostov.energoportal.ru/catalog/> (дата обращения: 10.01.15).
20. Вест Трейдинг (Казахстан). [Электронный ресурс]
<http://-west-trading.kz/modul.html> (дата обращения: 23.01.15).

21. Альфа ЖАТ (Нижний Новгород). [Электронный ресурс]
<http://alfazhat.ru/ru/katalog/sveto-fory-machtovye> (дата обращения: 22.02.15).
22. Элтэз (Армавир). [Электронный ресурс]
http://www.aemz.elteza.ru/index.php?Itemid=43&id=351&option=com_content&task=view (дата обращения: 01.03.15).
23. ОЦВ (Москва). [Электронный ресурс]
<http://www.eav.ru/publ1.php?publid=2010-12a19> (дата обращения: 27.01.15).
24. KAZUS.RU. Электронный портал. [Электронный ресурс]
<http://kazus.ru/articles/249.html> (дата обращения: 12.12.14).
25. Трансигнал (Нижний Новгород). [Электронный ресурс]
http://transsignal.ru/production/-?ELEMENT_ID=151&SECTION_ID=16 (дата обращения: 14.01.15).
26. Обзор светодиодных светофоров на ОАО «РЖД». [Электронный ресурс]
<http://www.moluch.ru/> (дата обращения: 01.03.15).
27. Union Swith & Signal. [Электронный ресурс]
<http://www.switch.com> (дата обращения: 15.01.14).
28. Safetran. [Электронный ресурс]
<http://www.safetran.com/> (дата обращения: 20.01.14).
29. Lincoln Industries. [Электронный ресурс]
<http://www.lincoln-industries.com/> (дата обращения: 08.03.14).
30. Alstom. [Электронный ресурс]
<http://www.transport.alstom.com/> (дата обращения: 25.02.14).
31. GE Harris. [Электронный ресурс]
<http://www.geharris.com/> (дата обращения: 09.07.14).
32. Signal House. [Электронный ресурс]
<http://www.collis.co.uk/> (дата обращения: 01.03.14).
33. NMA. [Электронный ресурс]
<http://www.nma.nl/railsign/> (дата обращения: 29.01.14)

34. Есюнин, В.И. Светодиодные проездные светофоры [Текст] / В.И. Есюнин, А.В. Ефрюшкин // Автоматика, связь, информатика. – 1999. – № 12. – С. 25–26.

35. Есюнин, В.И. Магистральные светофоры на светодиодах [Текст] / В.И. Есюнин // Автоматика, связь, информатика. – 2001. – № 8. – С. 33–34.

36. Пат. 2207745 Российская Федерация, МПК⁷ H 05 B 37/00, B 61 L 5/18, G 08 G 1/095. Светодиодный светофор [Текст] / Б.С. Сергеев, С.А. Щиголов, В.В. Наговицын ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО УрГУПС. – № 2001124300/28; заявл. 30. 08. 01; опубл. 27.06.03, Бюл. № 18.

37. Пат. 2231826 Российская Федерация, МПК⁷ G 08 G 1/095. Светодиодный светофор [Текст] / Е.О. Савельев, Б.С. Сергеев ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО УрГУПС. – № 2002126982/09; заявл. 09. 10. 02; опубл. 27.06.04, Бюл. № 18.

38. Пат. 2236042 Российская Федерация, МПК⁷ G 08 G 1/095, B 61 L 23/00. Светодиодный светофор [Текст] / Б.С. Сергеев, Е.О. Савельев ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО УрГУПС. – № 2002123011/11; заявл. 27. 08. 02; опубл. 20.03.04, Бюл. № 25.

39. Пат. 2237292 Российская Федерация, МПК⁷ G 08 G 1/095, B 61 L 23/00. Светодиодный светофор (Варианты) [Текст] / Б.С. Сергеев, Е.О. Савельев ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО УрГУПС. – № 2002128718/11; заявл. 25. 10. 02; опубл. 27.09.04, Бюл. № 27.

40. Пат. 2238592 Российская Федерация, МПК⁷ G 08 G 1/095, B 61 L 23/00. Трехзначный светодиодный светофор [Текст] / Е.О. Савельев, Б.С. Сергеев ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО УрГУПС. – № 2003108321/11; заявл. 26. 03. 03; опубл. 20.10.04, Бюл. № 29.

