

Федеральное агентство железнодорожного транспорта
Уральский государственный университет путей сообщения

Б. С. Сергеев
Е. О. Савельев
М. А. Оськина

Схемотехника и исследование светодиодных светофоров железнодорожного транспорта

B. S. Sergeev, E. O. Savel`ev, M. A. Os`kina

Circuitry and analysis of LED (light-emitting diode) railway traffic signals

Екатеринбург
УрГУПС
2019

УДК 656.25
С12

Сергеев, Б. С.

С12 Схемотехника и исследование светодиодных светофоров железнодорожного транспорта : монография / Б. С. Сергеев, Е. О. Савельев, М. А. Оськина. — Екатеринбург : УрГУПС, 2019. — 132, [2] с.
ISBN 978-5-94614-475-9

В настоящей монографии приведены результаты работ по исследованию и разработкам схем светодиодных светофоров, которые проводились в Уральском государственном университете путей сообщения за последние 20 лет.

Выполнен анализ недостатков существующих светодиодных светофоров, на основании этого определены пути их совершенствования. Рассматриваются оригинальные устройства различных типов светодиодных светофоров, разработанных авторами монографии, которые защищены патентами РФ. Основные вопросы, которые решались в процессе выполнения приведенных разработок, — повышение надежности и долговечности светофоров, а также решались проблемы диагностики их функционирования в настоящее время решенные в недостаточной степени. Кроме того, рассмотрены задачи управления светодиодными светофорами по волоконно-оптическим линиям связи, что обуславливает отказ от применения металлосодержащих управляющих кабелей.

Монография предназначена для использования разработчиками отраслевых проектных организаций, НИИ и КБ для изучения предложенных технических решений и возможной разработки новых схем управления светофорами. Приведенные материалы могут быть использованы преподавателями, студентами вузов при выполнении научных работ, в частности, при выборе магистрантами и аспирантами темы диссертационных работ.

This monograph presents the results of work on analysis and designs of circuits of LED traffic signals which was conducted in the Ural state university of railway transport for the last 20 years.

An analysis of the disadvantages of the currently available LED traffic signals is carried out and the ways to improve them are defined on its basis. The genuine devices of different types of LED traffic signals are developed by the authors of the monograph and patent protected by the Russian Federation. The main issues addressed in the course of the given developments are the increase of reliability and durability of the traffic signals as well as the problems of their operation which are not solved sufficiently at present. Besides, the problems of control of LED traffic signals by fiber-optic communication lines are covered in the work and, overall, it preconditions non-use of metal-containing control cables.

This monograph is intended for use by the developers of industry-based project organizations, research institutes and design-engineering departments for studying the proposed technical solutions and potential design of new control circuits of traffic signals. The present-ed materials can be used by lecturers and higher education students in preparing their research and academic works, particularly, when selecting a subject for the thesis by candidates for a master's degree and post-graduate students.

УДК 656.25

Опубликовано по решению редсовета УрГУПС

Рецензенты:

Е. Н. Розенберг, д-р техн. наук, профессор академик АЭН РФ (ОАО НИИАС), Москва

В. Л. Нестеров, д-р техн. наук, профессор (УрГУПС), Екатеринбург

ISBN 978-5-94614-475-9 © Сергеев Б. С., Савельев Е. О., Оськина М. А., 2019
© Оформление. Уральский государственный университет путей сообщения, 2019

Оглавление

Введение	4
Раздел 1. Анализ схмотехники существующих светодиодных светофоров	7
1.1. Светодиодные светофоры постоянного напряжения	8
1.2. Светодиодные светофоры переменного напряжения	21
1.3. Контроль функционирования СДМ светофора	33
1.4. Применение микроэлектронных драйверов в качестве источников тока	40
Раздел 2. Повышение энергетической эффективности светодиодных светофоров	44
2.1. Конденсаторные схемы светодиодных светофоров	44
2.2. Индуктивные схемы светодиодных светофоров	50
Раздел 3. Повышение надежности работы светодиодных светофоров	67
Раздел 4. Контроль излучения и работоспособности светодиодных светофоров	83
4.1. Диагностика функционирования светофора в «горячем» режиме работы для схем с управлением от переменного напряжения	84
4.2. Диагностика функционирования светофора для схем с управлением от постоянного напряжения	90
4.2.1. Диагностика функционирования светофора в «горячем» режиме работы	90
4.2.2. Диагностика функционирования светофора в «холодном» режиме работы	95
Раздел 5. Применение волоконно-оптических линий связи для управления светофорами	102
5.1. Устройство безопасной передачи аналогового оптического сигнала на излучатель светофора	103
5.2. Принципы реализации схем контроля функционирования светофоров с использованием ВОЛС.	110
5.3. Принципы структурной реализации систем управления и контроля светофоров с использованием ВОЛС.	111
Раздел 6. Нестандартные схемы управления светофорами	115
Заключение	125
Литература	126

Введение

В сложной инфраструктуре систем железнодорожной автоматики и телемеханики (СЖАТ) одной из основных функций, обеспечивающих безопасность движения поездов, является передача ответственной информации с путевых устройств на локомотив. Очень широко применяется для передачи подобной информации оптический канал, где в качестве передатчика соответствующих сигналов используется светофор.

Сейчас на зарубежных и отечественных железных дорогах планомерно заменяют светофоры 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. Этому процессу способствует ряд преимуществ использования СДМ в железнодорожных светофорах.

К одному из важнейших преимуществ в первую очередь следует отнести намного более высокую надежность и долговечность функционирования светодиодных светофоров — 100 тыс. часов и более. Поэтому отказываются от применения в светофорах ламп накаливания или использования двухнитевых ламп. Другое преимущество — существенно меньшее энергопотребление оптических излучателей, что снижает мощность, потребляемую светофорными системами от источников электропитания, в несколько раз.

За последние десятилетия достигнут прогресс в области улучшения технических, экономических и эксплуатационных характеристик светодиодных светофоров. На базе научных исследований разработаны новые схмотехнические решения. Отечественные и зарубежные заводы-изготовители выпускают различные модификации перегонных, станционных и переездных светодиодных светофоров, внедряемых на сети дорог ОАО «РЖД».

В новом отечественном стандарте предусмотрены технические и эксплуатационные требования к существующим и вновь разрабатываемым светодиодным светофорам для железнодорожного транспорта, внесены соответствующие изменения и в «Технический регламент безопасности инфраструктуры железнодорожного транспорта». Общие основы теории и функционирования светодиодов и СДМ, используемых в светодиодных светофорах, основаны на научных достижениях отечественных и зарубежных ученых и инженеров [1, 2]. В результате выполненных работ в России выпущены нормативные документы, оговаривающие требования к техническим и эксплуатационным характеристикам светодиодных светофоров железнодорожного транспорта и методики их испытаний [3–12].

Несмотря на привлекательность применения светодиодной техники, остаются нерешенные научные и инженерные проблемы. Их научный анализ и разработка на этой основе принципиально новых технических решений позволяет повысить эффективность работы, улучшить эксплуатационные характеристики светофоров и безопасность движения поездов. Решение этих задач дает возможность реализовать новый функционал, который не может быть получен в существующих устройствах светодиодных светофоров и схем управления ими.

Первые отечественные научно-технические публикации, посвященные разработкам в области светодиодных светофоров для железнодорожного транспорта, относятся к началу 2000 г. [13–17]. Перечень наиболее известных отечественных и зарубежных изготовителей светодиодных светофоров железнодорожного транспорта приведен в [18–41].

Значительная часть отечественных публикаций и полученных патентов по рассматриваемой тематике выполнены авторами настоящей монографии, — научными сотрудниками Уральского государственного университета путей сообщения. В библиографии приведены итоги и результаты более чем 15-летней работы созданной в университете научно-технической школы по направлению совершенствования характеристик и расширения функциональных возможностей светодиодных светофоров железнодорожного транспорта. Практически все приведенные в данной монографии технические решения защищены патентами Российской Федерации, патентообладателем которых является Уральский государственный университет путей сообщения.

Рассматриваемые в монографии вопросы светодиодной техники — это составная часть более широкой области исследования и решения научно-технических задач оптоэлектроники. Поэтому в монографии рассматриваются вопросы решения смежных со светодиодной техникой задач, которые ранее не исследовались и не применялись в устройствах железнодорожной автоматики и телемеханики.

При реализации и эксплуатации устройств автоматики и телемеханики применяют дорогостоящую медесодержащую кабельную продукцию (в станционных устройствах управления движением поездов). На железнодорожном транспорте для передачи и преобразования больших объемов цифровой информации планомерно заменяют медесодержащие кабели на волоконно-оптические линии связи (ВОЛС). К сожалению, это не коснулось устройств автоматики и телемеханики (СЦБ).

Анализ возможностей использования ВОЛС в устройствах автоматики и телемеханики, проведенный в настоящей монографии, показывает неоспоримые преимущества их применения. Нами разработаны принципиально новые схемотехнические устройства и структурные решения управления и контроля светодиодными, которые могут быть применены также и в существующих ламповых светофорах.

Приведенные в настоящей монографии технические решения и их анализ предназначены не только для ознакомления с материалом. Авторы рассчитывают, что это приведет к созданию новых технических решений, которые будут обладать большей эффективностью и патентоспособностью. А это, в свою очередь, обусловит прогресс в области повышения эффективности и конкурентоспособности различных объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта и не только светофоров.

Железнодорожный транспорт России остается одной из немногих структур, где сохранились централизованные подразделения, которые организуют и поощряют движение изобретателей и рационализаторов. Поэтому авторы рассчитывают на успех нашего предположения в области создания новых перспективных технических решений изобретателей и рационализаторов железнодорожного транспорта.

Раздел 1

Анализ схемотехники существующих светодиодных светофоров

Существуют два основных вида управления (электропитания) светофорами: постоянного и переменного напряжения. В первом случае сигнал управления светофором, например, от поста электрической централизации (ЭЦ) или от релейного шкафа, имеет вид постоянного напряжения. Во втором случае этот сигнал имеет вид переменного напряжения, обычно 220 В частоты $f = 50$ Гц [42].

Переменное напряжение позволяет существенно повысить допустимую длину кабеля управления светофором до нескольких сотен метров, единиц километров, что достигается повышением величины переменного напряжения, в частности, до 220 В. В этом случае в непосредственной близости от светофора устанавливается понижающий сигнальный трансформатор, на выходе которого подключают соответствующие выпрямитель и эквивалент источника постоянного тока. Терминологически эти две системы относятся к схемам светофоров с местным и схемами с центральным управлением соответственно.

Несмотря на это, отличие системы управления светофорами — в их функциональных узлах. Это относится к тому, что электропитание светодиодов должно осуществляться только от постоянного напряжения. Вопросы использования и взаимодействия того или иного вида напряжения в светофорах рассматриваются далее.

1.1. Светодиодные светофоры постоянного напряжения

В подавляющем большинстве разработок светодиодные светофоры представляют собой светодиодные матрицы (СДМ), состоящие из нескольких параллельных цепей с последовательным соединением в каждой из них нескольких последовательно включенных единичных светодиодов [34, 35]. Электропитание и управление в таких светофорах осуществляется от источника постоянного напряжения.

Светодиод как источник излучения принципиально отличается от лампы накаливания. Лампа накаливания светофоров подключена к источнику (терминологически являющегося источником напряжения) как постоянного, так и переменного напряжения. С энергетической точки зрения, это означает, что напряжение питания лампы осуществляется от стандартных напряжений, которые всегда есть в станционных, перегонных и других существующих устройствах автоматики и телемеханики. В частности, это напряжения 12 или 24 В. Таким образом, для получения требуемого излучения лампе накаливания не нужно никаких специальных согласующих устройств по напряжению или току [2, 43].

В силу физического принципа действия p - n переходов излучение светодиода происходит при протекании через него постоянного тока нормированной величины. То есть электропитание СДМ светофора должно осуществляться только от источника постоянного тока, в отличие от источника напряжения, применяемого в светофорах с лампами накаливания. В существующих светодиодных светофорах переменный ток для питания светодиодов СДМ схем светофоров непосредственно не может быть использован.

Вольт-амперная характеристика (ВАХ) светодиодов имеет специфический вид, который требует применения специальных дополнительно вводимых технических решений для согласования электрических параметров источника электроэнергии с вольт-амперными характеристиками p - n переходов светодиодов для обеспечения нормированных требований по стабильности яркости их излучения и выполнения норм максимально допустимых параметров светодиодов.

Практическая реализация функции источника тока, то есть формирование требуемой величины тока через светодиоды, наиболее часто осуществляется при помощи активных резисторов

или специальных схем стабилизаторов постоянного тока. Применение активных резисторов позволяет реализовать довольно простые схемы управления светодиодным излучателем, однако в этом случае энергетическая эффективность светофоров получается невысокой.

В системах с питанием светофора от переменного напряжения обязательно присутствует функциональный узел согласования и преобразования переменного напряжения в постоянное, который состоит из согласующего сигнального трансформатора и выпрямителя. Все вопросы, относящиеся к электропитанию светодиодов, являются общими для обоих видов напряжения.

В данном разделе рассматриваются схемы управления светодиодными светофорами с питанием только от источника постоянного тока в силу энергетической эквивалентности обеих систем управления. Общеизвестные вопросы выбора того или иного трансформатора и выпрямителя для электропитания светодиодного светодорога далее не рассматриваются.

Выполним анализ функционирования известных светофоров с питанием светофоров от источника постоянного напряжения, рассмотрев в последующих разделах настоящей монографии особенности схемотехники и работы светодиодных светофоров с электропитанием от источника переменного напряжения.

При выполнении анализа примем, что нелинейная ВАХ единичного светодиода представляется составной кусочно-линейной функцией в области прямой проводимости. Она представлена на рис. 1.1, *а*, а эквивалентная электрическая схема светодиода с показанной ВАХ — на рис. 1.1, *б*. Здесь обозначения соответствуют: $U_{д0}$ — условное пороговое напряжение, соответствующее нача-

лу протекания тока $i_{св}$ через светодиод; $R_{дифф} = \frac{\Delta U_{св}}{\Delta I_{св}}$ — дифферен-

циальное сопротивление *p-n* перехода светодиода.

Если несколько светодиодов в схеме СДМ соединены последовательно, то их суммарная ВАХ представляется в виде графического или аналитического сложения нескольких кусочно-линейных функций единичного светодиода, что может быть выражено последовательным соединением эквивалентных схем (рис. 1.1, *б*). Если необходимо, то параллельно включенные цепи анализируются также при помощи известных законов электротехники.

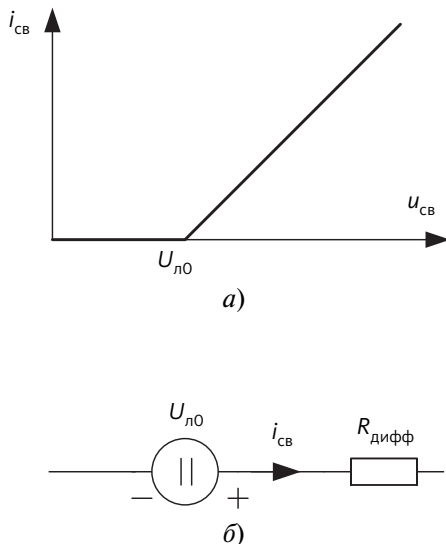


Рис. 1.1. ВАХ светодиода (а) и соответствующая ей эквивалентная схема светодиода (б)

При анализе необходимо рассмотреть несколько вариантов типовых электрических схем включения светодиодов в СДМ. Они изображены на рис. 1.2, а, б, в, где СР — контакт сигнального реле соответствующего устройства автоматики и телемеханики; $R_{тi}$ — резисторы, задающие требуемый нормированный ток через i -е светодиоды. Обобщенный анализ этих схем определяет следующие сравнительные выводы [2, 44, 45].

Схема рис. 1.2, а отличается относительной простотой, так как она имеет только один токозадающий резистор R_t . Однако она недостаточно надежна и долговечна, так как при появлении обрыва в любом одном из p - n переходов последовательно включенных светодиода исчезает излучение всей СДМ, что нарушает основополагающие принципы работы систем управления движением поездов

Большой сложностью обладает схема светофора рис. 1.2, б. В этой схеме при отказе одного из светодиодов в одной из параллельных цепей светофор функционирует, но с пониженной яркостью, что недопустимо по условиям безопасности движения.

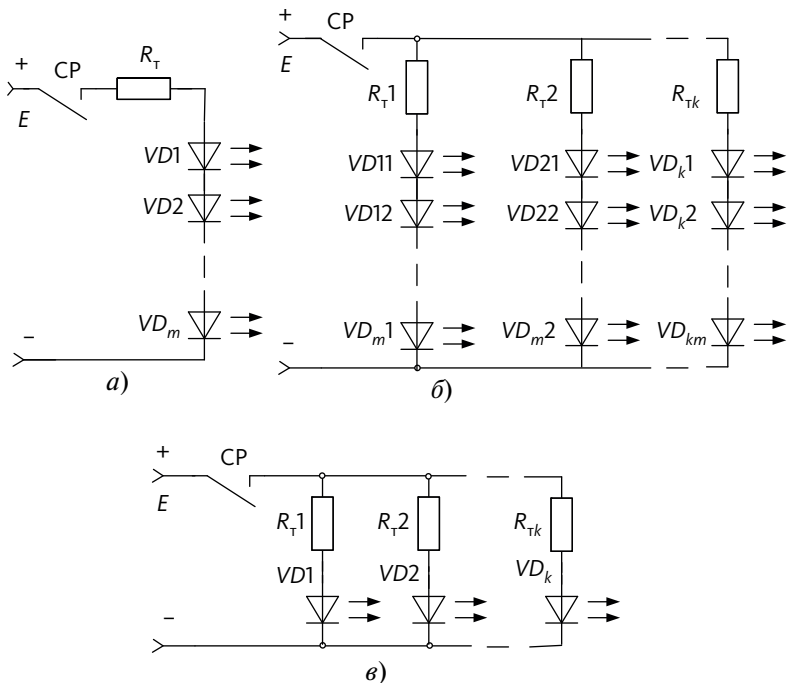


Рис. 1.2. Схемы последовательного включения светодиодов (а), схема со смешанным соединением светодиодов (б), схема с параллельным соединением светодиодов (в)

Схема, представленная на рис. 1.2, в, более надежна. Здесь при большом количестве параллельно включенных светодиодов в СДМ обрыв в одном из $p-n$ переходов не вызовет значительного снижения яркости излучения СДМ, что может лежать в пределах допустимых норм по интегральной яркости излучения.

На практике обычно применяют схемы со смешанным или с параллельным соединением (рис. 1.2, б, в).

Возникает вопрос численного выбора аргументов k и m . Попытки достаточно обоснованного выбора величин k и m схемы (рис. 1.2, б) приводят к тому, что при разработке светодиодных светофоров со смешанным соединением эмпирически принимается, что число последовательно включенных светодиодов $m = (3-6)$, а число параллельно включенных цепей определяется как

$$k = \frac{(km)_{\text{норм}}}{m}, \quad (1.1)$$

где $(km)_{\text{норм}}$ — суммарное количество светодиодов в СДМ, которое требуется для получения нормированной яркости излучения соответствующего показания светофора; аргументы k и m соответствуют нумерации в обозначениях светодиодов схем рис. 1.2.

Нет обоснованного и достаточно корректного критерия выбора разумного численного соотношения между значениями аргументов k и m при задаваемом показателе $(km)_{\text{норм}}$, который нужно выполнить для обеспечения безопасности движения поездов, и требованиями эксплуатационных показателей участков дорог при наиболее выгодных энергетических и надежностных характеристиках.

Важным условием для выбора соотношения между рассматриваемыми аргументами в большинстве случаев служит величина постоянного напряжения питания E . Обычно оно является стандартным для существующих устройств автоматики и телемеханики и равно 12 или 24 В. Это обстоятельство во многих случаях обуславливает величину потерь мощности в схеме светодиодного светофора, что будет рассмотрено далее.

Так как схема, представленная на рис. 1.2, *а*, не оптимальна, то падение напряжения на светодиодах СДМ светофоров схем (рис. 1.2, *б* и 1.2, *в*) распределяются следующими соответствующими выражениями:

$$U_{\text{св}} = m(U_{\text{д0}} + I_{\text{св}} R_{\text{дифф}}), \quad (1.2)$$

$$U_{\text{св}} = U_{\text{д0}} + I_{\text{св}} R_{\text{дифф}}, \quad (1.3)$$

где $U_{\text{д0}}$ и $R_{\text{дифф}}$ — параметры введенной выше кусочно-линейной ВАХ светодиодов СДМ (см. рис. 1.2 *а*, *б*).