41. Пат. 2245003 Российская Федерация, МПК⁷ H 05 B 43/00. Устройство отображения информации [Текст] / Б.С. Сергеев, Е.О. Савельев ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО УрГУПС. – № 2003136341/28; заявл. 15. 12. 03; опубл. 20.01.05, Бюл. № 2.

42. Пат. 2249524 Российская Федерация, МПК⁷ В 61 L 5/18, G 08 G 1/095, H 05 B 37/02. Регулируемый светодиодный светофор [Текст] / Е.О. Савельев, Б.С. Сергеев ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО УрГУПС. – № 2003101005/11; заявл. 14. 01. 03; опубл. 10.04.05, Бюл. № 10.

43. Пат. 2250846 Российская Федерация, МПК⁷ В 61 L 5/18, В 61 L 23/00. Конденсаторный светодиодный светофор [Текст] / Б.С. Сергеев, Е.О. Савельев ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО УрГУПС. – № 2003110274/11; заявл. 09. 04. 03; опубл. 27.04.05, Бюл. № 12.

44. Пат. 2262217 Российская Федерация, МПК⁷ H 05 B 43/00. Способ управления излучением светодиодной матрицы и устройство для его осуществления [Текст] / Б.С. Сергеев, Е.О. Савельев ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО УрГУПС. – № 2003133622/28; заявл. 18. 11. 03; опубл. 10.10.05, Бюл. № 28.

45. Сапожников, Вл.В. Электропитание устройств железнодорожной автоматики, телемеханики и связи [Текст] / Вл.В. Сапожников, Н.П. Ковалев, В.А. Кононов, А.М. Костроминов, Б.С. Сергеев. – М. : Маршрут, 2005. – 453 с.

46. Дмитриев, С. Драйверы светодиодов: назначение и функциональные возможности [Электронный ресурс] / С. Дмитриев // Полупроводниковая светотехника. – 2009. – №2. – С. 24-27.

http://www.lede.ru/articles/ledsupply/2009_2_24.php/ (дата обращения: 27.02.15)

47. Давиденко, Ю.Н. Современная светотехника в освещении [Текст] / Ю.Н. Давиденко. – СПб.: Наука и техника, 2008. – 320 с.

48. Пат. 2237290 Российская Федерация, МПК⁷ G 08 G 1/095. Трехзначный светодиодный светофор [Текст] / Е.О. Савельев, Б.С. Сергеев.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО УрГУПС. – №2002123013/11; заявл. 27.08.02; опубл. 27.09.04, Бюл. № 27.

49. Пат. 2237293 Российская Федерация, МПК⁷ G 08 G 1/095. Трехзначный светодиодный светофор [Текст] / Б.С. Сергеев, Е.О. Савельев ;

заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО УрГУПС. – №2002135209/11; заявл. 24.12.02; опубл. 27.09.04, Бюл. № 27.

50. Пат. 2239575 Российская Федерация, МПК⁷ В 61 L 5/18, G 08 G 1/095, H 05 B 37/00. Трехзначный светодиодный светофор [Текст] / Б.С. Сергеев, Е.О. Савельев ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО УрГУПС. – №2002126988/11; заявл. 09.10.02; опубл. 10.11.04, Бюл. № 31.

51. Пат. 2276032 Российская Федерация, МПК⁷ В 61 L 5/18, В 61 L 23/00. Устройство контроля светофора [Текст] / Б.С. Сергеев, Н.Б. Курченкова ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО УрГУПС. – №2004133437/11; заявл. 16.11.04; опубл. 10.05.06, Бюл. № 13.

52. Сергеев Б.С. Светодиодные светофоры: проблемы разработки и применения [Текст] / Б.С. Сергеев, С.А. Щиголев, В.Г. Любар // Автоматика, связь, информатика. – 2001. – № 5. – С. 19–23.

53. Световые сигнальные указатели на базе светодиодов [Текст] // Железные дороги мира. – 2000. – № 3. – С. 63–65.

54. Светофоры на светодиодах на железных дорогах США [Текст] // Железные дороги мира. – 2002. – № 7. – С. 68–70.

55. Иванов, В.И. Параметры и характеристики полупроводниковых излучающих приборов [Текст] / В.И. Иванов, А.И. Аксенов, А.М. Юшин; под общ. ред. И.Ф. Николаевского / Полупроводниковая электроника в технике связи : сб. статей. – Вып. 22 – М.: Связь, 1982. – С. 188–220.