Напряжение, необходимое для обеспечения нормированного значения тока $I_{\text{св}}^*$, протекающего через светодиоды, определяется соответствующими, как и в предыдущем случае, двумя уравнениями:

$$E = m \left[I_{\text{св}}^* (R_{\text{г}} + R_{\text{дифф}}) + U_{\text{д0}} \right], \quad (1.4)$$

$$E = \left[I_{\text{св}}^* (R_{\text{г}} + R_{\text{дифф}}) + U_{\text{д0}} \right]. \quad (1.5)$$

Из этих уравнений может быть получено требуемое значение величины сопротивления токозадающих резисторов для тех же соответствующих схем светофоров:

$$R_T = \frac{E - m(I_{cd}^* R_{\text{дифф}} + U_{\text{д0}})}{m I_{\text{св}}^*}, \quad (1.4, a)$$

$$R_T = \frac{E - (I_{cd}^* R_{\text{дифф}} + U_{\text{д0}})}{I_{\text{св}}^*}. \quad (1.5, a)$$

Если для питания светофора применяется какое-либо стандартное напряжение $E_{\text{ст}}$, не соответствующее желательному значению напряжения E , входящее в выражения (1.4) и (1.5) и большее по величине, то из выражений (1.4, *a*) и (1.5, *a*) видно, что для создания прежнего значения тока $I_{\text{св}}^*$ требуется увеличивать сопротивление токозадающих резисторов R_T . А это увеличит потери мощности схемы светофора. Больше всего это относится к параметрам нестабильности напряжения в эксплуатируемых устройствах и системах автоматики и телемеханики, которая может достигать значений $\Delta E_{\text{ст}} = \pm (10-15)\%$, а иногда и выше.

Если можно выбрать любую величину напряжения E , отличающегося от стандартного $E_{\text{ст}}$, то мощность, потребляемая схемами светофоров по рис. 1.2, *б* и 1.2, *в*, находится из уравнений:

$$\Sigma P_{\text{св}} = km I_{\text{св}}^* [I_{\text{св}}^* (R_T + R_{\text{дифф}}) - U_{\text{д0}}], \quad (1.6)$$

$$\Sigma P_{\text{св}} = k I_{\text{св}}^* [I_{\text{св}}^* (R_T + R_{\text{дифф}}) - U_{\text{д0}}]. \quad (1.7)$$

Если сравнивать полученные выражения с уравнением (1.1), то можно сделать вывод, что с энергетической точки зрения схемы светофоров, представленные на рис. 2.1, *б* и 2.1, *в*, равноценны. Однако это относится лишь к случаю, когда активные резисторы формируют ток, одинаковый для всех светодиодов обеих схем и не зависящий от напряжения питания E , что обычно не выполняется. Это обусловлено необходимостью реализации условия (1.1), когда перераспределение количества диодов в последовательных и параллельных цепях СДМ не может быть произвольным.

В случае применения стандартной для устройств автоматики и телемеханики величины напряжения питания $E_{\text{ст}}$ (рис. 1.1, б) появляется условие максимально возможного количества последовательно включенных светодиодов для заданного значения напряжения питания схемы светодиода:

$$m < \frac{E_{\text{ст}}}{(\delta + 1)(U_{\text{д0}} + I_{\text{св}} R_{\text{дифф}})}. \quad (1.8)$$

Несоблюдение этого условия приводит к уменьшению тока через светодиод, который должен обеспечивать токозадающий резистор $R_{\text{т}}$ для выполнения нормированной яркости излучения СДМ. И наоборот, усиление этого неравенства приводит к дополнительным потерям мощности, потребляемой светофором от источника питания $E_{\text{ст}}$.

Очевидно, что достижение энергетической идеальности функционирования рассматриваемых схем (рис. 1.2, б, в) возможно лишь при превращении условия (1.8) в равенство. Однако практически это невыполнимо из-за технологического и эксплуатационного разброса параметров ВАХ светодиодов, входящих в состав СДМ, и дискретности параметров светодиодов различного цвета излучения по отношению к величине стандартного напряжения питания $E_{\text{ст}}$. Необходимо учитывать, что светодиоды с различным цветом излучения, соответствующие различным показаниям светофора, обладают очень различными параметрами ВАХ. Это различие составляет несколько единиц вольт. Больше всего это относится к двум параметрам ВАХ — значению напряжения $U_{\text{д0}}$ и к дифференциальному сопротивлению $R_{\text{дифф}}$.

Для стандартных напряжений питания светофоров полная мощность, потребляемая светофором, находится из соответствующих выражений:

$$\Sigma P_{\text{св}} = I_{\text{вх}} E_{\text{ст}} = m I_{\text{св}} E_{\text{ст}}, \quad (1.9)$$

$$\Sigma P_{\text{св}} = I_{\text{вх}} E_{\text{ст}} = I_{\text{св}} E_{\text{ст}}, \quad (1.10)$$

которые показывают, что для одного и того же значения напряжения $E_{\text{ст}}$ схема по рис. 1.2, б обладает меньшим потреблением мощности, чем схема рис. 1.2, в. Это ясно, если сравнить величины напряжения, например, $E_{\text{ст}} = 12 \text{ В}$, с падением прямого напряжения

на единичном светодиоде, равным $U_{\text{св}} = (2,5-3)$ В. Видно, что при $E_{\text{ст}} > U_{\text{св}}$ бóльшая величина стандартного напряжения, например, $E_{\text{ст}} = 24$ В, приводит к усилению этого неравенства, а значит, обусловливает бóльшие потери мощности. Основным условием получения максимального КПД светофора служит неравенство (1.8), преобразованное в равенство. Поэтому схему светофора, приведенную на рис. 1.2, *в*, применяют реже.

Примем, что КПД приведенных схем светофоров

$$\eta = \frac{P_{\text{св}}}{P_{\text{св}} + P_R} = \frac{1}{1 + \frac{P_R}{P_{\text{св}}}}, \quad (1.11)$$

где $P_{\text{св}}$ и P_R — мощности, рассеиваемые светодиодами и токозадающими резисторами соответственно.

Очевидно, что мощность $P_{\text{св}}$ является полезной, так как она вызывает излучение СДМ, а мощность P_R — мощность потерь на соответствующих токовых резисторах.

Для схем рис. 1.2, *б* и 1.2, *в* полезная мощность находится из выражений:

$$P_{\text{св}} = kmI_{\text{св}}(U_{\text{д0}} + I_{\text{св}}R_{\text{дф}}), \quad (1.12)$$

$$P_R = kI_{\text{св}}(U_{\text{д0}} + I_{\text{св}}R_{\text{дф}}). \quad (1.13)$$

Если в качестве источника применяется стандартный источник питания $E_{\text{ст}}$, то мощность, рассеиваемая токозадающими резисторами, находится:

$$P_R = mI_{\text{св}}[E_{\text{ст}} - n(U_{\text{д0}} + I_{\text{св}}R_{\text{дифф}})], \quad (1.14)$$

$$P_R = kI_{\text{св}}[E_{\text{ст}} - (U_{\text{д0}} + I_{\text{св}}R_{\text{дифф}})]. \quad (1.15)$$

С учетом уравнений (1.12)–(1.15) выражение, определяющее КПД соответствующих схем светофоров, имеет вид

$$\eta = m \frac{U_{\text{д0}} + I_{\text{св}}R_{\text{дифф}}}{E_{\text{ст}}}, \quad (1.16)$$

$$\eta = \frac{U_{д0} + I_{св} R_{дифф}}{E_{ст}}. \quad (1.17)$$

В качестве примера численное решение уравнения (1.16) показано на графиках рис. 1.3.

При построении графиков приняты значения: $(U_{д0} + I_{св} R_{дифф}) = 1,5 \text{ В}$, что практически соответствует существующим величинам падения напряжения на реальных светодиодах. График КПД для значения $n = 1$ получен при решении выражения (1.17).

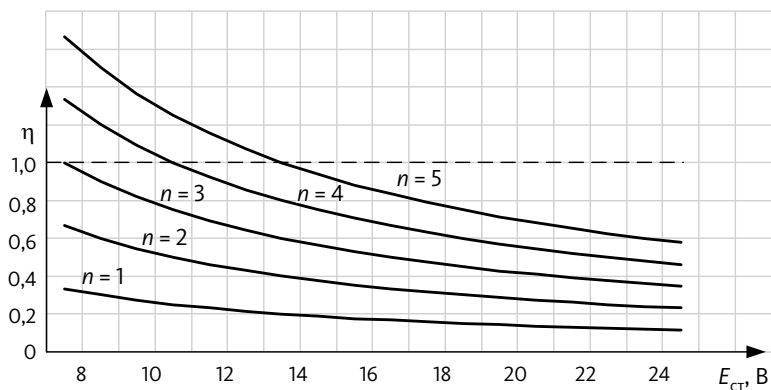


Рис. 1.3. График зависимости КПД светофора от изменения величины напряжения питания при различном числе последовательно соединенных светодиодов в параллельной цепи

В общем случае падение напряжения на светодиоде существенно зависит от длины волны его излучения, то есть от цвета его излучения (в два-три раза). Поэтому графики рис. 1.3 могут рассматриваться лишь как качественный пример закономерности изменения функции η .

Приведенные уравнения получены на основе использования кусочно-линейной ВАХ единичного светодиода и его эквивалентной схемы (рис. 1.1, а, б). Поэтому реальные значения КПД, показанные на рис. 1.3, ограничиваются областью графика $\eta \leq 1$, лежащей ниже пунктирной линии графика. Область выше этой линии относится к случаю, когда источником энергии является напряжение $U_{д0}$, что практически не реализуемо.

Графики рис. 1.3 показывают закономерное снижение КПД светофора при увеличении напряжения питания $E_{ст}$. Причем больше всего эта закономерность проявляется при уменьшении количества светодиодов, включенных в каждую последовательную цепь. Минимальный КПД имеет место в схеме светофора, приведенной на рис. 2.1, *в*, для которой $m = 1$. Следовательно, если в схеме светофора применяется стандартное напряжение питания $E_{ст}$, которое невозможно изменить, то эта схема энергетически наименее эффективна.

Наравне с анализом КПД схемы светофора можно ввести понятие «эффективность излучения p - n перехода единичного светодиода», или СДМ. Идеальный светодиод должен иметь параметры $U_{д0} = 0$ и $R_{дифф} = 0$. Очевидно, что в этом случае мощность, рассеиваемая им, будет равна $P_{св} = 0$.

Мощность, рассеиваемая светодиодом или СДМ, — один из основных показателей, которые определяют их конструктивные особенности. Это обусловлено тем, что практически все существующие светодиодные матрицы в реальных условиях эксплуатации должны иметь пассивные или активные теплоотводящие устройства, обеспечивающие нормативные значения надлежащего температурного режима p - n переходов. В практических конструкциях светофоров и других оптоэлектронных устройствах железнодорожного транспорта они реализуются в виде пассивных теплоотводящих устройств. Обычно они имеют вид соответствующих металлических поверхностей, площадь которых при прочих равных условиях зависит от максимальной температуры внутри корпуса (головки) светофора. Проблема охлаждения светодиодов остается общей для всех случаев применения светодиодной техники в самых различных областях человеческой деятельности при токах $I_{св}$, лежащих в пределах от сотен миллиампер до нескольких ампер [46, 47].

Для дальнейшего анализа примем, что мощность, требуемая для создания нормированной яркости излучения светодиода: $P_{p-n} = \Theta I_{p-n}$, где Θ — условный коэффициент, имеющий размерность напряжения и определяющий взаимосвязь яркости излучения светодиода с протекающим по нему током I_{p-n} . Тогда КПД любых светодиодов, определяющий энергетическую яркость его излучения, может быть представлен выражением:

$$\eta_{p-n} = \frac{\Theta I_{p-n}}{\Theta I_{p-n} + I_{p-n}(U_{д0} + I_{p-n}R_{дифф})} = \frac{\Theta}{\Theta + U_{д0} + I_{p-n}R_{дифф}}. \quad (1.18)$$

Так как выходным (полезным) параметром светодиода является яркость его излучения, то коэффициент Θ может служить количественным показателем связи между яркостью излучения Φ и током I_{p-n} . Однако в нормативных документах на характеристики светодиодов этот коэффициент не указывается, что ограничивает возможность оценки различных светодиодов и оптимизации светодиодных устройств.

При выборе светодиодов для разработки светофора из номенклатуры выпускаемого промышленностью ряда ясно, что при прочих равных условиях необходимо выбирать светодиоды с минимальными значениями напряжения $U_{д0}$ и дифференциального сопротивления $R_{дифф}$. К сожалению, параметр $R_{дифф}$ в нормативных документах также не указывается, однако в качестве приближенных графических справочных данных по этому параметру можно ориентироваться на приводимые ВАХ для различных типов светодиодов. При этом следует учитывать, что светодиоды с различным цветом излучения имеют существенно различные ВАХ, различие, например, в напряжении $U_{д0}$ может достигать несколько вольт. Поэтому расчет энергетических и других характеристик светофоров по приведенным уравнениям дает существенно различные результаты для светодиодов различного цвета излучения и может использоваться лишь ориентировочно.

Определим основные вопросы применения микроэлектронных драйверов в схемах светодиодных светофоров, которые в настоящее время широко применяются также в бытовой, промышленной и другой светотехнике ввиду большой отечественной и зарубежной номенклатуры выпускаемых микросхем данного вида.

Наиболее распространенным вид драйвера для питания светодиодных устройств — схема импульсного стабилизатора постоянного напряжения понижающего типа [48]. Однако подобные схемы в некоторых случаях не выполняют требования безопасности. В этом случае необходимо применение специализированных драйверов, реализованных на схемах импульсных стабилизаторов постоянного напряжения, которые имеют гальваническую развязку выходного напряжения от напряжения питания светофора [48, 49].

Микроэлектронные драйверы обладают высоким КПД, лежащим в пределах 90–95 %. Для рассматриваемых схем светодиодных светофоров потребляемая мощность устройств с использованием микроэлектронного драйвера [50]:

$$\Sigma P_{\text{св}} = \frac{n(U_{\text{д0}} + I_{\text{св}} R_{\text{дифф}})}{\eta_{\text{др}}}, \quad (1.19)$$

$$\Sigma P_{\text{св}} = \frac{k(U_{\text{д0}} + I_{\text{св}} R_{\text{дифф}})}{\eta_{\text{др}}}, \quad (1.20)$$

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

Как видно из этих выражений, независимо от схемы подключения светодиодов СДМ и при достаточно высоком КПД драйвера мощность, потребляемая светофором, не изменяется. Очевидно, что в рассмотренных простых схемах светодиодных светофорах КПД светофоров с импульсным стабилизатором напряжения практически не зависит от величины напряжения $E_{\text{ст}}$ и связанного с этим количества параллельно или последовательно включенных светодиодов в СДМ.

В качестве примера на рис. 1.4 приведены рассчитанные по выражениям (1.19) и (1.20) 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.

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

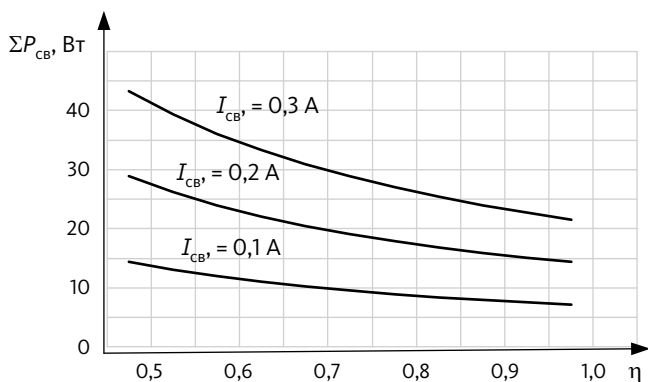


Рис. 1.4. Зависимость полной мощности, потребляемой светофором при изменении КПД драйвера

Применение интегральных микросхем (ИМС) в устройствах автоматики и телемеханики железнодорожного транспорта имеет определенную специфику. ИМС обладают невысокой стойкостью к воздействию различного вида мощных электрических и электромагнитных помех.

Специфика инфраструктуры железнодорожного транспорта заключается в том, что в пространстве станций и перегонов есть мощные источники электрических и электромагнитных помех, генераторами которых служат грозовые разряды, тяговые подстанции, контактная сеть, ЛЭП, располагаемые вблизи схем управления светофорами, контакторы, переключающие токи величиной в сотни и тысячи ампер и напряжения в десятки киловольт. Они негативно влияют на полупроводниковые приборы малой мощности и приводят к их отказу.

Для надежной работы ИМС нужно применять различного вида защитные устройства, ограничивающие амплитуду импульсных помех на питающих и управляющих выводах ИМС [42]. А это усложняет устройств СЦБ. До сих пор проблема защиты полупроводниковых приборов является актуальной и не может считаться полностью решенной.

Так как питание излучателей светофоров 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 принципы местного управления светофорами при длинах сигнальных кабелей более чем несколько десятков-сотен метров.

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 экономичны с энергетической точки зрения устройства с применением микроэлектронных драйверов. Но вопросы их применения обладают некоторой отсутствующей в простых схемах с применением в качестве источников постоянного тока активных резисторов.

Специфика выбора, функционирования, построения и применения микроэлектронных драйверов, используемых в качестве источников тока для светодиодных устройств, рассмотрена в настоящем разделе.

Недостатки присутствуют и в известных схемах светофоров с центральным управлением, управляемых, например, от поста электрической централизации с помощью использования энергии переменного напряжения. Это обусловлено тем, что принцип формирования требуемой величины тока, протекающего через светодиоды, остается прежним, где применяются в основном токозадающие активные резисторы. В этом отношении требуется разработка новых схемотехнических решений, в которых должны применяться иные принципы формирования тока через светодиоды.

Кроме рассмотренных выше традиционных схем (рис. 1.2) и способов включения светодиодов и управления СДМ, существуют другие нестандартные схемы управления светофорами.

1.2. Светодиодные светофоры переменного напряжения

Упрощенная схема одного из показаний светодиодного светофора при центральной системе управления с питанием от переменного напряжения представлена на рис. 1.5 [2].

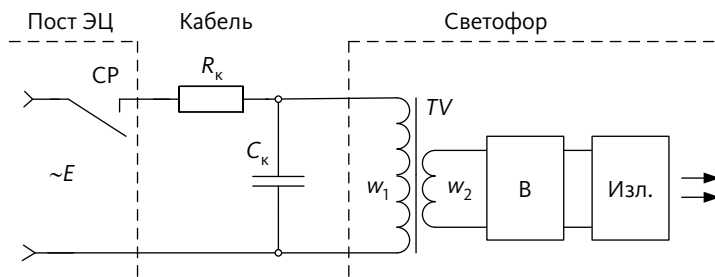


Рис. 1.5. Упрощенная схема светодиодного светофора с питанием от переменного напряжения

Здесь TV — сигнальный понижающий трансформатор; B — выпрямитель с соответствующим (при необходимости) сглаживающим фильтром; Изл. — излучатель, который представляет собой одну из схем светофоров по рис. 1.2, $a, б, в$; R_k и C_k — паразитные параметры пары жил сигнального кабеля, который в силу низкой частоты ($f = 50$ Гц) применяемого напряжения промышленных сетей

представляется линией с сосредоточенными параметрами; $\sim E$ переменное напряжение питания светофора. Обычно $\sim E = 220$ В.

Очевидно, что значения величин параметров R_k и C_k влияют на степень передачи электрического сигнала от источника $\sim E$ на излучатель Изл. Для компенсации снижения напряжения на излучателе при длинах кабеля в сотни метров, единицы километров на вторичной обмотке сигнального трансформатора TU делаются отводы, которые соответствующим образом переключаются в процессе настройки аппаратуры СЦБ, замене кабеля, регламентных проверках и др. Очевидно, что наличие интегрирующей цепи R_k, C_k является недостатком схем с централизованным управлением от переменного напряжения, так как при этом некоторые требуемые функциональные возможности светофоров, например, функции диагностики могут просто не выполняться.

Существует также другое негативное свойство схем светофоров с питанием от переменного напряжения.

На станциях со множеством маневровых, выходных или других светофоров, расположенных, например, в горловинах станций, передача сигналов управления светофорами передается обычно по групповым сигнальным кабелям. Это обуславливает существование в одном кабеле паразитных емкостных связей между отдельными сигнальными парами, управляющих показаниями этих светофоров. Они могут вызвать появление напряжения в сигнальной паре, отключенной от источника $\sim E$ индуцированного напряжения от другой сигнальной пары. Очевидно, что величина этого индуцированного напряжения увеличивается с возрастанием длины кабеля. В итоге при значительных длинах сигнального кабеля возможно появление засветки ненадлежащего показания светофора. Это недопустимо, так как при этом нарушаются требования безопасности движения за счет получения ложного сигнала, возможно, разрешающего. Не исключено также появление засветки нескольких ненадлежащих показаний светофоров, в частности, на разных светофорах горловины.

Наличие эффекта ненадлежащей (ложной) засветки определяет нормированную максимально допустимую длину сигнального кабеля. Для светофоров с лампами накаливания она составляет $l_{\text{каб}} = 1,3$ км. Светодиодные светофоры имеют в три-четыре раза меньшее энергопотребление, чем светофоры с лампами накаливания. Поэтому критичность появления засветки ненадлежащего показания у светодиодных светофоров более важна. Можно ожидать,

что максимально допустимая длина сигнального кабеля уменьшится до $l_{\text{каб}} = 500\text{--}700$ м или менее.

Аналитическое и достаточно точное прогнозирование появления засветки ненадлежащего показания светофора затруднено из-за того, что нет гарантированных величин рассматриваемых паразитных емкостей. Эти величины невоспроизводимы, потому что конструктивное расположение пар сигнальных кабелей не идентично.

В стандартных системах автоматики и телемеханики для снижения уровня индуцированного напряжения в соседней сигнальной паре применяются два метода. Первый из них заключается в использовании жил парной скрутки в одном кабеле. Второй применяется реже — это разнесение сигнальных пар по различным параллельно укладываемым кабелям. Однако при втором методе снижается экономическая эффективность устройств автоматики и телемеханики за счет увеличения капитальных вложений и эксплуатационных расходов [52].

Анализ влияния паразитных емкостей между жилами и парами одного сигнального кабеля дает возможность оценки появления засветки ненадлежащего показания светофора [2, 51].

Обобщенный принцип функционирования светофора и емкостного взаимодействия двух кабельных пар в одном сигнальном кабеле показан на рис. 1.6. В общем случае эта схема справедлива как для ламповых, так и для светодиодных светофоров, что будет использовано в дальнейшем при анализе других специальных режимов работы светофора. Здесь для показанного положения контактов сигнальных реле СР1 и СР2 даны состояния функционирования двух излучателей схемы Изл.1 и Изл.2, подключенных к посту электрической централизации через две пары жил одного кабеля длиной $l_{\text{каб}}$.

Рассмотрим случай функционирования светодиодного светофора, когда для обеспечения требований безопасности движения первый из излучателей Изл.1 излучать не должен, второй — Изл.2 — должен излучать (рис. 1.6) [53].

Каждый из резисторов $R11$, $R12$ и $R21$, $R22$ выражает половину суммарного активного сопротивления прямой и обратной жил первой и второй пар сигнальных жил кабеля. В этих резисторах учитывается также внутреннее сопротивление монтажа соединений на посту электрической централизации и других сопротивлений схемы. Первая пара жил кабеля, ведущая к излучателю Изл.1, отключена от источника переменного напряжения $\sim E$ фронтовым контактом сигнального реле СР1.

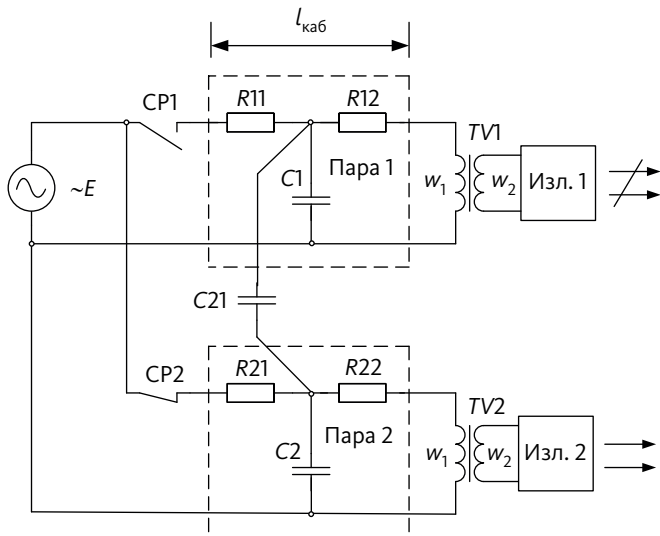


Рис. 1.6. Структурная схема взаимодействия двух сигнальных пар одного кабеля

Вторая пара жил подключена к Изл.2 и к напряжению $\sim E$ замкнутым фронтным контактом 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 индуцируется на первую пару, в которой напряжение и ток для исключения излучения должны отсутствовать или быть достаточно малыми.

Электрическая эквивалентная схема светофора, соответствующая показанному на схеме рис. 1.6 состоянию фронтных контактов сигнальных реле CP1 (разомкнутому) и CP2 (замкнутому), приведена на рис. 1.7.

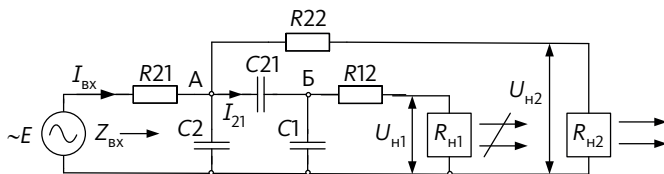


Рис. 1.7. Эквивалентная схема светофора, соответствующая замкнутому состоянию контакта реле CP2

Здесь принято, что сигнальные трансформаторы $TV1$ и $TV2$ входят в состав условно показанных излучателей R_{H1} и R_{H2} с соответствующими выпрямителями и токозадающими устройствами, например, активными резисторами или др. Кроме того, примем, что индуктивность намагничивания сигнальных трансформаторов равна: $L_{\mu} = \infty$, индуктивность рассеяния обмоток сигнального трансформатора: $L_S = 0$ и 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 нормированной величины активной мощности (12 или 25 Вт), которую они потребляют.

Если в качестве излучателей используются светодиоды, то в состав этих сопротивлений входят параметры ВАХ диодов выпрямителей и СДМ с учетом количества m входящих в нее светодиодов.

Определим характеристики процессов передачи напряжения от источника $\sim E$ на излучающий излучатель R_{H2} .

В соответствии с эквивалентной схемой рис. 1.7 суммарный входной ток, потребляемый светофором, состоящий из двух токов, потребляемых от источника переменного напряжения $\sim E$ (одно из показаний светофора излучает, у другого излучение должно отсутствовать) определяется выражением:

$$I_{\text{вх}} = \sim E \frac{X2 + \frac{R2 \left(X21 + \frac{R1X1}{R1 + X1} \right)}{R2 + X21 + \frac{R1X1}{R1 + X1}}}{X2R2 \left(X21 + \frac{R1X1}{R1 + X1} \right) + \frac{R1X1}{R2 + X21 + \frac{R1X1}{R1 + X1}}}, \quad (1.21)$$

где $R1 = R12 + R_{H1}$; $R2 = R22 + R_{H2}$; $X1 = \frac{1}{2\pi fC1}$; $X21 = \frac{1}{2\pi fC21}$;
 $X2 = \frac{1}{2\pi fC2}$.

Так как величина напряжения в точке А схемы рис. 1.7 определяется величиной $U_A = \sim E - I_{\text{вх}}R21$, то напряжение на входе излучателя Изл.2, который находится в состоянии излучения:

$$U_{н2} = \frac{U_A R_{н2}}{R22 + R_{н2}}. \quad (1.22)$$

Откуда после соответствующих подстановок и преобразований получим

$$U_{н2} = \left(\frac{\sim E R_{н2}}{R22 + R_{н2}} \right) \left\{ 1 - R21 \left[\frac{X2 + \frac{R2 \left(X21 + \frac{R1 X1}{R1 + X1} \right)}{R2 + X21 + \frac{R1 X1}{R1 + X1}}}{\frac{X2 R2 \left(X21 + \frac{R1 X1}{R1 + X1} \right)}{R2 + X21 + \frac{R1 X1}{R1 + X1}}} \right] \right\}. \quad (1.23)$$

Анализ выражения (1.23) показывает, что увеличение сопротивления $R_{н2}$ и уменьшение сопротивления $R22$ обуславливают увеличение напряжения $U_{н2}$. Получение величины напряжения $U_{н2}$, достаточной для выполнения требуемых норм яркости излучения излучателя $R_{н2}$, обычно не вызывает затруднений, в частности, за счет возможности увеличения значения напряжения $\sim E$ или соответствующего изменения коэффициента трансформации сигнальных трансформаторов (схема рис. 1.6). Это реализуется переключением выводов вторичных обмоток трансформаторов.

Уравнение (1.23) определяет величину переменного напряжения на первичной обмотке сигнального трансформатора $TV2$. С учетом реальных ограничений для создания требуемой яркости излучения соответствующего показания светофора величина напряжения на светодиодах СДМ определяется следующим выражением:

$$U_{СДМ} = \frac{U_{н2}}{n_2} - U_{впр}, \quad (1.24)$$

где $n_2 = \frac{w_1}{w_2}$ — коэффициент трансформации $TV2$, который, в частности, для сигнального трансформатора типа СТ-5 равен $n = 18,3$ с возможностью подстройки в пределах $\Delta n = \pm 10\%$.

Таким образом, полученные выражения позволяют определить параметры схемы управления светофором для каждого из приме-

няемых видов излучателей, находящихся в состоянии излучения, и найти требуемый коэффициент трансформации $TV2$.

Рассмотрим процессы передачи напряжения $U_{\text{вх}}$ на излучатель $R_{\text{н1}}$, который излучать не должен (см. рис. 1.7).

Напряжение в точке Б схемы рис. 1.7 равно: $U_{\text{Б}} = U_{\text{А}} - I_{21}X_{21}$, где ток I_{21} , определяющий возможность появления ненадлежащей засветки излучателя $R_{\text{н1}}$, находится из уравнения:

$$I_{21} = \frac{U_{\text{вх}} - I_{\text{вх}}R_{21}}{X_{21} + \frac{(R_{12} + R_{\text{н1}})X_1}{R_{12} + R_{\text{н1}} + X_1}}. \quad (1.25)$$

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 Изл. 1. Следовательно, показанное на схеме рис. 1.7 соединение емкостей C_{21} и C_1 является делителем напряжения, соотношение сопротивлений которого в значительной степени определяет величину напряжения на излучателе $R_{\text{н1}}$, который излучать не должен. В частности, как видно из выражения (1.25), при $C_{21} = 0$ это соответствует значению сопротивления $X_{21} = \infty$, и тогда получим величину $I_{21} = 0$.

Напряжение в точке Б схемы рис. 1.7:

$$U_{\text{Б}} = U_{\text{А}} \left[1 - \frac{X_{21}}{X_{21} + \frac{(R_{12} + R_{\text{н1}})X_1}{R_{12} + R_{\text{н1}} + X_1}} \right], \quad (1.26)$$

где

$$U_{\text{А}} = U_{\text{вх}} \left[1 - R_{21} \frac{X_2 + \frac{R_{21} \left(X_{21} + \frac{R_1 X_1}{R_1 + X_1} \right)}{R_{21} + X_{21} + \frac{R_1 X_1}{R_1 + X_1}}}{X_2 R_{21} \left(X_{21} + \frac{R_1 X_1}{R_1 + X_1} \right) + \frac{R_1 X_1}{R_1 + X_1}} \right]. \quad (1.27)$$

На основании выражения (1.26) после соответствующих преобразований напряжение на излучателе $R_{н1}$ определится:

$$U_{н1} = \frac{U_A R_{н1}}{R_{н1} + R12} \left[1 - \frac{X21}{X21 + \frac{(R12 + R_{н1})X1}{R12 + R_{н1} + X1}} \right]. \quad (1.28)$$

Напряжение непосредственно на излучателе $R_{н1}$ находится из выражений (1.26) и (1.28) 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 требованию отсутствия излучения СДМ.

Следовательно, полученные выражения позволяют рассчитать величины напряжений на излучателях Изл.1 и Изл.2. Это дает возможность определить максимальную длину кабеля, при которой напряжение на излучателе, который не должен излучать, не превысит допустимых величин. В полной мере это относится как к светодиодным светофорам, так и к светофорам с лампами накаливания.

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 $TV1$ и $TV2$. Выполняемый анализ должен быть применим как для светодиодных излучателей, так и для ламповых. Пересчет напряжений $U_{н1}$ и $U_{н2}$ в напряжения непосредственно на излучателях того или иного типа может быть выполнен при помощи выражения (1.24) 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 на переменном напряжении.

С учетом принятого допущения результаты расчета по полученным уравнениям приведены на рис. 1.8–1.14. Их анализ позволяет сделать следующие основные выводы.

График, представленный на рис. 1.8, определяет величины напряжения $U_{н1}$ на излучателе Изл.1, который излучать не должен. График показывает пример использования 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, хотя необходимо учитывать их несходство для различных показаний и цвета излучения. Для выполнения условий безопасности необходимо, чтобы при всех значениях параметров элементов схемы управления светофором напряжение $U_{изл1}$ было минимальным и не вызывало излучения надлежащих светодиодов.

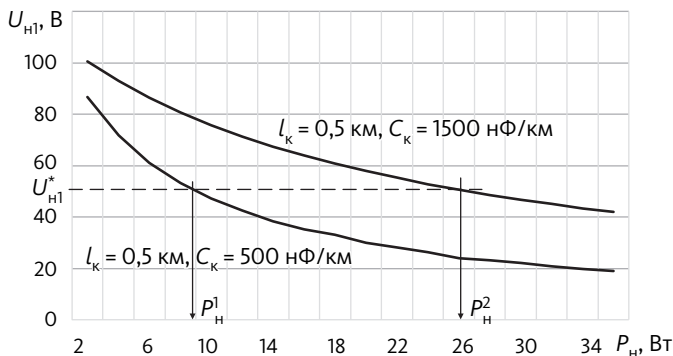


Рис. 1.8. График зависимости $P_{н1} = f(P_{н})$ для длины сигнального кабеля $l_k = 0,5$ км

Очевидно, что при определении 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 $P_{н1}$ излу-

чателя Изл.1. На графике рис. 1.8 значение напряжений $U_{н1}^*$ показано линией, параллельной оси мощности излучателей.

Рис. 1.8 показывает, что если для управления светофором назначено показанное максимально допустимое напряжение $U_{н1}^*$, то для значений $l_k = 0,5$ км, $C_{каб} = 500$ 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 в виде: $P_n > P_n^2$. Как видно, увеличение емкости C_k уменьшает диапазон возможных минимально допустимых величин мощности излучателей P_n .

На рис. 1.9 приведены зависимости тех же функций, но при увеличенной длине кабеля $l_k = 2$ км. Сравнение графиков (рис. 1.8 и 1.9) показывает, что возрастание длины кабеля обуславливает уменьшение области минимально допустимых значений мощности P_n .

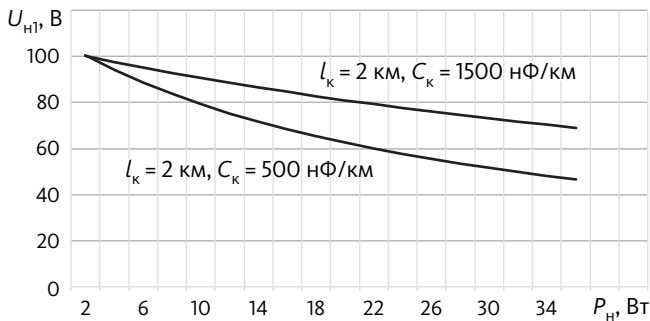


Рис. 1.9. График зависимости $P_{n1} = f(P_n)$ для длины сигнального кабеля $l_k = 2$ км

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

Приведенные графики свидетельствуют о меньшем негативном влиянии емкостей кабеля на систему управления светофоров с ламповым излучателем. В качестве примера можно рассмотреть области изменения показанных на графиках функций при значениях мощности P_n 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. Поэтому на практике светодиодные светофоры обычно не применяются в централизованных станционных системах управления станционными светофорами со значительными длинами сигнальных кабелей (в несколько километров).

Наличие емкостей C_k сказывается и на величине напряжения нормально функционирующего излучателя Изл.2 (рис. 1.9). Иллюстрация этого приведена на графиках рисунка 1.10. Уменьшение напряжения U_{H2} при увеличении длины сигнального кабеля l_k обусловливается шунтирующим влиянием емкости во входной цепи $R21C2$.

Таким образом, величины емкостей C_k определяют не только наличие или отсутствие засветки ненадлежащего показания светофора, но их величина влияет и на требуемое напряжение на нормально излучающем излучателе Изл.2. Причем увеличение емкостей C_k приводит к уменьшению напряжения U_{H2} . Значит, необходимо увеличить выходное напряжения сигнального трансформатора СТ2, что достигается путем переключения соответствующих отводов его вторичной обмотки.

На рис. 1.10–1.13 приведены зависимости величины напряжения U_{H1} на излучателе Изл.1 при изменении длины $l_{каб}$ сигнального кабеля для различных значений емкости C_k . Они показывают закономерное снижение напряжения U_{H1} с 70 и 95 В (график на рис. 1.11) до 25 и 49 В (график на рис. 1.12) для мощностей, равных 4 и 28 Вт соответственно.

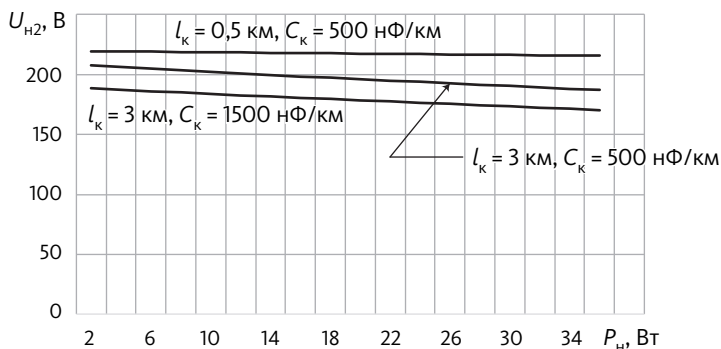


Рис. 1.10. График зависимости $U_{H2} = f(P_{H1})$ для различных длин сигнального кабеля l_k и емкости C_k

Максимальное значимое снижение величины напряжения U_{H1} при значительных длинах сигнального кабеля (2 км и более) и аналогично больших величинах емкости C_k и больших величинах сопротивления $R21$ (см. рис. 3.4) обусловлено снижением коэффициента передачи делителя напряжения, состоящего из сопротивления $R21$ и емкостного сопротивления конденсаторов $C2, C21$ и $C1$.

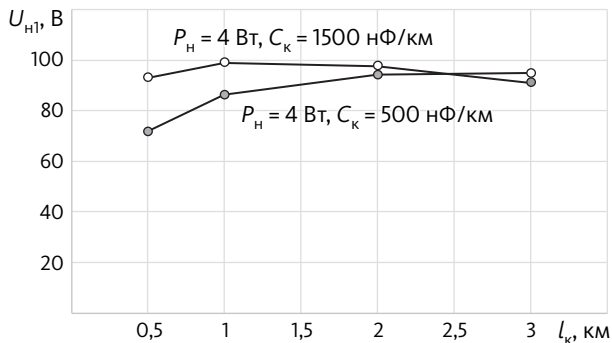


Рис. 1.11. График зависимости $U_{н1} = f(l_{к})$ для различных значений емкости $C_{к}$ при мощности, потребляемой излучателем $P_{н} = 4$ Вт

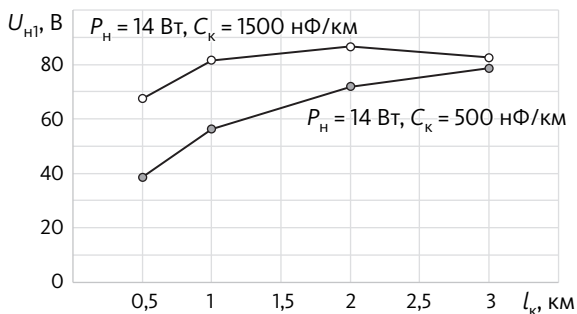


Рис. 1.12. График зависимости $U_{н1} = f(l_{к})$ для различных значений емкости $C_{к}$ при мощности, потребляемой излучателем $P_{н} = 14$ Вт

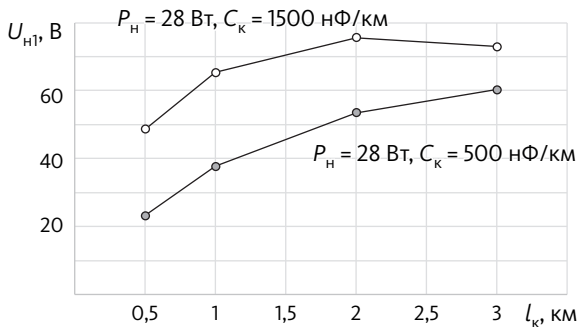


Рис. 1.13. График зависимости $U_{н1} = f(l_{к})$ для мощности, потребляемой излучателем $P_{н} = 28$ Вт

Выполненный анализ схемы с центральным управлением светофорами при питании переменным напряжением для различных длин сигнального кабеля показывает во многих случаях, что его применять нельзя из-за появления негативного эффекта засветки ненадлежащего показания светофора и невыполнения требований безопасности движения поездов. Принятый в настоящее время принцип исключения засветки, заключающийся в применении отдельных кабелей для каждого из показаний светофора экономически нецелесообразен, так как при этом увеличивается объем кабельной сети на станции с соответствующим ростом капитальных вложений и эксплуатационных расходов.