56. Носов, Ю.С. Оптроны и их применение [Текст] / Ю.С. Носов, А.С. Сидоров. – М. : Радио и связь, 1981. – 280 с.

57. Сергеев, Б.С. Выбор направлений работ по разработке светодиодных светофоров [Текст] / Б.С. Сергеев, Е.О. Савельев // Вестник инженеров электромехаников железнодорожного транспорта. – Вып. 1. – Самара : СамГАПС, 2003. – С. 264–267.

58. Савельев, Е.О. Фоторезистивная N-элементная матрица [Текст] / Е.О. Савельев, Б.С. Сергеев // Вестник инженеров электромехаников железнодорожного транспорта. – Вып. 1. – Самара : СамГАПС, 2003. – С 267–270.
59. Савельев, Е.О. Вопросы реализации светодиодных светофоров [Текст] / Е.О. Савельев, Б.С. Сергеев // Труды IV научно-практ. конференции / Безопасность движения поездов. – М. : МПС, 2003. – С. 11–23.
60. Савельев, Е.О. Новое поколение светофоров [Текст] / Е.О. Савельев, Б.С. Сергеев / В сб. докладов научно-практ. конференции «Инновации ОАО «РЖД» / Инновации в эксплуатации и развитии инфраструктуры железнодорожного транспорта. – М. : ОАО «РЖД», ВНИИЖТ, 2004. – С. 211–212.
61. Сергеев, Б.С. Управление светодиодными матрицам с помощью реактивных элементов [Текст] / Б.С. Сергеев, Э.М. Ромаш, Е.О. Савельев // Электричество. – 2004. – № 9. – С. 57–62.
62. Савельев, Е.О. Анализ влияния разброса параметров схемы последовательно включенных светодиодов в импульсном режиме работы на переходный процесс [Текст] / Е.О. Савельев // В сб. докладов IV научно-практической конф. / Молодые ученые – транспорту. – Екатеринбург : УрГУПС, 2003. – С. 143–148.
63. Савельев, Е.О. Варианты двухпроводных схем управления показаниями светодиодных светофоров [Текст] / Е.О. Савельев // В сб. докл. Всероссийской НТК «Проблемы эксплуатационной работы на железнодорожном транспорте / Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта. – Екатеринбург : УрГУПС, 2002. – 2 т. – С. 66–69.
64. Савельев, Е.О. Способы реализации режимов двойного снижения напряжения и светомаскировки светодиодных светофоров [Текст] / Е.О. Савельев // В сб. докл. Всероссийской НТК «Проблемы эксплуатационной работы на железнодорожном транспорте» / Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта. – Екатеринбург: УрГУПС, 2002. – 2 т. – С. 69–73.

65. Vociycle Traffic Control Signal Heafs Light-Emitting Diode Traffic Control Signal Modules [Текст] / Engineers Institute of Transportation, ITE, Washington, 1998. (англ.).
66. Moley, M. Polimer Plys Eye Light Integreation Lens Arrays for Digital Projector [Текст] / M Moley, J Munro // SID, 2000. (англ.).
67. Progressive Railroading. – 2000. – № 4. [Электронный ресурс] (англ.). <http://www.progressiverailroading.com/pr/default.aspx?year=2000&month=04> (дата обращения: 03.03.15)
68. Progressive Railroading. – 2001. – № 4. [Электронный ресурс] (англ.). <http://www.progressiverailroading.com/pr/default.aspx?year=2001&month=04> (дата обращения: 24.03.15)
69. Сергеев, Б.С. Схемы оптоэлектронного управления мощными МОП-транзисторами [Текст] / Б.С. Сергеев // Современная электроника. – 2008. – № 6. – С. 38–41.
70. Сергеев, Б.С. Управление стационарными светофорами по волоконно-оптическим линиям связи [Текст] / Б.С. Сергеев, И.Г. Тильк // Труды 2-й Международной конференции «Система безопасности на транспорте». – Прага – Пшибрам, Чехия, 2006. – С. 28–30.
71. Сергеев, Б.С. Управление стационарными светофорами по волоконно-оптическим линиям связи [Текст] / Б.С. Сергеев, Н.Б. Курченкова // Вестник Уральского межрегионального отделения Российской академии транспорта. – Вып. 5. – Тюмень, 2005. – С. 82–84.
72. Сергеев, Б.С. Перспективы и возможности применения солнечных батарей на железнодорожном транспорте [Текст] / Б.С. Сергеев // Вестник Уральского межрегионального отделения Российской академии транспорта. – Вып. 5. – Тюмень, 2005. – С. 85–88.
73. Сергеев, Б.С. Анализ схем управления светодиодами светофорами [Текст] / Б.С. Сергеев, М.А. Оськина // Транспорт Урала. – 2009. – № 1 (20). – С. 21–23.

74. Сергеев, Б.С. Интеллектуальные возможности применения светодиодных систем на локомотивах железнодорожного транспорта [Текст] / Б.С. Сергеев, И.В. Харитонов // Труды III НТК с международным участием / Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование. – М. : ОАО НИИАС, 2014. – С. 217–219.

75. Сергеев, Б.С. Анализ работы светодиодного резервированного светофора [Текст] / Б.С. Сергеев, М.А. Оськина // Вестник УрГУПС. – 2014. – № 4 (24). – С. 4–11.

76. Сергеев, Б.С. Сглаживающие фильтры однофазного преобразователя напряжения [Текст] / Б.С. Сергеев // Электропитание. – 2013. – № 4. – С. 24–37.

77. Оськина, М.А. Направления совершенствования светодиодных светофоров [Текст] / Б.С. Сергеев, М.А. Оськина, В.А. Сисин // Транспорт Урала. – 2013. – № 3 (38). – С. 66–68.

78. Пат. 2399957 Российская Федерация, МПК⁷ G 08 G 1/095. Светодиодный светофор с контролем холодного состояния [Текст] / Р.Ш. Валиев, Ш.К. Валиев, М.А. Оськина, Б.С. Сергеев ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО УрГУПС. – №2009123707/11; заявл. 22.06.09; опубл. 20.09.10, Бюл. № 26.

79. Пат. 2528523 Российская Федерация, МПК⁷ В 61 L 23/00. Резервированный светодиодный светофор [Текст] / М.А. Оськина, Б.С. Сергеев ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО УрГУПС. – №2013128827/11; заявл. 24.06.13; опубл 20.09.14, Бюл. №26.

80. Пат. 2544428 Российская Федерация, МПК⁷ В 61 L 5/18. Устройство управления светофором (Варианты) [Текст] / М.А. Оськина, Б.С. Сергеев ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО УрГУПС. – №2013141855/11; заявл. 12.09.13; опубл. 20.03.15, Бюл. № 8.

81. Пат. 2550743 Российская Федерация, МПК⁷ H 05 B 37/02. Светодиодный излучатель [Текст] / М.А. Оськина, Б.С. Сергеев ; заявитель и

патентообладатель ФГБОУ ВО УрГУПС. – №2013158833/07; заявл. 16.12.13; опубл. 10.05.15, Бюл. № 13.

82. Пат. 2556045 Российская Федерация, МПК⁷ В 61 L 5/18. Светофор [Текст] / М.А. Оськина, В.К. Донцов, Б.С. Сергеев ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО УрГУПС.–№2014118185/11; заявл. 05.05.14; опубл. 10.07.15, Бюл. № 19.

83. Сергеев, Б.С. Схемотехника функциональных узлов источников вторичного электропитания [Текст] / Б.С. Сергеев. – М. : Радио и связь, 1992. – 224 с.

84. Сергеев, Б.С. Анализ энергетической эффективности светодиодных светофоров [Текст] / Б.С. Сергеев, В.В. Наговицын, Е.О. Савельев // Межвуз. сб. научных трудов / Теория и практика железнодорожных и промышленных систем автоматики, телемеханики и связи. – Вып. 23 (105). – Екатеринбург : УрГУПС, 2003. – С. 156–164.

85. Kurchenkova, N.V. Capacitor – Type Sources of Secondary Power Supplies [Текст] / N.V. Kurchenkova, B.S. Sergeev // Electrical Technology Russia. – 1999. – №2. – P. 46–52. (англ.).

86. Сергеев, Б.С. Предельные возможности применения конденсаторных источников вторичного электропитания [Текст] / Б.С. Сергеев // Электросвязь. – 1996. – № 2. – С. 38–40.

87. Сергеев, Б.С. Управление светодиодными матрицами с помощью реактивных элементов [Текст] / Б.С. Сергеев, Э.М. Ромаш, Е.О. Савельев // Электричество. – 2004. – № 9. – С. 57–62.