1.3. Контроль функционирования СДМ светофора

Такой контроль для схем с лампами накаливания осуществляется при помощи огневого реле постоянного или переменного напряжения, включенного последовательно в цепь питания излучателя [4, 2].

Существует два режима контроля функционирования светофора. Первый — «горячий», должен обеспечивать контроль светодиодов или СДМ в режиме излучения. Второй — «холодный», должен обеспечивать контроль целостности светодиодов или СДМ при отсутствии их излучения, чем обеспечивается гарантированная работоспособность светофора при последующем переключении его в режим излучения [2, 51].

Применение ламп накаливания с огневым реле позволяет осуществить достаточно надежный контроль функционирования излучателя в обоих режимах его работы. Поэтому подобный метод принят за стандартный и широко применяется на сети отечественных и зарубежных железных дорог.

Применение в светофорах светодиодов с последовательно включенным огневым реле не позволяет применять традиционные методы контроля функционирования СДМ, что в значительной степени относится к реализации режима «холодного» контроля.

Рассмотрим вольт-амперные характеристики лампы накаливания и светодиода, которые приведены на рис. 1.14, *а*, *б* [51].

Очевидно, что если ВАХ лампы накаливания в рабочей области с некоторой степенью приближения можно принять за линейную, то для СДМ она имеет нелинейный характер. Номинальный режим

излучения лампового светофора обеспечивается заданием величины требуемого напряжения $U_{\text{НОМ}}^{\text{ЛН}}$, а у светодиодного светофора задающим параметром является ток $I_{\text{НОМ}}^{\text{СВ}}$ (показано стрелками на ВАХ рис. 1.14, а и 1.14, б). В отличие от лампы накаливания, практические значения величин напряжений $U_{\text{НОМ}}^{\text{СВ}}$ и $U_{\text{ПОР}}^{\text{СВ}}$ имеют значительный технологический и эксплуатационный разброс при различных значениях тока $I_{\text{СВ}}$, в том числе и при $I_{\text{НОМ}}^{\text{СВ}} = \text{const}$, $I_{\text{НОМ}}^{\text{СВ}} = 0$. Пороговое напряжение $U_{\text{ПОР}}^{\text{ЛН}}$ задается в нормативных документах на лампу накаливания как обеспечивающее гарантированное отсутствия ее излучения в «холодном» режиме функционирования светофора. Эти факторы определяют достаточно точную согласованность параметров применяющихся огневых реле постоянного и переменного тока для светофоров с лампами накаливания.

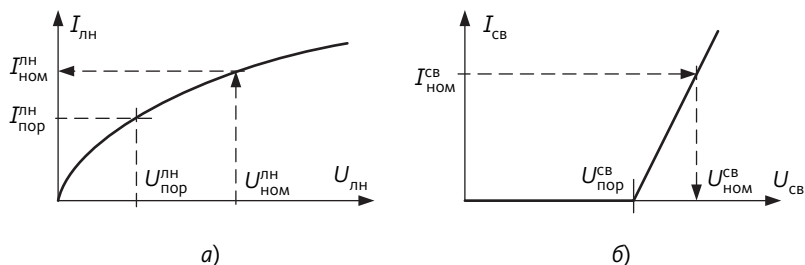


Рис. 1.14. Сравнительные ВАХ лампы накаливания (а) и светодиода (б)

Свойство нестабильности и неоднозначности воспроизводимости характеристик ВАХ p - n переходов относится практически ко всем полупроводниковым приборам — транзисторам, любым диодам и др. Поэтому следует воспринимать это их негативное свойство как неизменную данность, определенную физическими свойствами полупроводниковых приборов, что следует учитывать при разработке электронных схем [51].

Для СДМ параметры точки существования номинального излучения $I_{\text{НОМ}}^{\text{СВ}}$ и $U_{\text{НОМ}}^{\text{СВ}}$ на ВАХ светодиода суть величина, которую нельзя достаточно точно определить исходя из данных, задаваемых нормативными документами (ТУ) на светодиоды или функционально и конструктивно законченные СДМ.

Величина порогового напряжения точки $U_{\text{ПОР}}^{\text{СВ}}$ ВАХ, то есть начало излучения светодиодов имеет аналогичную неопределенность.

В общем случае входное напряжение излучателя, которое можно принять за исходную точку при назначении нормы допустимого или недопустимого уровня напряжения на входе лампового светофора (рис. 1.14, а), должна соответствовать неравенству:

$$U_{\text{вх}}^{\text{ЛН}} < U_{\text{пор}}^{\text{ЛН}} \quad (1.29)$$

Для светодиодного светофора (рис. 1.14, б), где для задания тока через светодиоды СДМ применяются активные резисторы R_{T} , функционально аналогичное неравенство имеет вид:

$$U_{\text{вх}}^{\text{СВ}} < (mU_{\text{пор}}^{\text{СВ}} + U_{\text{ВП}} + U_{\text{T}}), \quad (1.30)$$

где U_{T} — падение напряжения на токозадающих резисторах R_{T} ; m — количество последовательно включенных светодиодов в одной из параллельных цепей СДМ.

Так как для питания СДМ, в отличие от лампы накаливания, требуется только постоянное напряжение, то в выражении (1.30) величина $U_{\text{ВП}}$ соответствует падению напряжения на выпрямителе, включаемом на вторичной обмотке сигнального трансформатора. Обычно в качестве выпрямителя используется мостовая схема, поэтому напряжение $U_{\text{ВП}}$ равно падению напряжения на двух последовательно включенных выпрямительных диодах.

Рассмотрим вопросы практической реализуемости выполнения «горячего» режима работы светодиодного светофора. На рис. 1.15 приведена эквивалентная схема подключения огневого реле ОР в стандартных схемах контроля «горячего» режима.

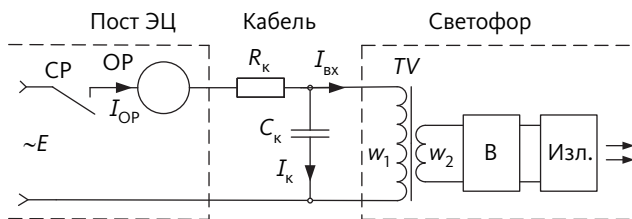


Рис. 1.15. Стандартная схема включения огневого реле ОР

Для нее выполняется равенство:

$$I_{\text{ОР}} = I_{\text{икаб}} + I_{\text{ивх}} \quad (1.31)$$

где I_{OP} — ток, протекающие через обмотку огневого реле ОР; $I_{ик}$ = ток, протекающий через конденсатор C_k , который отображает емкость между жилами соответствующей пары сигнального кабеля; $I_{изл}$ — входной ток сигнального трансформатора TV .

Напряжение U_{w1} на первичной обмотке TV является стандартным и обычно составляет $\sim E = 220$ В. Входная мощность трансформатора, которая требуется для создания требуемого тока $I_{св}$ через светодиоды СДМ, то есть для заданного режима излучения светодиодного светофора, равна: $P_{вх} = P_{вп} + P_{изл}$. Тогда входной ток схемы:

$$I_{вх} = I_{св} \frac{2U_{вп} + U_{СДМ}}{U_{w1}}, \quad (1.32)$$

где $U_{СДМ}$ — напряжение, подводимое к СДМ с учетом падения напряжения на токозадающих резисторах или на других элементах задания тока через светодиоды.

Ток, протекающий через конденсатор C_k , равен:

$$I_k = 2\pi f U_{w1} C_k, \quad (1.33)$$

где $f = 50$ Гц.

Очевидно, что увеличение тока I_k при малых значениях мощности излучателя или, что равносильно, тока $I_{вх}$ может нарушить функции контроля излучения СДМ. В этом случае работоспособность схемы контроля будет определяться коэффициентом возврата электромагнитного огневого реле ОР и соотношением токов $I_{вх}$ и I_k между собой.

Для определения этого соотношения можно ввести параметр — условный показатель превышения полезного тока $I_{вх}$ над паразитным током I_k :

$$\delta = \frac{I_{вх}}{I_k} = I_{св} \frac{2U_{вп} + U_{СДМ}}{2\pi f C_k U_{w1}^2}. \quad (1.34)$$

Для увеличения надежности функционирования схемы контроля «горячего» режима работы требуется, чтобы показатель δ был максимально возможным. Из (1.34) видно что увеличение мощности излучателя $P_{изл} = I_{св}(2U_{вп} + U_{СДМ})$ приводит к возрастанию δ , а увеличение емкости C_k обуславливает его уменьшение. Учитывая реальные значения коэффициента возврата существующих огневых реле, необходимо иметь $\delta > 5$ или более.

Потребление мощности светодиодных светофоров существенно меньше значения, чем ламповых. Поэтому критичность к величине емкости C_k у светодиодных светофоров гораздо больше. Это во многих случаях ограничивает максимально допустимую длину сигнального кабеля.

Кроме того, меньшие токи, потребляемые СДМ при центральном управлении светофорами переменным напряжением, не позволяют применять существующие стандартные огневые реле.

Ламповый светофор представляет собой единичный излучатель — нить накаливания. Отказ светофора, возникающий при обрыве в цепи нити, полностью прекращает протекание тока через нее, а это сразу же регистрируется существующими огневыми реле постоянного или переменного тока.

В светодиодном светофоре излучатель состоит обычно из нескольких k параллельно включенных последовательных цепей светодиодов (см. рис. 1.2, б). Обрыв в одной из параллельно включенных цепей приводит к недопустимому снижению суммарной яркости излучения светофора. Если значение k лежит в пределах трех-пяти и более, то, учитывая рассмотренные факторы, обнаружить этот отказ светофора традиционными методами практически невозможно [55].

Рассмотрим вопросы реализации «холодного» режима функционирования светофора. В ламповых светофорах в нормативных документах на лампу накаливания задаются параметры $U_{\text{пор}}^{\text{лн}}$ и $I_{\text{пор}}^{\text{лн}}$, при выполнении которых гарантируется отсутствие ее видимого излучения (см. рис. 1.14, а и б). При выключенном показании светофора схема контроля «холодного» режима работы переключается на высокоомную обмотку огневого реле, которое регистрирует малый ток $U_{\text{пор}}^{\text{лн}}$. Подобный метод контроля «холодного» режима работы достаточно надежно работает при питании ламповых светофоров от источника постоянного и переменного напряжения [56].

В светодиодных светофорах достаточно точная и информативная точка $U_{\text{пор}}^{\text{лн}}$, $I_{\text{пор}}^{\text{лн}}$ отсутствует. Даже малые токи $I_{\text{св}}$, соответствующие значениям напряжения, близким к величине $U_{\text{пор}}^{\text{св}}$ (см. рис. 1.14, б), вызывают видимое излучение СДМ. При дальнейшем снижении напряжения $U_{\text{пор}}^{\text{св}}$ ток через светодиоды не идет. Отметим неоднозначность и невоспроизводимость этой точки из-за технологического и эксплуатационного разброса параметров p - n переходов.

Применение импульсных методов контроля «холодного» режима работы не гарантирует достаточно надежный результат. Это обусловлено тем, что применение импульсов даже достаточно малой длительности (единицы-доли микросекунд с большой скважностью) вызывает видимое излучение светодиодов в СДМ [57] (схема рис. 1.16).

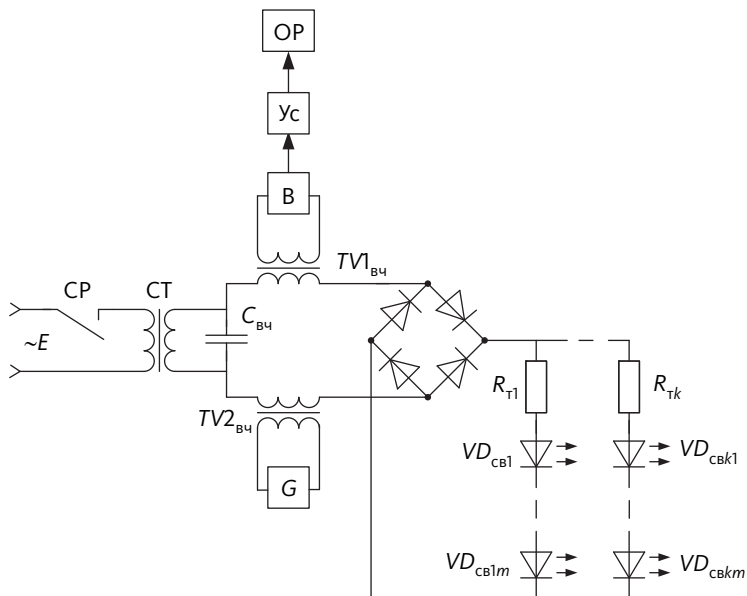


Рис. 1.16. Вариант схемы контроля с импульсным генератором

В схеме рис. 1.16 в цепь отключенной контактом сигнального реле CP от источника питания $\sim E$ группы светодиодов последовательно включен генератор импульсов высокой частоты G . Если эти импульсы будут достаточно малой длительности и большой скважности, то возможно, что излучение светодиодов будет допустимо небольшим. Высокочастотные трансформаторы $TV1_{BЧ}$ и $TV2_{BЧ2}$ осуществляют необходимое согласование токов и напряжений высокой частоты следования импульсов схемы. Конденсатор $C_{BЧ}$ шунтирует вторичную обмотку сигнального трансформатора CT для осуществления протекания тока высокой частоты. Вторичная обмотка трансформатора $TV_{BЧ2}$ через выпрямитель B и усилитель Yc подключена ко входу огневого реле OP .

В некоторых случаях при тщательной и корректной разработке схемы возможно обеспечение контроля «холодного» режима схемы, приведенной рис. 1.16. Однако надежность и точность функционирования такой схемы в условия эксплуатации и при наличии сброса параметров светодиодов будут невелики [58].

Надежных и известных схем контроля диагностики «холодного» режима светодиодов и СДМ в отечественной и зарубежной практике в отличие от ламповых светофоров нет [2]. Это служит одной из проблем ограничения применения светодиодных светофоров на железнодорожном транспорте.

Выполненный в данном разделе анализ существующих схем ламповых и светодиодных светофоров определяет следующие их сравнительные характеристики.

Есть определенное сходство светодиодных светофоров с ламповыми. Но это относится лишь к основной функции любого светофора — возможность и необходимость получения его излучения по внешней команде при безусловном выполнении требований безопасности движения поездов.

Различия в схемотехнике и функционировании светодиодных и ламповых светофоров не позволяют просто перенести известные схемы управления и контроля на современную технику использования светодиодов и СДМ в устройствах железнодорожной автоматики и телемеханики.

Анализ процессов и схем существующих светодиодных светофоров показывает следующие трудности их реализации для применения на сети железных дорог:

- большинство схем управления светодиодными светофорами обладает невысокой энергетической эффективностью, нет сравнительного анализа и поэтому нельзя получить их оптимальные параметры и требуемые функциональные возможности применения на железнодорожном транспорте;
- существующие в сигнальных кабелях паразитные емкости между жилами одной сигнальной пары между соседними сигнальными парами негативно влияют на выполнение основных функций управления и контроля функционирования светофора;
- известные схемы управления светодиодными светофорами не позволяют увеличить длину сигнальных кабелей до нескольких единиц-десятков километров в режиме рабочего излучения светодиодов или СДМ;

- увеличение длины сигнального кабеля негативно влияет на осуществление контроля функционирования светофора в «горячем» режиме его работы;
- не существует принципов и методов реализации контроля светодиодных светофоров в «холодном» режиме работы.

Во всех приводимых далее схемах в качестве управляющих полупроводниковых ключей условно показываются биполярные транзисторы. Однако следует учитывать, что в большинстве случаев вместо них могут и должны использоваться МОП-транзисторы, которые обладают лучшими энергетическими характеристиками и временными параметрами. Следует отметить, что эта замена транзисторов не влияет на принцип действия и функциональные возможности приводимых схем и устройств.

1.4. Применение микроэлектронных драйверов в качестве источников тока

Структурная обобщенная схема включения микроэлектронного драйвера в качестве источника тока приведена на рис. 1.17 [50, 59].

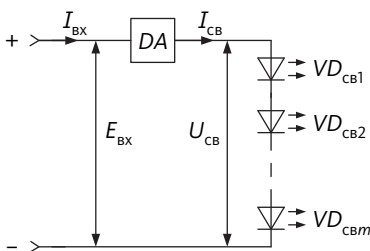


Рис. 1.17. Структурная схема подключения микроэлектронного драйвера *DA*

Если принять, что КПД драйвера *DA* достаточно высок и приближается к 100 %, то для схемы рис. 1.17 справедливо равенство входной $P_{\text{ВХ}}$ и выходной $P_{\text{ВЫХ}}$ мощностей:

$$P_{\text{ВХ}} = P_{\text{ВЫХ}}, \quad (1.35)$$

где $P_{\text{ВХ}} = E_{\text{ВХ}} I_{\text{ВХ}}$; $P_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{СВ}} I_{\text{СВ}}$.

Различные виды драйверов в зависимости от соотношения напряжений $E_{\text{вх}}$ и $U_{\text{св}}$ могут работать в двух основных режимах. Первый из них, более распространенный, называется понижающим режимом работы, который имеет место при $E_{\text{вх}} > U_{\text{св}}$. Второй режим, повышающий, существует при $E_{\text{вх}} < U_{\text{св}}$ и применяется при малых напряжениях $E_{\text{вх}}$, когда количество последовательно включенных светодиодов $VD_{\text{св1}}, \dots, VD_{\text{св}n}$ в СДМ велико, а напряжение $E_{\text{вх}}$ относительно мало. В частности, применение второго режима необходимо в некоторых случаях при использовании резервированных светодиодных светодиффузоров, рассматриваемых в разделе 3.

Принцип понижения величины постоянного напряжения широко применяется в электротехнике и в электронике. Это может быть выполнено путем применения активных резисторов или линейных стабилизаторов постоянного напряжения. Повысить величину постоянного напряжения можно, применив только импульсные методы преобразования энергии постоянного напряжения.

Для понижения и повышения напряжения применения только импульсные методы преобразования из-за их высокой энергетической эффективности, когда КПД таких устройств преобразования приближается к 100 %. В терминах силовой электроники подобные устройства в общем виде называются импульсными стабилизаторами постоянного напряжения.

Функция, выполняемая традиционным стабилизатором постоянного напряжения, заключается в стабилизации (регулировании) напряжения на нагрузке. Упрощенная схема подобного стабилизатора понижающего типа приведена на рис. 1.18 [49].

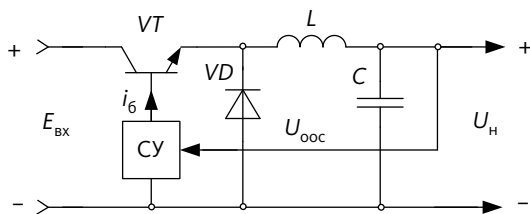


Рис. 1.18. Схема импульсного стабилизатора постоянного напряжения понижающего типа

Схема стабилизатора — это система автоматического регулирования (САР). Выходное напряжение стабилизатора $U_{\text{н}}$ в виде сигнала отрицательной обратной связи $U_{\text{ооc}}$ передается на вход схемы

управления СУ, которая формирует длительность соответствующих выходных импульсов тока базы i_b для управления транзистором VT.

Если на выходе этого стабилизатора подключить светодиоды, то цель создания требуемого неизменного тока через них не будет достигнута. Поэтому схемотехника драйверов, выполняющих функцию источника тока, имеет иной вид.

В этом случае сигналом обратной связи САР должен служить ток: $I_{оос} = I_{св}$. Вариант схемы стабилизатора тока для случая, когда $E_{вх} > U_{св}$ (см. рис. 1.17), приведен на рис. 1.19. Он построен на основе стабилизатора постоянного напряжения понижающего типа [48].

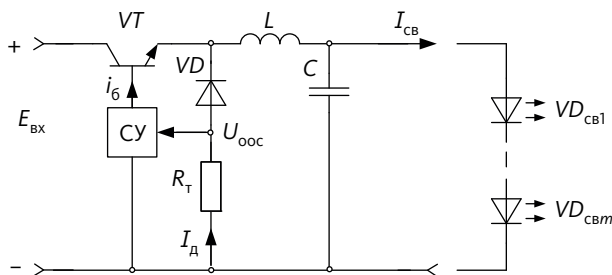


Рис. 1.19. Схема стабилизатора тока для случая $E_{вх} > U_{св}$

Среднее значение тока, протекающего по токовому резистору R_T , пропорционально току $I_{св}$, протекающему через светодиоды $VD_{св1}, \dots, VD_{свm}$ (рис. 1.19). Поэтому падение напряжения на R_T , равное входному сигналу схемы управления СУ, $U_{оос}$, также пропорционально току $I_{св}$, что и определяет работу схемы САР в качестве стабилизатора тока $I_{св}$.

Так как сигнал напряжения $U_{оос}$ подлежит необходимому дальнейшему усилению в схеме СУ, то величина сопротивления резистора R_T может быть достаточно малой. Практически она лежит в пределах единиц-десятков мОм. Очевидно, что включение такого малого сопротивления в цепь тока I_d диода VD не вызывает каких-либо значимых потерь мощности в драйвере и практически не влияет на его КПД.