88. Агафонов, Д.Р. Измерение световых характеристик сверхъярких светодиодов [Текст] / Д.Р. Агафонов, В.С. Иванов, В.И. Саприцкий // Светотехника. – 2000. – № 3. – С. 9–12.

89. Балашов, В.П. Характеристики и методы расчета оптоэлектронных приборов [Текст] / В.П. Балашов, А.К. Гребнев, В.П. Дмитриев // Итоги науки и техники (Сер. : «Электроника»). – М. : ВИНТИ РАН, 1989. – Т. 24. – С. 45–56.

90. Гордеев, В.А. Исследование фотометрических характеристик дорожных светофоров на светодиодах [Текст] / В.А. Гордеев, Р.И. Столяревская, А.И. Трубников // Сб. докл. XII НТК / Фотометрия и ее метрологическое обеспечение. – М., 1996. – С. 59–61.
91. Гребнев, А.К. Оптоэлектронные элементы и устройства [Текст] / А.К. Гребнев, В.Н. Гридин, Дмитриев В.П. – М. : Радио и связь, 1998. – 336 с.
92. Золина, К.Г. Спектры люминесценции голубых и зеленых светодиодов на основе многослойных гетероструктур InGaN/AlGaIn/GaN с квантовыми ямами [Текст] / К.Г. Золина, В.Г. Кудряшов, А.Н. Туркин, А.Э. Юнович // Физика и техника полупроводников. – 1997. – Т. 31. – Вып. 9. – С. 1055–1061.
93. Кудряшов, В.Г. Спектры и квантовый выход излучения с квантовыми ямами на основе гетероструктур из GaN-зависимость от тока и напряжения [Текст] / В.Г. Кудряшов, С.С. Мамакин, А.И. Туркин и др. // Физика и техника полупроводников. – 2001. – 35 т. – Вып. 7. – С. 861–868.
94. Мурашова, М.А. Оценка мешающего влияния осветительных приборов на видимость сигналов светофоров [Текст] / М.А. Мурашова, О.П. Пинчук, Л.П. Юдин // Вестник ВНИИЖТ. – 1995. – № 4. – С. 23–28.
95. Мурашова, М.А. О технических требованиях по рациональному размещению светосигнальных и осветительных приборов на станциях [Текст] / М.А. Мурашова, О.П. Пинчук, Л.П. Юдин // Вестник ВНИИЖТ. – 1995. – № 6–8. – С. 15–17.
96. Принято в эксплуатацию. Информация [Текст] / Автоматика, связь, информатика. – 2002. – № 1. – С. 39–40.
97. Сергеев, Б.С. Повышение энергетической эффективности индикаторных устройств с применением СДМ [Текст] / Б.С. Сергеев, В.В. Наговицын, Е.О. Савельев // Сб. тез. докл. IV Всероссийской НТК «УССЭ-22» / Устройства и системы энергетической электроники. – М. : НТФ «Энергетическая электроника» РАН, 2002. – С. 37–39.

98. Савельев, Е.О. Анализ влияния разброса параметров схемы последовательно включенных светодиодов в импульсном режиме на переходный процесс [Текст] / Е.О. Савельев // Сб. докл. IV научно-практической конф. / Молодые ученые – транспорту. – Екатеринбург : УрГУПС, 2003. – С. 143–149.

99. Шуберт, Ф.Е. Светодиоды [Текст] / Е.Ф. Шуберт / под ред. А.Э. Юновича. – М.: Физматлит, 2008. – 496 с.

100. Пат. 2399957 Российская Федерация, МПК⁷ G 08 G 1/095. Светодиодный светофор с контролем холодного состояния [Текст] / Ш.Р. Валиев, Ш.К. Валиев, М.А. Оськина, Б.С. Сергеев ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО УрГУПС. – №2009123707/11; заявл. 22.06.09; опубл. 20.09.10, Бюл. № 26

101. Раушенбах, Г.С. Справочник по проектированию солнечных батарей. [Текст] / С.Г. Раушенбах. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 360 с.

102. Пат. 2265540 Российская Федерация, МПК⁷ В 61 L 7/10, G 08 G 1/095. Устройство управления стационарными светофорами [Текст] / Б.С. Сергеев, Н.Б. Курченкова ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО УрГУПС. – №2004111250/11; заявл. 12.04.04; опубл. 10.12.05, Бюл. № 34.