Для второго, повышающего, режима работы драйвера, когда $E_{вх} < U_{св}$, применяется другая схема стабилизатора тока (рис. 1.20).

В терминологии силовой электроники эта схема является модификацией повышающего стабилизатора постоянного напряжения, который позволяет повышать напряжение $E_{вх}$ в несколько десятков-сотен раз.

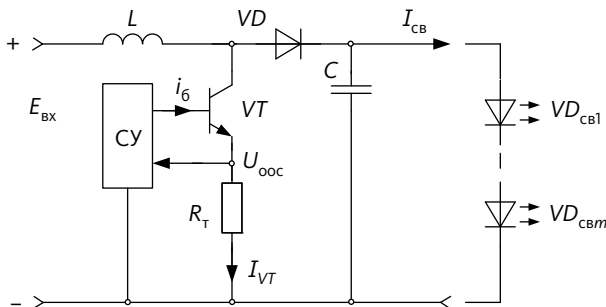


Рис. 1.20. Схема стабилизатора тока для случая $E_{\text{вх}} < U_{\text{св}}$

Ток I_{VT} , протекающий через транзистор VT во включенном состоянии, пропорционален току $I_{\text{св}}$, что соответствует пропорциональности напряжения $U_{\text{ооc}}$ относительно тока $I_{\text{св}}$. Аргументы по схеме рис. 1.19 о высокой энергетической эффективности и функционированию относятся и к схеме стабилизатора по рис. 1.20.

Выпускаемые отечественной и зарубежной промышленностью драйверы для питания светодиодов и СДМ принципиально реализуются по рассмотренным методам стабилизации тока. В настоящее время существует большая номенклатура подобных драйверов на токи стабилизации от единиц-десятков миллиампер до единиц-десятков ампер. При этом диапазон рабочих напряжений $E_{\text{вх}}$ составляет от 1,2–1,5 Вт до нескольких десятков вольт, а для специальных применений и более.

Существует общемировая тенденция внедрения светодиодной техники для замены других источников излучения как в быту, так и в промышленности и транспорте. Это будет способствовать улучшению энергетических, массогабаритных и надежностных характеристик рассмотренных видов микросхем.

Раздел 2

Повышение энергетической эффективности светодиодных светофоров

В настоящем разделе рассматриваются схемы светодиодных светофоров, в которых для формирования токов через светодиоды используются нестандартные схемотехнические решения, например, формирование тока через светодиоды при помощи реактивных электротехнических элементов, в частности, конденсаторов переменного напряжения или индуктивных элементов. Применение этих элементов в схемах светодиодных светофоров позволяет исключить активные потери мощности, существующие при использовании активных токозадающих резисторов. При этом в подобных схемах реализуется также ряд других преимуществ [60–62].

2.1. Конденсаторные схемы светодиодных светофоров

Конденсаторные схемы могут быть применены при питании светофоров от источника переменного напряжения.

Схемотехника подобных светофоров основана известном принципе снижения величины переменного напряжения при помощи последовательно включенного реактивного элемента — конденсатора. Здесь конденсатор выполняет функцию последовательно

включенного сопротивления $X_C = \frac{1}{2\pi fC}$, которое снижает входное напряжение до требуемой на нагрузке [45]. Одновременно с этим

последовательно включенный конденсатор выполняет функцию источника тока, что требуется для создания эффективного излучения светодиодов или СДМ и защиты источника $\sim E_c$ от короткого замыкания в цепи светодиодов.

Вариант одной из схем конденсаторного светодиффузора приведен на рис. 2.1 [63, 64].

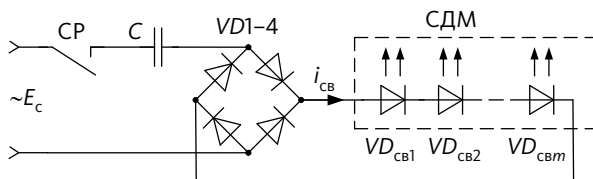


Рис. 2.1. Первый вариант схемы конденсаторного светодиффузора

Если принять, что входное переменное напряжение $\sim E_c \gg \sum U_{cb}$, то для этой схемы среднее значение тока, протекающего через светодиоды, определяется:

$$I_{cb} = 2\pi f C \sim E_c. \quad (2.1)$$

Второй вариант схемы конденсаторного светодиффузора приведен на рис. 2.2 [65].

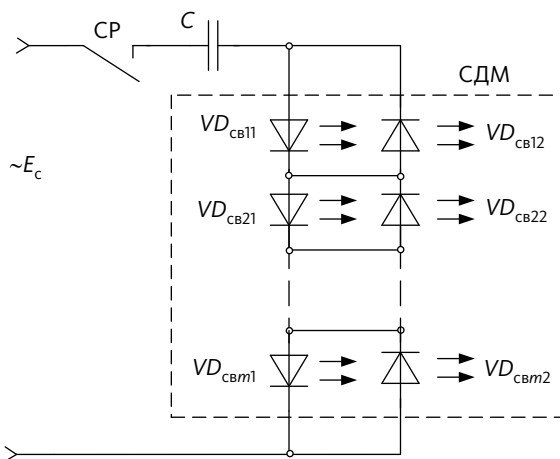


Рис. 2.2. Второй вариант схемы конденсаторного светодиффузора

Отличительное свойство схемы, приведенной на рис. 2.2, — отсутствие выпрямителя, функции которого выполняют встречно (по полярности) и параллельно включенные светодиоды излучающей СДМ. На протяжении положительной полярности переменного напряжения $\sim E_c$ ток протекает через излучающие при этом светодиоды $VD_{cb11}, VD_{cb21}, \dots, VD_{cbm1}$, а при отрицательной — $VD_{cb21}, VD_{cb22}, \dots, VD_{cbm2}$ [66, 67].

Это преимущество схемы рис. 2.2 перед схемой рис. 2.1. Здесь в процессе функционирования схемы происходит поочередная смена полярности напряжения на одном из двух параллельно включенных светодиодов. То есть, если один из светодиодов излучает (прямая полярность напряжения), то на параллельно и встречно включенный светодиод поступает обратная полярность напряжения:

$$U_{пр1} = -(U_{обр2}). \quad (2.2)$$

Следовательно, для практической реализации схемы, приведенной на рис. 2.2, требуется, чтобы выбранный тип светодиодов в процессе импульсной работы допускал наличие обратного напряжения, величина которого определяется выражением (2.2). Необходимо учитывать, что величина прямого падения напряжения зависит от цвета его излучения, то есть от вида показания светофора. Разница может достигать нескольких вольт. Существующая номенклатура отечественных и зарубежных светодиодов во многих случаях удовлетворяет условию возможности подачи соответствующего обратного напряжения на $p-n$ переход.

Временные диаграммы работы схемы конденсаторного светофора приведены на рис. 2.3.

Для схемы рис. 2.3 справедливы следующие соотношения, определяющие параметры временных диаграмм рис. 2.3 [48–50]:

$$\Theta = \arccos \left(1 + \frac{2mU_{cb}}{\sim E_{c\max}} \right), \quad (2.3)$$

$$I_{cb\max} = \omega C (\sim E_{c\max}), \quad (2.4)$$

$$i_{cb}(t) = 2\omega C \sin(\omega t + \Theta), \quad (2.5)$$

где $\sim E_{c\max}$ — амплитудное значение функции входного переменного напряжения $\sim e_c(t)$.

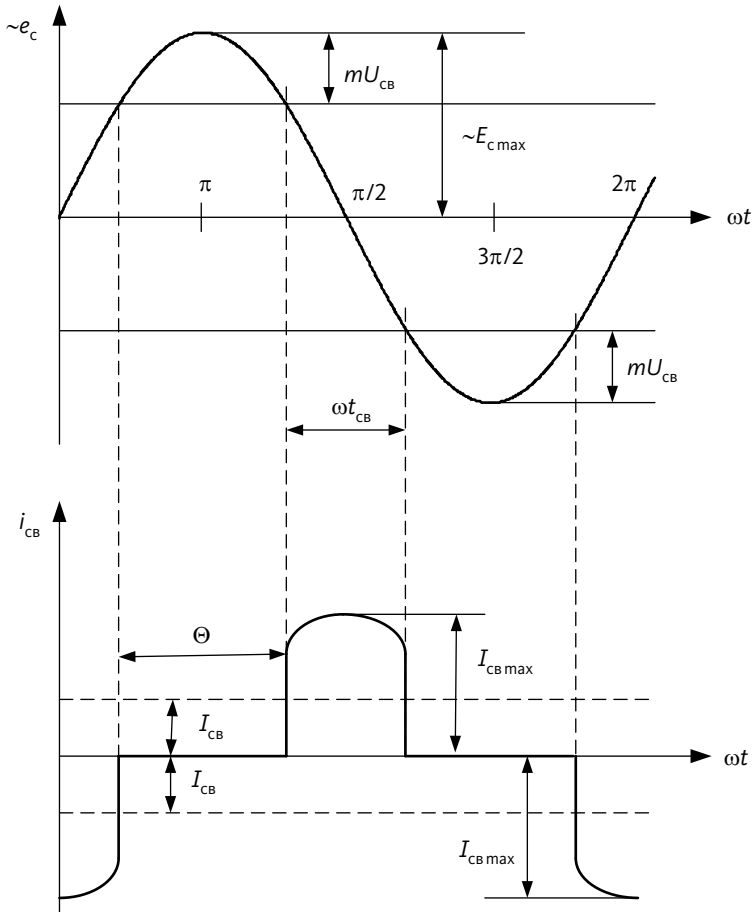


Рис. 2.3. Временные диаграммы работы схемы рис. 2.2

Среднее значение тока, протекающего через каждый из светодиодов СДМ, находится:

$$I_{cb} = 2fC(\sim E_c \sqrt{2} - mU_{cb}), \quad (2.6)$$

где $\sim E_c$ — действующее значение входного напряжения; U_{cb} — падение напряжения на одном светодиоде в области его прямой проводимости ВАХ.

Скважность импульсов тока, протекающих через светодиоды, определяется:

$$\gamma = t_{\text{и}} f = \frac{1}{180} \arccos \left(1 - \frac{m U_{\text{св}}}{\sim E_c \sqrt{2}} \right). \quad (2.7)$$

Как видно из (2.4), амплитуда импульса тока через последовательно включенные светодиоды $I_{\text{св max}}$ не зависит от их числа, а определяется емкостью конденсатора C и величиной напряжения $\sim E$. Однако длительность импульса тока $t_{\text{и}}$ зависит от произведения $m U_{\text{св}}$.

Выражение (2.7) показывает, что уменьшение m и $U_{\text{св}}$ уменьшает скважность импульсов γ . В пределе при $m U_{\text{св}} = 0$ получим $\gamma = 0,5$, что определяет максимальное значение тока через конденсатор C . Если $m U_{\text{св}} = \sim E_c \sqrt{2}$, то $\gamma = 0$ и ток в соответствующей светодиодной цепи будет отсутствовать [68].

Так как при $f = 50$ Гц наиболее материалоемким и крупногабаритным элементом схемы является конденсатор C , то интересно рассмотреть снижение ее емкости. Очевидно, что при прочих равных условиях это может быть достигнуто увеличением частоты f входного переменного напряжения $\sim E_c$ до нескольких десятков кГц или более.

Отдельно следует отметить вопрос выбора типа конденсатора рассматриваемых схем светофоров. Он определяется значением реактивной мощности, которую конденсатор может рассеивать (приводится в нормативных документах на различные типы конденсаторов). Применять электролитические конденсаторы в данном случае нельзя. Здесь можно применять металлопленочные конденсаторы, например, группы К-76 или специальные конденсаторы переменного напряжения, относящиеся к классу электротехнических, а не электронных элементов. Они применяются в мощных силовых устройствах преобразования электрической энергии: инверторах, однофазных электродвигателях и др. [70, 71]. В этом случае можно получить определенный выигрыш по материалоемкости.

Существуют другие варианты схем конденсаторных схем управления, например, функционально более сложные устройства со светодиодными матрицами.

Одна из них может использоваться для вывода визуальной статической или динамической информации, в частности, для применения в табло расписания движения или в качестве некоторых ви-

дов маршрутных указателей.

Схема конденсаторного управления матрицей СДМ вида 3X3 приведена на рис. 2.4, а временные диаграммы его работы полностью соответствуют ранее приведенным диаграммам рис. 2.3 [69].

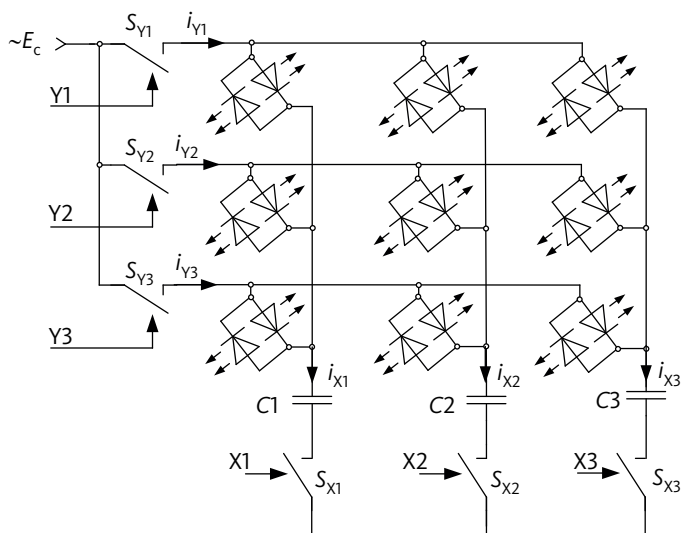


Рис. 2.4. Схема конденсаторного управления СДМ вида 3X3 с конденсаторным управлением

Из рис. 2.4 видно, что для получения излучения соответствующих пар светодиодов СДМ применены, как и в схеме рис. 2.2, параллельно включенные светодиоды с различной полярностью их соединения между собой.

Здесь ввод информации на СДМ осуществляется при помощи логических сигналов X1, X2, X3 и Y1, Y2, Y3 и их взаимодействии, которые создаются микроконтроллером. Уравнения (2.3)–(2.7) в полной мере относятся и к процессам работы схемы управления СДМ рис. 2.4.

В качестве ключей S_{Y1} , S_{Y2} , S_{Y3} и S_{X1} , S_{X2} , S_{X3} могут применяться или тиристоры, или транзисторы с мостовым выпрямительным элементом. Очевидно, что во втором случае использование МОП-транзисторов с энергетической точки зрения предпочтительно. Здесь могут использоваться тиристоры, так как при работе на переменном напряжении специальных достаточно сложных схем или

устройств для их выключения не требуется. Кроме того, для управления тиристорами требуется значительно меньшая управляющая мощность управления по отношению к биполярным транзисторам.

В случае больших мощностей, то есть при применении светодиодов с рабочими токами в десятки ампер, рационально использование IGBT-транзисторов, например, в прожекторах локомотивов или в системах освещения грузовых станций [59].

Таким образом, применение рассмотренных видов конденсаторных светофоров или устройств отображения информации позволяет по сравнению с резистивными схемами существенно уменьшить энергопотребление [71, 72].

Если сравнивать надежность и долговечность работы конденсаторов, то они гораздо выше надежности токозадающих устройств на микроэлектронных драйверах. По стоимости происходит обратный процесс. Однако для управления светофорами с токозадающими резисторами необходимо использовать источник только постоянного напряжения. Это же относится и к схемам управления с микроэлектронными драйверами.

При центральных системах управления светофорами обычно применяется переменный ток, и в этом случае для согласования напряжений необходимо применять низкочастотные материалоемкие сигнальные трансформаторы. Они принципиально отсутствуют в конденсаторных схемах управления светодиодными светофорами. Материалоемкость и стоимость конденсаторов гораздо ниже, чем применяющихся в настоящее время низкочастотных сигнальных трансформаторов.

Питание светофоров от переменного напряжения дает возможность функционировать от повышенного напряжения, например, 220 В, а значит, увеличить допусаемую длину сигнальных кабелей.

Поэтому практический выбор схем для применения того или иного вида светофора нужно производить с учетом изложенных факторов и возможности их практического применения [71].

2.2. Индуктивные схемы светодиодных светофоров

Принцип действия индуктивных схем светодиодных светофоров основан на накоплении тока в индуктивности намагничивания, например, трансформатора или дросселя, и последующей передаче его на светодиоды СДМ. Один из вариантов схемы при-

веден на рис. 2.5 [72, 73].

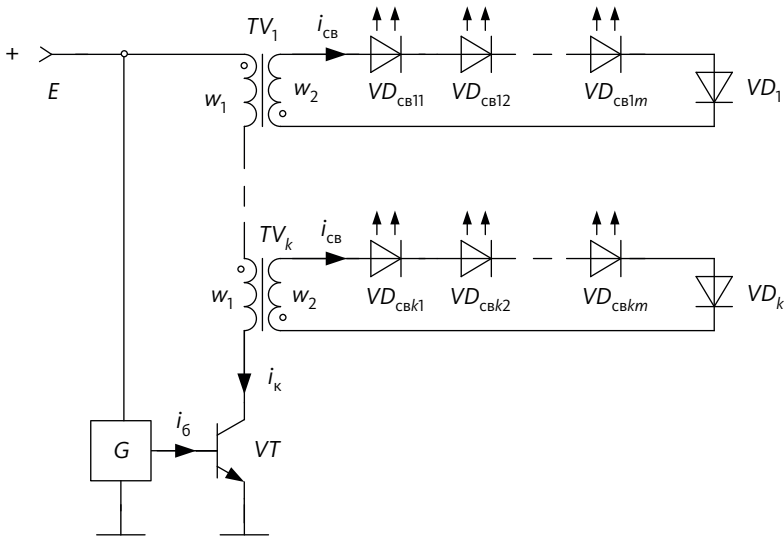


Рис. 2.5. Схема светодиодного светофора с формированием тока при помощи трансформаторов

На рис. 2.6 показаны временные диаграммы процессов работы схемы рис. 2.5.

Транзистор VT , управляемый генератором G , работает в импульсном режиме. При открытом состоянии VT на этапе времени t_1 ток его коллектора $i_k(t)$, протекая по включенным последовательно первичным обмоткам w_1 трансформаторов TV_1, \dots, TV_k , обуславливает накопление энергии магнитного поля в их индуктивности намагничивания. Закон увеличения тока $i_k(t)$ линейный. Вследствие соответствующего включения обмоток w_1 и w_2 (показано точками на схеме рис. 2.5), напряжение вторичных обмоток трансформаторов имеет такую полярность, при которой ток $i_{cb} = 0$.

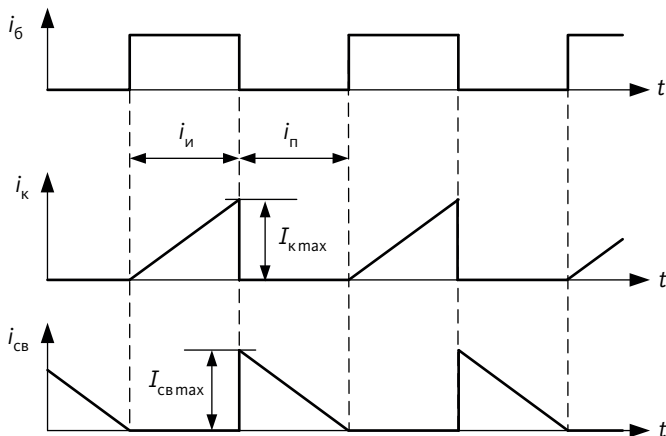


Рис. 2.6. Временные диаграммы работы схемы светофора по рис. 2.5

На этапе времени паузы $t_{\text{п}}$ после выключения транзистора $VТ$ полярность напряжения на обмотках w_2 , в соответствии с законом самоиндукции $e = -L \frac{di}{dt}$, изменяется на обратную. Ток, накопленный в индуктивности намагничивания $ТV$, по линейному закону разряжается на светодиоды, обуславливая протекание через них тока $i_{\text{св}}$, вызывая их излучение. Таким образом, через светодиоды протекает импульсный ток, и яркость их излучения зависит от среднего значения импульсного тока [73].

После разряда индуктивности намагничивания трансформаторов транзистор $VТ$ включается и процессы повторяются аналогично.

Определим основные соотношения схемы рис. 2.5 применительно к временным диаграммам ее работы (рис. 2.6).

При равенстве индуктивностей L_1 первичных обмоток w_1 трансформаторов $ТV$ схемы амплитуда импульсов тока коллектора:

$$I_{\text{кmax}} = \frac{Et_{\text{и}}}{kL_1}, \quad (2.8)$$

а амплитуда импульсов тока, протекающих через каждый из светодиодов схемы (рис. 2.5):

$$I_{\text{свmax}} = \frac{Et_{\text{и}}w_1}{kL_1w_2}. \quad (2.9)$$

Среднее значение тока, протекающего через светодиоды и определяющее яркость их излучения, равно

$$I_{\text{св}} = E \frac{t_{\text{и}} t_{\text{п}} w_1}{2TkL_1 w_2}. \quad (2.10)$$

Это выражение может быть преобразовано в следующий вид:

$$I_{\text{св}} = \frac{Et_{\text{и}} w_1}{2L_1 w_2} \left(1 - \frac{t_{\text{п}}}{T}\right), \quad (2.11)$$

которое показывает, что при $k = \text{const}$ увеличение среднего значения тока $I_{\text{св}}$ достигается при увеличении напряжения питания E , коэффициента трансформации $n = w_1/w_2$ и при уменьшении индуктивности L_1 первичных обмоток трансформаторов TV_1, \dots, TV_k .

Влияние временных параметров $t_{\text{и}}$ и $T = t_{\text{п}} + t_{\text{и}}$ на величину тока $I_{\text{св}}$ носит более сложный характер. Функция (2.11) имеет экстремум, который имеет место при значениях аргументов:

$$t_{\text{и}}^{\text{max}} = \frac{T}{2}, \quad I_{\text{св}}^{\text{max}} = \frac{ETw_1}{8kL_1}. \quad (2.12)$$

Они показывают, что максимум тока $I_{\text{св}}$ имеется при $t_{\text{и}} = t_{\text{п}}$. Если длительность импульса $t_{\text{и}}$ может быть достаточно точно задана выбором временных параметров генератора G (см. схему рис. 2.5), то интервал времени $t_{\text{п}}$ определяется при прочих равных условиях процессами разряда индуктивности L_2 вторичных обмоток трансформаторов TV на светодиоды.

Примем, что вольт-амперная характеристика каждой группы светодиодов, состоящая из m светодиодов, выражается последовательным соединением источника $U_{\text{св}} = mU_{\text{св}(0)}$ и сопротивления $R_{\text{св}} = mR_{\text{св}(0)}$. Тогда, если пренебречь влиянием защитных диодов VD_1, \dots, VD_m (см. схему рис. 2.5), то разряд индуктивностей L_2 , определяющий закон снижения тока через светодиоды, выражается уравнением:

$$L_2 \frac{di_{\text{св}}}{dt} + mR_{\text{св}} i_{\text{св}} = mU_{\text{св}(0)}. \quad (2.13)$$

Его решение при учете в цепи разряда начального значения тока $I_{\text{св max}}$ имеет следующий вид:

$$i_{\text{св}}(t) = \frac{U_{\text{св}(0)}}{R_{\text{св}(0)}} \left[1 - \exp\left(-\frac{mR_{\text{св}(0)}}{L_2} t\right) \right] + I_{\text{св max}} \exp\left(-\frac{mR_{\text{св}(0)}}{L_2} t\right). \quad (2.14)$$

Разложение в ряд экспоненты этого выражения и учет только члена в первой степени дает более простое выражение:

$$i_{\text{св}}(t) = I_{\text{св max}} - m \left(\frac{I_{\text{св max}} R_{\text{св}(0)} - U_{\text{св}(0)}}{L_2} \right) t. \quad (2.15)$$

Приравнивание (2.15) к нулю определяет следующее уравнение для нахождения длительности полного разряда индуктивности L_2 на светодиодах:

$$t_{\text{разр}} = \frac{I_{\text{св max}} L_2}{m(I_{\text{св max}} R_{\text{св}(0)} - U_{\text{св}(0)})}. \quad (2.16)$$

Если учесть, что для получения максимума значения тока через светодиоды требуется выполнение равенства $t_{\text{п}} \geq t_{\text{разр}}$, то из (2.16) можно получить выражение, определяющее требуемую индуктивность вторичных обмоток w_2 трансформаторов:

$$L_2 = m t_{\text{п}} \left(R_{\text{св}(0)} - \frac{U_{\text{св}(0)}}{I_{\text{св max}}} \right). \quad (2.17)$$

Выражение (2.17) дает возможность найти величину L_2 из нормированного значения величины максимально допустимой амплитуды импульса тока через светодиоды $I_{\text{св max}}$. Если при разработке определяющей является амплитуда тока коллектора транзистора VT , то с учетом соответствующих формул приведения трансформатора формула (2.17) примет вид

$$L_1 = m t_{\text{п}} n^2 \left(R_{\text{св}(0)} - \frac{U_{\text{св}(0)} w_2}{I_{\text{к max}} w_1} \right). \quad (2.18)$$

Рациональность использования рассматриваемого схемного решения определяется двумя противоречивыми факторами. По отношению к простым резистивным схемам светофоров здесь видно очевидное усложнение устройства. С другой стороны, исключение активных резисторов снижает потребляемую устройством мощность, обуславливая тем самым получение положительного эффекта. При этом масса и объем вводимых трансформаторов могут быть незначительными, если в качестве частоты преобразования тока применять высокую частоту. Например, повышение частоты преобразования до 200–300 кГц, то есть увеличение частоты следования импульсов, генерируемых генератором G , диаметр ферритовых тороидальных колец трансформаторов составляет 4–6 мм. В случае применения быстродействующих МОП-транзисторов можно повысить частоту преобразования.

Существенным фактором эффективности рассматриваемой схемы для практического применения светофора является следующее обстоятельство. Последовательное включение трансформаторов позволяет увеличить напряжение питания E и перейти на питание схемы от постоянного повышенного напряжения, что дает возможность радикально увеличить максимально допустимую длину сигнального кабеля от поста управления до светофора, например, до нескольких километров и более. При этом за счет использования постоянного напряжения E исключается негативное влияние емкостей между жилами сигнального кабеля. В частности, можно повысить постоянное напряжение питания E до нескольких сотен вольт (например, 220 В), что позволит увеличивать длину сигнального кабеля до единиц-десятков километров.

Снизить габариты и повысить надежность работы рассмотренной схемы можно, если представить конструкцию ее модуля, изготовленного методами проектирования гибридных интегральных микросхем силовой электроники.

В некоторых случаях для уменьшения материалоемкости схемы светофора могут применяться устройства, в которых вместо трансформатора используются катушки индуктивности (рис. 2.7) [61]. Эта схема очень проста, но есть недостаток: отсутствие электрической изоляции цепей между источником питания E и цепями протекания тока через светодиоды.

Необходимость применения электрической изоляции обусловлена тем, что в условиях существования типичного для железнодорожного транспорта значительного уровня мощных

электромагнитных помех нужно исключить возможность протекания переменных, в частности, уравнивающих постоянных и импульсных токов из первичной стороны устройства светофора и окружающей среды, на функционирование СДМ. Это может вызвать выход из строя светодиодов. Из этих соображений применение схемы светофора, представленной на рис. 2.5, предпочтительней, несмотря на некоторое усложнение устройства. Наличие электрической изоляции в этой схеме обеспечивает также выполнение требований безопасности движения, потому что при отказе любого вида в любом из элементов схемы исключено появление ложного разрешающего сигнала.

Схема светофора по рис. 2.5 с точки зрения передачи сигнала управления светофором является электротехническим аналогом схемы питания светофора на переменном напряжении. В обоих видах схем светодиодных светофоров имеется трансформатор, однако схема, приведенная на рис. 2.5, работает на высокой частоте передачи энергии, что обуславливает их меньшую материалоемкость и стоимость.

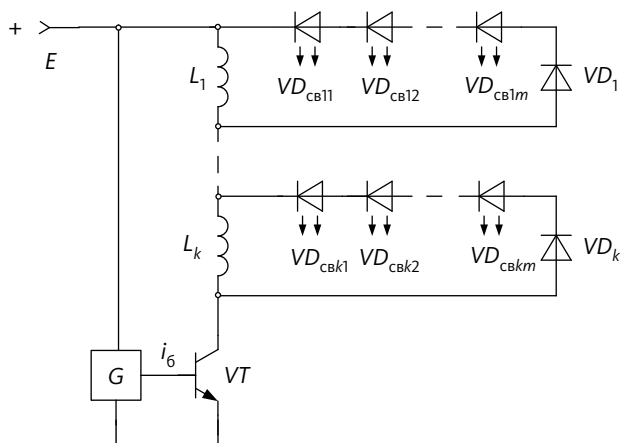


Рис. 2.7. Светодиодный индуктивный светофор с заменой трансформаторов на катушки индуктивности

Как видно из схемы рис. 2.7, принцип действия аналогичен устройству по рис. 2.5. Также аналогичны процессы, происходящие в схемах, за исключением того, что для схемы, приведенной на рис. 2.8, коэффициент трансформации необходимо принимать $n = 1$.

Для класса рассматриваемых индуктивных светодиодных светофоров можно рассмотреть иные схемотехнические решения с реализацией дополнительных функций. Возможны устройства светофоров с контролем излучения светодиодов или с управлением (стабилизацией) светового потока излучения и др.

Например, на рис. 2.8 приведена схема индуктивного светодиодного светофора с параметрическим контролем тока, протекающего через светодиоды в режиме излучения [74].

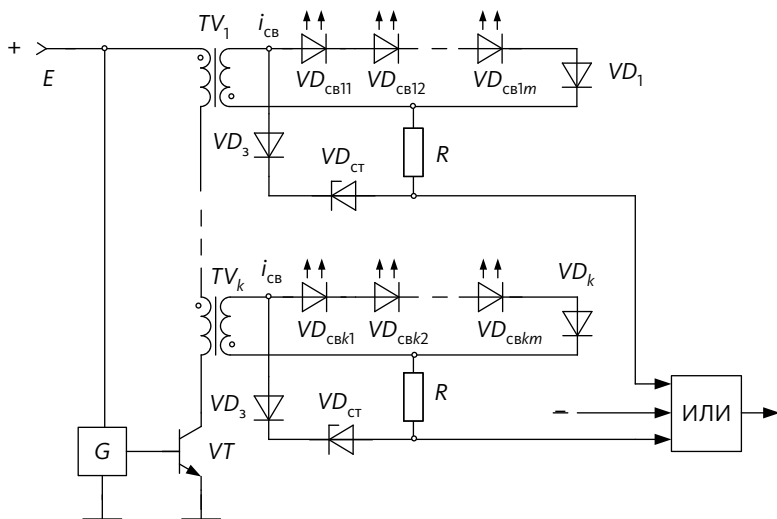


Рис. 2.8. Схема индуктивного светодиодного светофора с непосредственным контролем тока светодиодов

Принцип ее действия заключается в том, что режиме излучения для каждой из исправных цепей последовательно включенных светодиодов выполняется соотношение:

$$\sum_1^m U_{cbi} < U_{CT} + U_{D3} - U_{dm}, \quad (2.19)$$

где U_{cbi} — падение напряжения на каждом из светодиодов одной последовательной цепи схемы; U_{CT} — напряжение стабилизации стабилитрона VD_{CT} ; U_{D3} — падение напряжения на защитном диоде VD_3 ; U_{dm} — падение напряжения на диоде VD_m .

Если в отдельной светодиодной цепи схемы появляется обрыв в одном или в нескольких $p-n$ переходах светодиодов, то ток в этой цепи прекращается. Это приводит к тому, что на этапе выключенного состояния транзистора VT , когда индуктивность вторичной обмотки должна разряжаться на светодиоды, напряжение соответствующего трансформатора резко увеличивается, что включает стабилитрон $VD_{ст}$. Следовательно, условие (2.19) меняет знак неравенства на обратный. На резисторе R появляется единичный уровень напряжения, который поступает на соответствующий вход логического элемента ИЛИ. В итоге его выходной сигнал передается на соответствующую систему индикации неисправности светофора.

Схема устройства светодиодного индуктивного светофора, в котором осуществляется непосредственный контроль излучения светодиодов при помощи фотодиодов, приведена на рис. 2.9 [75].

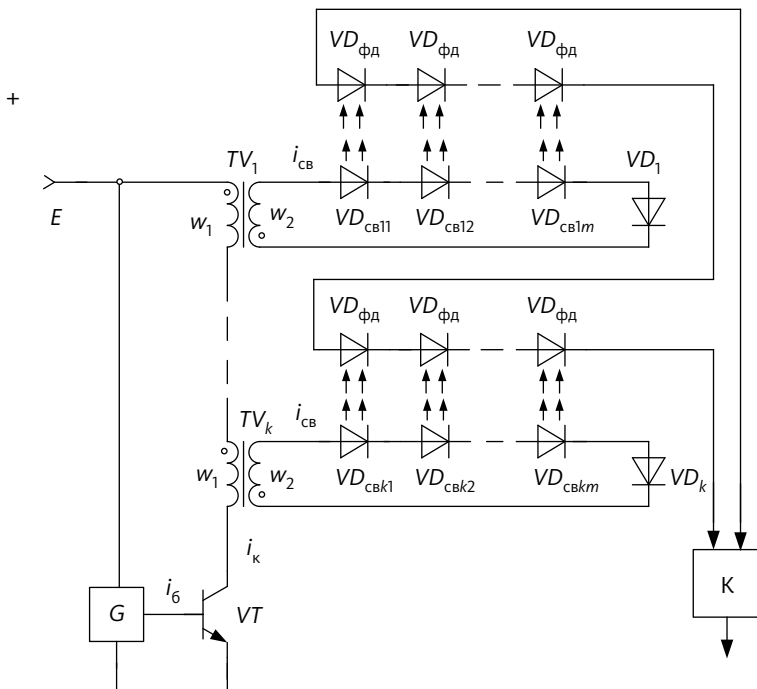


Рис. 2.9. Схема индуктивного светодиодного светофора с контролем излучения при помощи светодиодов

При излучении всех светодиодов устройства (рис. 2.9) на входе компаратора К присутствует суммарное напряжение фото-ЭДС всех фотодиодов $VD_{фд}$ схемы. После обрыва в одной из цепей светодиодов это напряжение снизится, что фиксируется компаратором К. Его выходной сигнал о неисправности светодора передается в соответствующую систему сигнализации.

При соответствующей схемной реализации такой контроль излучения можно выполнить и при использовании фоторезисторов вместо фотодиодов.

Недостаток схем с непосредственным контролем излучения (рис. 2.9) — отсутствие требований достоверности результатов диагностики. То есть при возникновении обрыва в цепи фотодиодов или фоторезисторов контроль излучения будет отсутствовать, на выход контрольной схемы поступит сигнал о неисправности светодора, хотя он будет излучать. Это же относится и к возникновению замыкания в цепи фотодиодов или фоторезисторов.

На рис. 2.10 приведена схема регулируемого индуктивного светодиодного светодора.

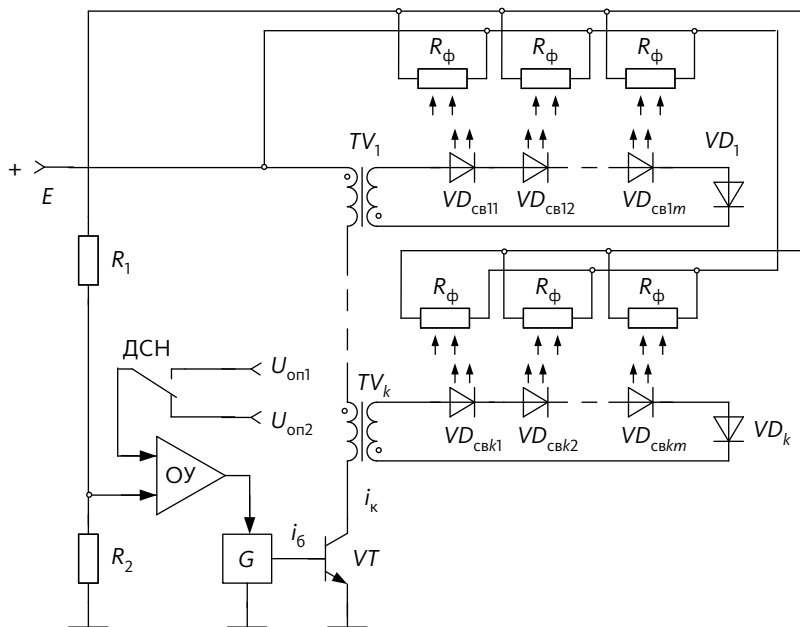


Рис. 2.10. Схема регулируемого индуктивного светодиодного светодора

Здесь при помощи схемы сравнения, которая реализована на операционном усилителе ОУ, определяется сопротивление параллельно включенных фоторезисторов R_{ϕ} . Их величина зависит от интенсивности излучения светодиодов схемы. Параллельное включение фоторезисторов позволяет осуществить интегральный контроль излучения всей СДМ светофора. Выходной сигнал ОУ управляет частотой работы генератора импульсов G . Контакт реле двойного снижения напряжения ДСН переводит работу светофора на дневной или ночной режим работы, переключая опорное напряжение ОУ с величины U_{on1} на U_{on2} .

Регулируемый светофор (рис. 2.10) может быть преобразован в устройство с использованием для контроля фотодиодов (рис. 2.11).

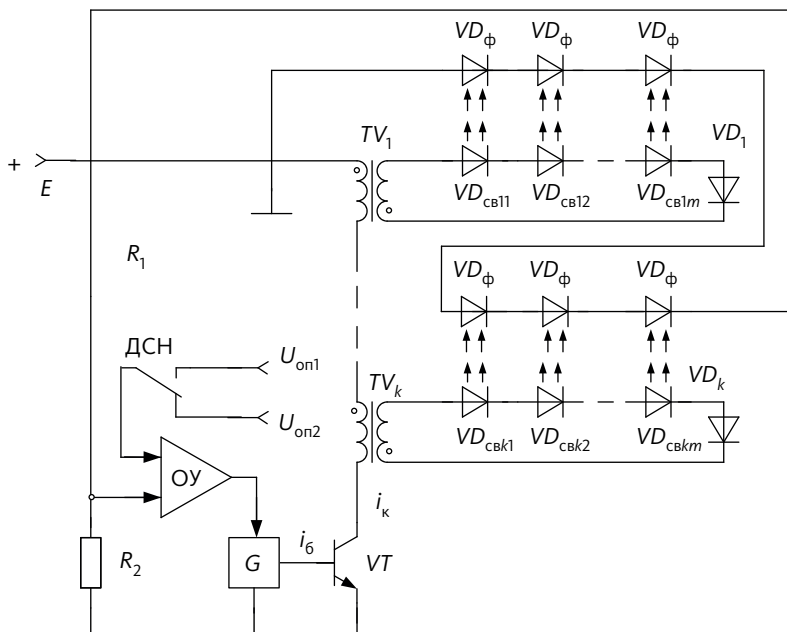


Рис. 2.11. Схема регулируемого светофора с применением фотодиодов

В схемах с непосредственным контролем излучения определенную трудность представляет конструктивное расположение фотодиодов (или фоторезисторов) относительно контролируемых светодиодов. В [47] предложена конструкция контролируемой свето-

диодной ячейки, в которой эти трудности преодолены. Чертежи взаимного расположения светодиодов и фотодиодов в ячейке приведены на рис. 2.12 (разрез) и 2.13 (вид сверху).

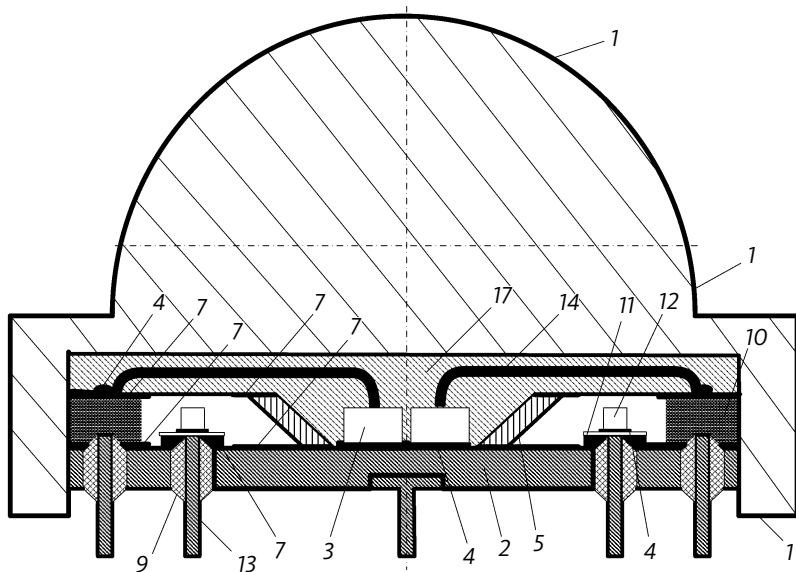


Рис. 2.12. Чертеж (разрез) светодиодной ячейки

На рис. 2.12 приведен чертеж светодиодной ячейки, а на рис. 2.13 — вид сверху без крышки; верхнее диэлектрическое кольцо системы фильтров для наглядности показано прозрачным. Здесь обозначения соответствуют: 1 — крышка устройства, 2 — металлическая или металлизированная подложка, 3 — один из светоизлучающих кристаллов, 4 — токопроводящий клей, 5 — система оптических фильтров, причем все фильтры с обеих сторон объединены непересекающимися между собой диэлектрическими вставками — 6 (рис. 2.13), 7 — токонепроводящий клей, 8 — верхнее кольцо системы фильтров, с отверстиями по окружности (рис. 2.13), 9 — изолятор, 10 — металлический или металлизированный контакт, выполненный в форме сегмента кольца, 11 — контактная пластина, 12 — фотоприемник (фотодиод или фоторезистор), 13, 14 — электрические соединительные выводы, 15 — проводник, 16 — полусферическая линза, 17 — полимерный герметизирующий компаунд.