103. Пат. 2333522 Российская Федерация, МПК⁷ G 08 G 1/095. Светодиодная лампа [Текст] / Н.Б. Курченкова, Б.С. Сергеев ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО УрГУПС. – №2009123707/11; заявл. 22.06.09; опубл. 22.09.10, Бюл. № 25.

104. Пат. 2237291 Российская Федерация, МПК⁷ G 08 G 1/095, В 61 L 23/00. Светодиодный светофор [Текст] / Е.О. Савельев, Б.С. Сергеев ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО УрГУПС. – №2002127692/11; заявл. 15.10.02; опубл. 27.09.04, Бюл. № 27.

105. Сергеев, Б.С. Источники электропитания электронной аппаратуры железнодорожного транспорта [Текст] / Б.С. Сергеев, А.Н. Чечулина. – М.: Транспорт, 1998. – 280 с.

106. Оськина, М.А. Анализ работы светофора с удаленным управлением [Текст] / М.А. Оськина, Б.С. Сергеев // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2015. – № 2. – С. 14–17.

107. НТП СЦБ/МПС 99. Нормы технологического проектирования устройств автоматики и телемеханики на железнодорожном транспорте [Текст]. – СПб : ГУП Гипротрансигналсвязь, 1999. – 54 с.

108. И-81-77ПЗ. Методические указания по проектированию устройств автоматики, телемеханики и связи на железнодорожном транспорте. Проектирование кабельных сетей путевых устройств СЦБ [Текст]. – Л. : ГТСС, 1978. – 56 с.

109. ПромЛан. [Электронный ресурс]
<http://prom-sn.ru/> (дата обращения: 28.01.15).

110. EP 2193972 Europaischt PA. Zugsicherungs system / Schmid, Rolf. Опубл. 09.06.10. (нем.).

ПРИЛОЖЕНИЕ А

**ДОКУМЕНТЫ О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ
ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ**

Акт внедрения результатов диссертационной работы
Оськиной Марии Александровны «Исследование и развитие
функциональных возможностей светодиодных светофоров
железнодорожного транспорта»

Настоящим удостоверяется использование результатов научно-технической работы Оськиной М.А. по разработке и исследованию новых схмотехнических решений светофоров, изложенных в ее диссертационной работе «Исследование и развитие функциональных возможностей светодиодных светофоров железнодорожного транспорта».

В нашей организации опробованы технические решения, предложенные Оськиной М.А., изготовлены макеты устройств и проведена проверка их функционирования, которые показали работоспособность и положительные результаты исследований, изложенных в диссертационной работе. В результате испытаний макетов устройств установлено, что приведенные в научной работе аналитические выражения с достаточной степенью точности и достоверности соответствуют результатам экспериментально выполненным измерениям.

В настоящее время рассматривается вопрос о разработке и проведении испытаний опытных образцов изделий с использованием технических решений, предложенных Оськиной М. А., с целью их дальнейшего изготовления в НПЦ «Промэлектроника» и внедрения на сети железных дорог.

Директор по развитию бизнеса
НПЦ «Промэлектроника»



Ляной В.В.

Тел. (343) 378-85-39

E-mail: lyanoy_v@nrcprom.ru

Адрес: (620078), Екатеринбург, ул. Малышева, 128а.

ООО «ГОРИЗОНТ»

ИНН/КПП 6662001293/667201001 р/с 40 702 810 316 480 100 020
 620075 г. Екатеринбург, Уральский банк Сбербанка РФ
 ул. Мамина-Сибиряка 145, БИК 046577674
 оф.6424, а/я 31 к/с 30 101 810 500 000 000 674
 тел./ факс. (343)355-93-83
 E-mail: horizont@horizont.e-burg.ru

№2/425/01 от 25.11.16



УТВЕРЖДАЮ
 Директор ООО «Горизонт»
 В.А. Алгазин

АКТ

О внедрении результатов диссертационной работы
 Оськиной Марии Александровны

Комиссия в составе: председатель – главный конструктор В.Л. Булатов; члены комиссии: зам. главного инженера И.Ю. Костяев; инженер-конструктор Е.В. Бортников составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы «Исследование и развитие функциональных возможностей светодиодных светофоров железнодорожного транспорта» использованы при проектировании опытных образцов светофорных головок.

Корректность проведенного в диссертационной работе исследования подтверждается положительными результатами лабораторных испытаний опытных образцов

Председатель комиссии _____ В.Л. Булатов

Члены комиссии _____ И.Ю. Костяев

_____ Е.В. Бортников