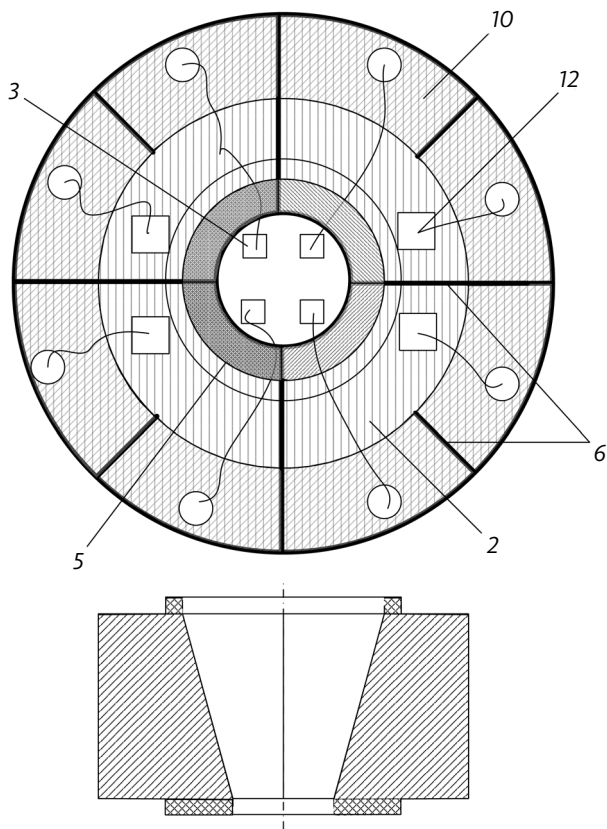


Рис. 2.13. Чертеж (вид сверху) светодиодной ячейки

Устройство работает следующим образом. При подаче на выводы *14* электрического напряжения через контакт, выполненный в форме сегмента кольца *10*, через проводник *15* и один из излучающих кристаллов *3* начинает протекать электрический ток, и кристалл начинает излучать. Одновременно при подаче на выводы *13* электрического напряжения через один из фотоприемников *12*, через проводник *15*, соединенный с контактом, выполненным в форме сегмента кольца *10*, через вывод *14* также начинает протекать электрический ток. Излучение с боковых граней поверхности кристалла *3* проходит в полной мере через ту из секций системы оптических фильтров *5*, которая имеет максимальный коэффициент пропуска-

ния для доминантной длины волны, испускаемой данным кристаллом, попадает на фотоприемник 12, сопротивление которого начинает изменяться, что приводит к изменению величины электрического тока в указанной цепи. Часть отраженного потока излучения от усеченной конической поверхности, образованной системой оптических фильтров 5, а также излучение с верхней грани кристалла 3 через слой полимерного герметизирующего компаунда 17 фокусируется полусферической линзой 16.

Расположенное на системе фильтров 5 сверху диэлектрическое кольцо, выполненное в форме круга с внутренним диаметром отверстия по центру, равному диаметру окружности большего торца конуса 8, с внешним диаметром, равным диаметру подложки, изолирует фотоприемники 12 от фонового излучения сверху. Диэлектрическое кольцо 8 имеет отверстия по окружности для электрического соединения электродов фотоприемных 12 и светоизлучающих устройств 3 с контактами, выполненными в форме сегментов кольца 10. Электрические металлические или металлизированные контакты, выполненные в форме сегмента кольца 10, электрически связанные со своим присоединительными выводами 14, к которым подводится напряжение питания либо от светоизлучающего кристалла 3, либо от фотоприемного устройства 12, дополнительно служат для исключения влияния фоновой засветки бокового излучения. Количество сегментов 10 равно количеству светоизлучающих кристаллов и фотоприемников, причем все сегменты кольца с обеих сторон конструктивно объединены между собой диэлектрическими вставками 6 для достижения электрической изоляции между ними.

Система оптических фильтров 5 может быть реализована с одинаковыми или различными спектральными характеристиками пропускания в зависимости от излучаемых кристаллами длин волн. Для концентрации потока излучения система оптических фильтров конструктивно выполнена в форме полого перевернутого усеченного конуса или иного концентратора. Для фиксации на подложке 2 система фильтров имеет на торце меньшего диаметра нижнее диэлектрическое кольцо с внутренним диаметром, равным диаметру окружности соответствующего торца конуса, с внешним диаметром, превышающим сумму диагоналей всех установленных кристаллов не более чем в два раза. Дополнительно между нижним диэлектрическим кольцом системы фильтров 5 и подложкой 2 нанесен слой токонепроводящего клея 7. Все фильтры с обеих сторон объединены непересекающимися между собой диэлектрическими вставками 6,

длина которых в случае, если количество светоизлучающих и фотоприемных устройств совокупно превышает два, достигает до края контакта, выполненного в форме сегмента кольца 10. Если предлагаемое устройство имеет один светоизлучающий кристалл и один фотоприемник, диэлектрическая вставка не используется.

Фильтры системы 5 могут быть либо твердотельные, например, стеклянные, полимерные, либо жидкостные, либо выполненные из фильтров-жалюзи, либо их комбинации. Угол ориентации створок любого цвета жалюзи составляет 0–90 град относительно боковой поверхности кристалла, а отношение размеров створок и угла обзора составляет от 7:1 до 2:1, при этом длины створок могут быть не равны между собой.

Створки могут быть выполнены из твердотельных материалов любого цвета. Высота системы фильтров 5 не превышает десяти толщин светоизлучающих кристаллов.

Изменением габаритных параметров системы фильтров или длиной створок можно регулировать пространственное и энергетическое распределение излучения от кристаллов.

Объем между верхним диэлектрическим кольцом 8 системы фильтров 5 и подложкой 2 может быть залит герметизирующим компаундом 17, что обеспечит снижение потерь мощности излучения, влагозащищенность фотоприемников.

Толщина металлической подложки не превышает 50 толщин кристаллов. С внешней стороны основания подложки может быть нанесен слой изолирующего покрытия.

В предлагаемом устройстве могут быть использованы излучатели с красным, оранжевым, желтым, зеленым, голубым цветами свечения или их комбинации. Увеличение мощности либо интенсивности излучения достигается установкой нескольких кристаллов излучателя одного цвета свечения одновременно с внесением соответствующего количества присоединительных выводов.

Для получения различной интенсивности свечения через кристаллы пропускают постоянный прямой ток или импульсный прямой ток заданной величины требуемой длительности, скважности или амплитуды.

Наличие полимерного герметизирующего компаунда 17 обеспечивает снижение потерь мощности излучения, влагозащищенность излучателей 3 и фотоприемников 12, дополнительно фиксирует систему оптических фильтров 5, места присоединения проводника к выводу 4.

Требуемая насыщенность цвета может быть достигнута окраской крышки устройства соответствующим цветом или введением диспергатора.

Каждый из фотоприемников расположен на контактной пластине 11 присоединительных выводов 13. На пластину нанесен слой токопроводящего клея 4, повышающий надежность соединения.

Следовательно, часть светового потока, излучаемого светоизлучающими кристаллами, проходит через систему фильтров и, попадая на фотоприемник, вызывает изменение его сопротивления (или фото-ЭДС), что изменяет величину тока в соответствующей электрической цепи.

Так как в предложенном устройстве фотоприемники и кристаллы расположены на одной подложке, то средняя температура их кристаллов будет иметь одинаковую постоянную составляющую температурного поля, что позволит с большей точностью регулировать излучение СДМ светофора. Однако для работоспособности регулируемого светодиодного устройства в широком диапазоне температур (воздействие окружающей среды) необходимо вводить в его схему термозависимые элементы и, очевидно, проводить новые исследования. Схемотехнически это может быть реализовано, например, введением цепи термической обратной связи параллельно цепи оптической обратной связи.

Схемы трансформаторного управления светодиодными матрицами позволяют реализовать сложные схемы визуального вывода информации, функциональное назначение которых аналогично конденсаторному устройству управления СДМ (рис. 2.4).

Схема трансформаторного управления светодиодного устройства вывода информации для матрицы вида 3X3 приведена на рис. 2.14 [76].

Здесь накопление токов в индуктивностях первичных обмоток трансформаторов $TV1$, $TV2$ и $TV3$ происходит в соответствии с включенным состоянием транзисторов VT_{X1} , VT_{X2} или VT_{X3} соответственно. Передача энергии, накопленной в индуктивности намагничивания этих трансформаторов, осуществляется при включении транзисторов VT_{Y1} , VT_{Y2} или VT_{Y3} .

Процессы, происходящие в этой схеме, в полной мере описываются уравнениями (2.8)–(2.18) и временными диаграммами рис. 2.6.

Приведенные в данном разделе принципиально новые энергетически эффективные схемы светодиодных светофоров показывают возможности управления используемых СДМ при помощи реактивных элементов — конденсаторов, катушек индуктивности или

трансформаторов. При этом существует определенная специфика их разработки и применения и, кроме того, здесь есть некоторое усложнение схем управления светодиодными светофорами, которое иногда вполне оправдано.

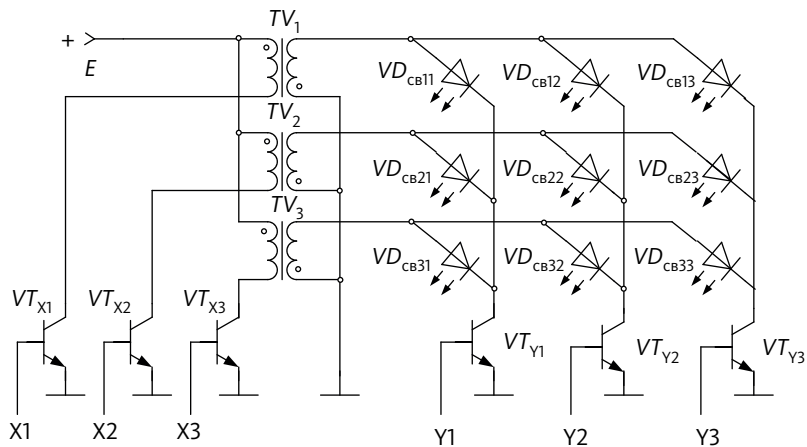


Рис. 2.14. Схема трансформаторного управления СДМ вида 3Х3

Устройства управления светодиодными светофорами не исчерпывают всех возможности использования реактивных элементов для преобразования электрической энергии и их использования в других электронных и электротехнических устройствах. В частности, эффективно применение, например, конденсаторных схем в устройствах заряда аккумуляторов и др.

Раздел 3

Повышение надежности работы светодиодных светофоров

Как показано в разделе 1, наиболее распространенной схемой управления существующими светодиодным светофором при питании от постоянного напряжения является устройство, изображенное на рис. 1.2, б. Применение подобного смешанного (параллельного и последовательного) соединения светодиодов в СДМ обусловлено следующими факторами [77].

С точки зрения уменьшения количества токозадающих элементов (активные резисторы, микроэлектронные драйверы или др.), наиболее выгодна схема представленная на рис. 1.2, а, схема, представленная на рис. 1.2, в, наименее выгодна.

Использование лишь одной группы последовательно соединенных светодиодов (см. схему рис. 1.2, в) позволяет не только упростить схему управления светофором, но и дает возможность перейти на повышенное напряжение питания E , до 150–250 В, так как при этом суммируются все падения напряжения на светодиодах СДМ. Применение увеличенного постоянного напряжения питания позволяет существенно увеличить максимально допускаемую длину сигнальных кабелей, в частности, на станциях. При этом исключается негативное влияние паразитных емкостей между жилами кабеля, что имеет место при питании светофора переменным напряжением.

Однако СДМ с последовательным соединением светодиодов определяет невысокую надежность функционирования СДМ, потому что обрыв в любом из светодиодов в последовательной цепи прекращает излучение всех светодиодов СДМ светофора.

Этот часто встречающийся вид неисправности светодиода является наиболее типичным, определяет принцип его работы. Появление короткого замыкания в любом светодиоде приводит к отказу

лишь одного светодиода в СДМ, что во многих случаях вполне допустимо по требованиям требуемой и нормированной яркости излучения. Повышение надежности должно рассматриваться с позиций возможности обрыва в цепи любого светодиода и обеспечения при этом нормального режима функционирования светофора.

Представляет интерес применение специальных схем светодиодных светофоров, в которых при обрыве любого или любых светодиодов светофор сохраняет свою работоспособность.

На рис. 3.1 приведена схема резервированного светофора, в которой рассматриваемый вид отказа светодиодов не приводит к потере работоспособности светофора, то есть к прекращению излучения соответствующего сигнала [2, 78].

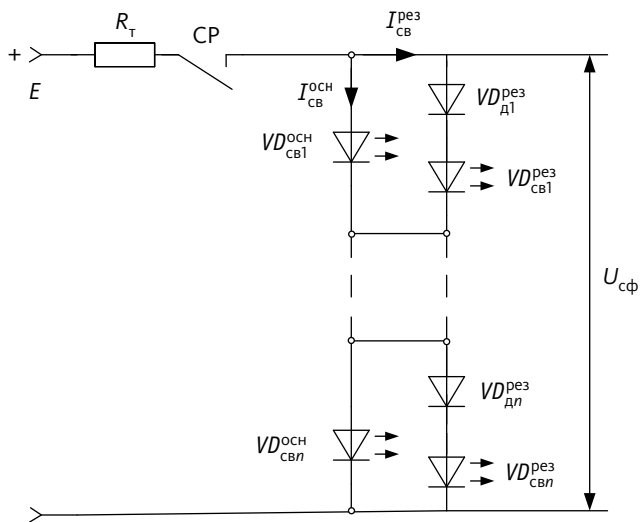


Рис. 3.1. Схема резервированного светодиодного светофора

Здесь основные светодиоды — $VD_{св1}^{очн}$, $VD_{св2}^{очн} \dots VD_{свn}^{очн}$ — излучают в нормальном режиме работы при отсутствии обрывов в любом из них. Светодиоды $VD_{св2}^{рез}$, $VD_{св3}^{рез} \dots VD_{свn}^{рез}$ — резервные и включенные последовательно с ними вспомогательные диоды $VD_{д1}^{рез}$, $VD_{д2}^{рез} \dots VD_{дn}^{рез}$. При появлении обрыва в любом из основных светодиодов начинает излучать соответствующий параллельно ему включенный резервный светодиод. Таким образом, в анализируемой схеме светофора применена одна цепь, состоящая из последовательного включения

основных и вторая цепь резервных светодиодов. С одной стороны, это упрощает схему управления светодиодами за счет применения лишь одного токозадающего элемента R_T , а с другой, позволяет повысить напряжение питания СДМ светофора.

Выполним анализ функционирования рассматриваемой схемы, используя известные методы графоаналитического исследования, применяемые в электронных и электротехнических схемах. Определим условия ее работоспособности в состоянии, когда любой из основных светодиодов $VD_{св.i}^{осн}$ излучает, а соответствующий ему резервный светодиод $VD_{св.i}^{рез}$ не излучает и равен нулю при всех воздействиях дестабилизирующих факторов, которые могут привести к нарушению функционирования светофора. Очевидно, что в другом состоянии схемы, когда в $p-n$ переходе основного светодиода $VD_{св.i}^{осн}$ произойдет обрыв, то должен включиться в режим излучения соответствующий резервный светодиод $VD_{св.i}^{рез}$. При анализе учтем сопротивление кабеля $R_{каб}$, соединяющего светофор с постом ЭЦ.

Как и ранее, примем, что ВАХ $p-n$ основных и резервных светодиодов, а также вспомогательных диодов представляются составной функцией, состоящей из двух прямых:

$$U_d = \begin{cases} U_{д0} (I_{св} = 0) \text{ при } U_d \leq U_{д0}; \\ U_{д0} + I_{св} R_{дф} (I_{св} > 0) \text{ при } U_d \geq U_{д0}, \end{cases} \quad (3.1)$$

где $U_{д0}$ — пороговое напряжение включения $p-n$ перехода, когда при $U_d < U_{д0}$ ток проходит через $p-n$ переход, $U_d = 0$; $R_{дф}$ — дифференциальное сопротивление $p-n$ перехода.

Кроме того, допустим, что при включенном состоянии контакта сигнального реле СР ток, создаваемый источником тока, не зависит от параметров светодиодов, входящих в схему светофора, а определяется характеристиками примененной схемы создания источника тока с источником напряжения E , то есть $I_{св} = \text{const}$.

Для обеспечения функционирования схемы резервированного светофора в нормальном режиме работы, когда в основных светодиодах отсутствуют обрывы, для каждой из параллельных цепочек $VD_{св.i}^{осн} \parallel (VD_{д0i}^{рез} + VD_{св.i}^{рез})$ необходимо выполнение следующего неравенства, выражающего требуемое соотношение падений напряжений на основной цепи светодиода и соответствующего напряжения на цепи резервного:

$$\frac{(U_{д.0}^{рез} + U_{св.0}^{рез} + I_{св} R_{дф}^{рез} + I_{св} R_{дф}^{рез})}{(U_{св.0}^{осн} + I_{св} R_{дф}^{осн})} > 1, \quad (3.2)$$

где $U_{св.0}^{осн}$, $U_{св.0}^{рез}$ и $U_{д.0}^{рез}$ — пороговое напряжение включения каждого из основных $VD_{св.1}^{осн}$, $VD_{св.2}^{осн}, \dots, VD_{св.и}^{осн}$ и $VD_{св.1}^{рез}$, $VD_{св.2}^{рез}, \dots, VD_{св.и}^{рез}$ резервных светодиодов, а также вспомогательных диодов $VD_{д1}^{рез}$, $VD_{д2}^{рез} \dots VD_{дл}^{рез}$; $R_{дф}^{осн}$, $R_{дф}^{всп}$ и $R_{дф}^{рез}$ — дифференциальное сопротивление каждого из основных светодиодов, вспомогательных диодов и резервных светодиодов.

Очевидно, что функционально критерием работоспособности схемы является обязательное отсутствие излучения любого из резервных светодиодов $VD_{св.i}^{рез}$ при исправности основных светодиодов, то есть при наличии излучения соответствующих им основных светодиодов $VD_{св.i}^{осн}$.

На рис. 3.2, а, б приведены ВАХ, иллюстрирующие пояснение двух различных режимов работы рассматриваемого устройства.

Первый график (рис. 3.2, а) определяет нормальное функционирование устройства при различных значениях параметров $ВАХ_{св}^{осн}$ и $ВАХ_{св}^{рез}$. Здесь обеспечивается выключенное состояние, то есть отсутствие излучения соответствующего резервного светодиода при излучении основного светодиода.

Второй график (рисунок 3.2, б) имеет ограничение на область 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.

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

$$I_{св}^* = \begin{cases} \frac{U_{св}^{осн}}{R_{дф}^{осн}}, \\ \frac{U_{д}^{рез}}{R_{дф}^{всп}} + \frac{U_{св}^{рез}}{R_{дф}^{рез}}. \end{cases} \quad (3.3)$$

Раздел 3. Повышение надежности работы светодиодных светофоров

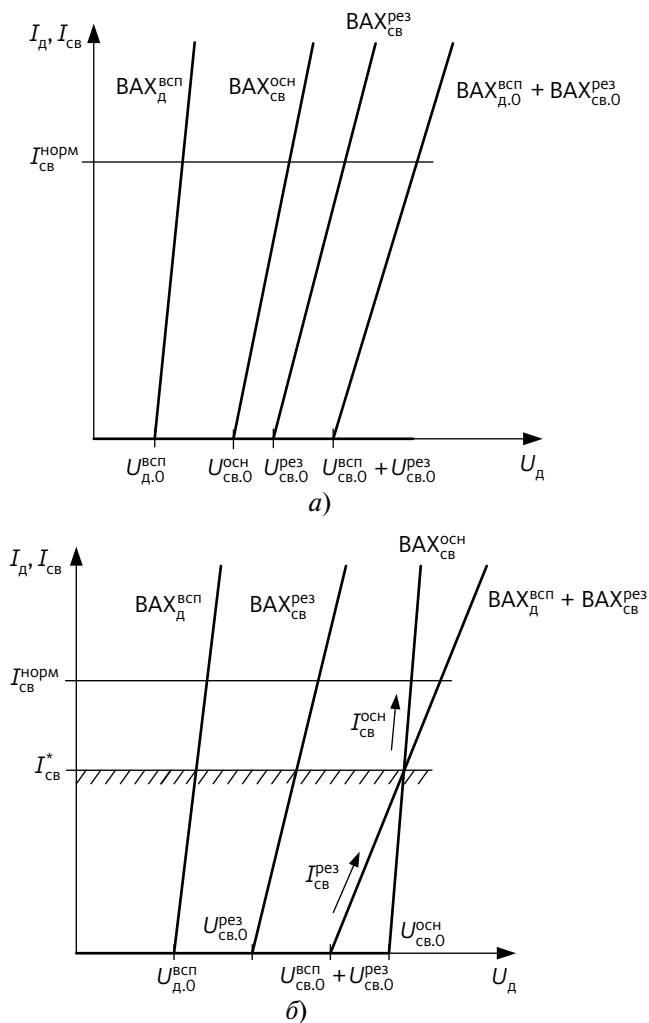


Рис. 3.2. ВАХ полупроводниковых приборов при независимости характеристик (а) и связанных между собой параметрами напряжений (б)

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 работоспособность схемы светофора может быть обеспечена. Пересечение этих

функций определяет необходимость численного определения координаты точки I_{CB}^* . Это может быть выполнено графическим методом — сравнением соответствующего геометрического сложения нормативных ВАХ используемых полупроводниковых приборов $VD_{\text{св}i}^{\text{осн}}$, $VD_{\text{св}i}^{\text{рез}}$, $VD_{\text{св}i}^{\text{всп}}$, что даст значение требуемого тока в точке I_{CB}^* .

Однако эта простая процедура сравнения параметров не может обеспечить гарантированной работоспособности светофора в диапазоне температур окружающей среды и при реально существующем технологическом разбросе параметров полупроводниковых приборов.

Изменение температуры окружающей среды влияет на функционирование светофора. Падение напряжения на p - n переходе в области прямой проводимости определяется температурным коэффициентом напряжения:

$$\text{ТКН} = -\frac{\Delta U}{\Delta T} \left[\frac{\text{мВ}}{^\circ\text{C}} \right], \quad (3.4)$$

где ΔU — изменение падения напряжения на p - n переходе светодиода при изменении его температуры на величину ΔT .

Изменение падения напряжения на p - n переходе:

$$U_{\text{д}}(T) = U_{\text{д}}^{+20^\circ\text{C}} - \Delta T \cdot \text{ТКН}, \quad (3.5)$$

где $U_{\text{д}}^{+20^\circ\text{C}}$ — падение напряжения на переходе при температуре $T = +20^\circ\text{C}$ (нормальные условия).

Так как практически значение ТКН имеет отрицательный знак, то, как видно из выражения (3.5), при уменьшении температуры напряжение $U_{\text{д}}(T)$ будет увеличиваться.

Влияние ТКН на функционирование анализируемого светофора будет наиболее значимым при отрицательной температуре окружающей среды или корпуса полупроводникового прибора, так как уменьшение температуры увеличивает прямое падение напряжения на p - n переходе. Температурный режим основных, резервных и вспомогательных светодиодов различен. При наличии излучения основного светодиода температура его перехода будет больше, чем у резервного светодиода и вспомогательного диода, что обуславливает уменьшение падения напряжения на его p - n переходе основного светодиода.

На рис. 3.3 приведены графики, показывающие возможные изменения положения VAX_{CB}^{OCH} и $(VAX_{д.0}^{всп} + VAX_{CB.0}^{pez})$ при изменении температуры $p-n$ переходов. В частности, если рассмотреть повышение температуры $p-n$ перехода светодиода $VD_{CB.i}^{OCH}$, то его вольт-амперная характеристика сдвинется влево и примет вид графика $(VAX_{CB}^{OCH})_{+T}$.

Если температура перехода вспомогательных диодов и светодиодов $(VAX_{д.0}^{всп} + VAX_{CB.0}^{pez})$ уменьшится, что соответствует более низкой температуре их перехода по отношению к светодиоду $VD_{CB.i}^{OCH}$, то их вольт-амперная сдвигается вправо и принимает вид $(VAX_{д.0}^{всп} + VAX_{CB.0}^{pez})_{-T}$.

Графики (рис. 3.3) показывают, что при подобных температурных воздействиях точка I_{CB}^* , соответствующая критическому состоянию функционирования схемы светофора, перемещается в область более низких значений тока, увеличивая разность $\Delta I_{CB} = I_{CB} - I_{CB}^*$.

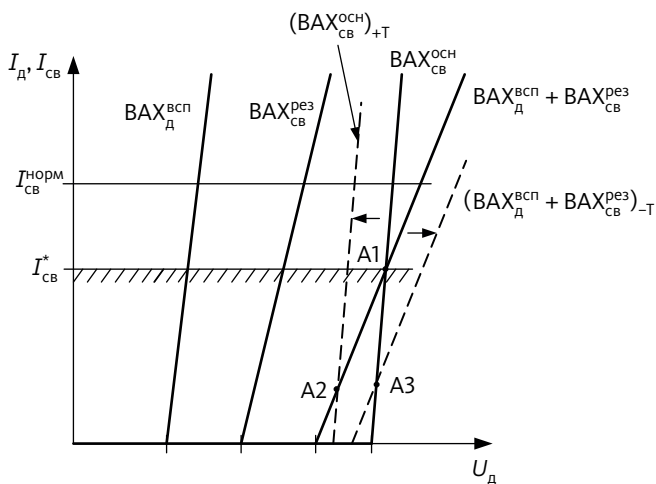


Рис. 3.3. Температурные изменения ВАХ полупроводниковых приборов

Это иллюстрируется перемещением исходной критической точки $A1$ в положения $A3$ и $A2$ соответственно. Следовательно, различие в температурных параметрах ВАХ светодиодов и вспомогательного диода не снижает надежности работы схемы светофора.

Однако это относится к статическому режиму работы светофора, когда тепловые режимы полупроводниковых приборов установились. Обрыв в одном из основных светодиодов приводит к включению

соответствующего резервного светодиода. Если температура окружающей среды отрицательна, то это обуславливает большие значения суммарного падения напряжения на цепочке ($VD_{д0i}^{всп} + VD_{св.i}^{рез}$) диодов. 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 этом случае «холодной» является резервная цепочка ($VD_{д0i}^{всп} + VD_{св.i}^{рез}$), то при отрицательных температурах и соответствующем увеличении падения напряжения негативных последствий не последует, тем более, что после выхода этих полупроводниковых приборов на режим излучения остаются в силе выражения (2.13), (2.14) и (2.16) и сделанные по ним выводы.

Другим фактором, который определяет надежность функционирования схемы, является технологический разброс значений прямого падения напряжения полупроводниковых приборов и дифференциального сопротивления $p-n$ переходов. Учет этих факторов выполняется заменой в уравнениях (2.13) и (2.14) аргументов $U_{св.0}$, $U_{д0}$ и $R_{дф}$ на соответствующие предельные величины, приведенные в нормативных документах на используемые в схеме полупроводниковые приборы.

Обобщенное уравнение для определения работоспособности анализируемой схемы может быть получено введением функций с учетом относительных параметров для любого из диодов и светодиодов схемы:

$$\Delta U_{д0}^{\text{техн}} = \Delta U_{д0} (1 \pm \delta^U), \quad (3.6, a)$$

$$\Delta R_{дф}^{\text{техн}} = \Delta R_{дф} (1 \pm \delta^R), \quad (3.6, б)$$

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

на светодиоде или диоде вследствие разброса их технологических параметров и изменения температуры корпуса кристалла; $\Delta U_{д}^{\text{техн}}$ —

абсолютное изменение падения напряжения; $\delta^R = \frac{\Delta R_{дф}^{\text{техн}}}{\Delta R_{дф}}$ — относи-

тельное изменение величины дифференциального сопротивления светодиода или диода вследствие технологического разброса их параметров и изменения температуры $p-n$ перехода; $\Delta R_{дф}^{\text{техн}}$ — абсолютное изменение дифференциального сопротивления.

Подстановка этих функций в (2.13) дает уравнение, полностью определяющее области работоспособности анализируемой схемы при воздействии дестабилизирующих технологических, температурных и других эксплуатационных факторов:

$$\begin{aligned} & \left[\Delta U_{д0}(1 \pm \delta^U) \right]^{всп} + \left[\Delta U_{д0}(1 \pm \delta^U) \right]^{рез} + \\ & + I_{св} \left\{ \left[R_{дф}(1 \pm \delta^R) \right]^{всп} + \left[R_{дф}(1 \pm \delta^R) \right]^{рез} \right\} > \\ & > \left[\Delta U_{д0}(1 \pm \delta^U) \right]^{очн} + I_{св} \left\{ \left[R_{дф}(1 \pm \delta^R) \right]^{очн} \right\}. \end{aligned} \quad (3.7)$$

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

Для схемы со смешанным соединением напряжение на входе светофора определяется:

$$U_{сф}^{смеш} = E_T - I_{св}(R_{каб}m - R_T) + (U_{св.0} + I_{св}R_{дф})n. \quad (3.8)$$

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 $VD_{св.i}^{очн}$.

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

$$\begin{aligned} U_{сф}^{рез} = E_T - I_{св}(R_{каб} - R_T) + (U_{св.0}^{очн} + I_{св}R_{дф}^{очн})(n-l) + \\ + (U_{д.0}^{всп} + U_{св.0}^{рез} + I_{св}R_{дф}^{всп} + I_{св}R_{дф}^{рез})L. \end{aligned} \quad (3.9)$$

При практическом использовании результатов проведенного графоаналитического анализа необходимо учитывать, что светодиоды с различной длиной волны излучения имеют различные значения напряжения $U_{д0}$, отличающиеся в 1,5–2,5 раза. Это потребует отдельного расчета для каждого из показаний светофора, если длина волны их излучения различна.

Выражение (3.9) справедливо также для схемы, приведенной на рис. 3.11. Очевидно, что $U_{сф}^{рез} > U_{сф}^{смеш}$. Следовательно, при возникновении переключения отказавшего основного светодиода на резервный

происходит уменьшение тока через соответствующую цепь светодиодов. Причем увеличение количества включенных резервных светодиодов вызовет увеличение напряжения $U_{\text{сф}}^{\text{рез}}$. 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 частичного отказа СДМ, который может использоваться электромехаником СЦБ при обходе участка или машинистом приближающегося поезда.

Если необходима высокая стабильность тока через светодиоды СДМ, то применяют не активные резисторы, а микроэлектронные драйверы, обеспечивающие высокую стабильность тока при всех условиях эксплуатации и в широких пределах изменения параметров полупроводниковых элементов схемы.

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

$$\delta_U = \frac{U_{\text{сф}}^{\text{рез}}}{U_{\text{сф}}^{\text{смеш}}}, \quad (3.10)$$

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

Для надежного функционирования светофоров требуется, чтобы при использовании различных длин кабеля $l_{\text{каб}}$ напряжение $U_{\text{сф}}$ не выходило за нормированные значения, в пределах которых обеспечивается заданная яркость излучения светодиодов. Величина $l_{\text{каб}}$ для проходных или переездных светофоров со смешанным соединением светодиодов составляет несколько десятков метров, в то время как, например, у входных и выходных станционных светофоров она может составлять несколько километров. Для таких больших длин кабеля применение параллельно включенных жил кабеля становится экономически нецелесообразным и приходится применять специальные структурные схемы организации управления светофорами в горловинах станций. В частности, традиционно питание светодиодов высоким напряжением переменного тока через сигнальный трансформатор и соответствующий выпрямитель. Однако при этом возникает проблема с возможным появлением эффекта засветки ненадлежащего показания светофора из-за влияния емкостей между различными парами жил в одном сигнальном кабеле. Очевидно, что применение высокого постоянного напряжения

снимает эту проблему и одновременно дает возможность исключить из состава аппаратуры материалоемкие трансформаторы и выпрямители.

Сопротивление жил кабеля, соединяющего светофор с его схемой управления, равно: $R_{\text{каб}} = 2 \frac{L_{\text{каб}} \rho}{l}$, где ρ — удельное сопротивление одной жилы кабеля [Ом/км]; l — количество параллельных жил кабеля (с учетом прямой и обратной жил), требующееся для обеспечения достаточно малого падения напряжения на жилах кабеля. Тогда падение напряжения на кабеле для схем светофоров по рис. 3.1 при равной для них длине кабеля $l_{\text{каб}}$ и количестве параллельно включенных жил l определится выражениями

$$\Delta U_{\text{каб}}^{\text{рез}} = 2I_{\text{св}} \frac{L_{\text{каб}} \rho}{l}, \quad (3.11, a)$$

$$\Delta U_{\text{каб}}^{\text{смеш}} = 2mI_{\text{св}} \frac{L_{\text{каб}} \rho}{l}. \quad (3.11, б)$$

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

$$L_{\text{каб}} = \frac{\Delta U_{\text{каб}}^{\text{рез}}}{2I_{\text{св}} \rho}, \quad (3.12, a)$$

$$L_{\text{каб}} = \frac{\Delta U_{\text{каб}}^{\text{смеш}}}{2mI_{\text{св}} \rho}. \quad (3.12, б)$$

На рис. 3.4 приведены рассчитанные по выражению (2.23, б) данные допустимой длины кабеля различных схем светофоров для равных заданных величин падения напряжения $\Delta U_{\text{каб}} = 10$ В, $\rho = 48$ Ом/км (для используемой жилы диаметром $d = 0,7$ мм стандартного кабеля СЦБ), $l = 1$, где график $m = 1$ соответствует схеме резервированного светофора.

Графики, приведенные на рис. 3.4, показывают существенную нелинейность допустимой длины кабеля управления светофором от числа m . Этот же вывод можно сделать и относительно тока через светодиоды $I_{\text{св}}$, а значит, увеличение количества m светодиодов

в последовательной цепи их соединения приводит к возможности увеличения длины кабеля. Однако этот вывод справедлив для равенства $k = mn = \text{const}$, то есть для светофоров с одинаковым суммарным количеством светодиодов в СДМ.

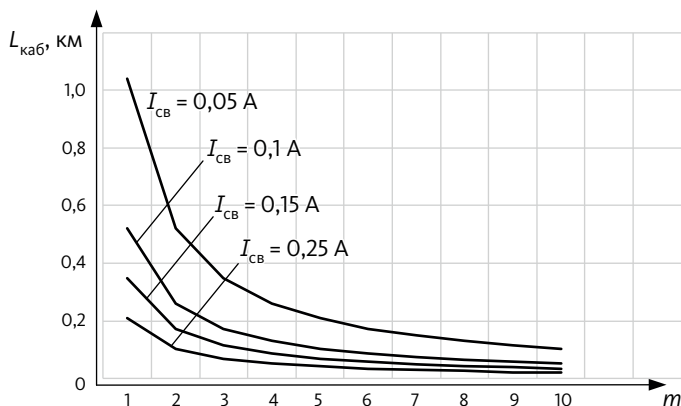


Рис. 3.4. Зависимость длины сигнального кабеля от параметров СДМ

Если принять, что величина напряжения E_T является независимой переменной, которая может задаваться при проектировании схемы светофора, то напряжение на входе схем рассматриваемых светофоров выражается соответствующими уравнениями:

$$U_{\text{сф}}^{\text{рез}} = (U_{\text{св.0}}^{\text{осн}} + I_{\text{св}} R_{\text{дф}}^{\text{осн}})n, \quad (3.13, a)$$

$$U_{\text{сф}}^{\text{смеш}} = I_{\text{св}} R_T + (U_{\text{св.0}} + I_{\text{св}} R_{\text{дф}})n, \quad (3.13, б)$$

где в выражении (3.13, а) принято, что светофор с резервированным включением светодиодов функционирует в нормальном режиме работы, то есть при отсутствии обрыва в цепи любого из основных светодиодов СДМ светофора.

Анализ полученных выражений определяет следующие закономерности функционирования различных типов светодиодных светофоров и предложенные при этом пути улучшения их характеристик.

Основным энергетическим и потенциальным преимуществом рассматриваемой схемы светодиодного светофора (рис. 3.1) явля-

ется переход на питание СДМ от источника постоянного тока, в отличие от схем переменного тока. Это обусловлено тем, что в схеме резервированного светофора существует лишь одна последовательная цепь светодиодов, что увеличивает величину входного напряжения питания E соответствующего показания светофора. Очевидно, что при равной передаваемой в нагрузку (СДМ) мощности ток, который она потребляет, снижается как $I_{\text{св}} = \frac{P_{\text{изл.}}}{E}$.

Анализ выражений (3.5, а) и (3.5, б) показывает, что применение резервированного светофора с $k = 1$ приводит к возможности существенного увеличения длины кабеля от светофора до поста управления, что крайне важно для станционных входных светофоров с центральным управлением, расстояние до которых в горловине станций велико. Это упрощает схемы управления светофорами и снижает их стоимость. В этой части наибольший выигрыш от применения схемы резервированного светофора появляется при больших значениях m по отношению к устройствам со смешанным соединением светодиодов в СДМ. Одновременно с этим применение подобной схемы рационально для перегонных устройств с управлением устройствами СЦБ, в частности, перегонными светофорами со станции или удаленными входными и выходными станционными светофорами. Это же относится и к известным системам ЦАБ и функционально аналогичным устройствам железнодорожной автоматики и телемеханики.

Для обеспечения надежности и долговечности функционирования схемы, приведенной на рис. 3.1, требуется довольно строгое выполнение определенных условий, связанных с параметрами полупроводниковых приборов. В основном это относится к величинам прямого падения напряжения на $p-n$ переходах диодов и светодиодов, входящих в состав СДМ, что видно из выражений (3.2) и (3.7). При этом должна быть учтена величина температурного коэффициента напряжения, что определяется уравнением (3.4). Различные длины излучения (цветности излучения) показаний светофоров обуславливают различные значения падения напряжения на светодиодах, а это вызывает необходимость учета результатов численного расчета характеристик СДМ для показаний светофоров различного цвета излучения.

Очевидно, что после соответствующих расчетов и разработки резервированного светофора (рис. 3.1) получим различные итоговые данные для разных цветов излучения показаний светофора.

В частности, при наличии в схеме светодиода с большей величиной напряжения U_{CB} в схеме появится необходимость введения дополнительного диода, включенного последовательно с соответствующим резервным светодиодом

Схема резервированного светодиодного светофора, работоспособность которого практически не зависит от ВАХ светодиодов, приведена на рис. 3.5 [79].

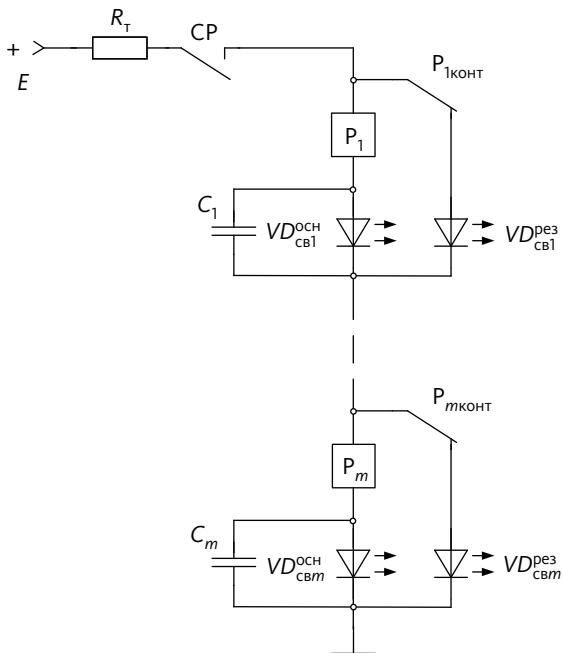


Рис. 3.5. Схема резервированного светодиодного светофора с применением герконовых реле

В схеме рис. 3.5 при существовании тока через основные светодиоды через обмотку контрольного реле P_i протекает ток, что обуславливает размыкание его тылового контакта P_i и отсутствие излучения резервных светодиодов.

Очевидно, что при появлении обрыва в одном или в нескольких из последовательно включенных светодиодов ток в обмотке реле P_i прекращается, а это вызовет появление тока через соответствующий резервный светодиод $VD_{CBi}^{рез}$ и его излучение.

Введение конденсатора C_i необходимо для первоначальной установки схемы в рабочее состояние, что обусловлено следующими процессами работы схемы.

При включении СДМ в режим излучения, то есть при замыкании фронтного контакта сигнального реле СР и при отсутствии в схеме конденсатора C_i , ток начинает протекать через резервный светодиод $VD_{свi}^{рез}$. При этом контрольное реле P_i остается в выключенном состоянии, так как сопротивление основной цепи светодиода больше, чем сопротивление резервной цепи. Конденсатор C_i шунтирует основной светодиод $VD_{свi}^{осн}$, уменьшая сопротивление этой цепи. Этим создается первоначальный импульс тока через обмотку реле P_i , что обуславливает размыкание его тылового контакта. После этого схема переходит в рабочий режим контроля излучения, обеспечивая при необходимости переключение тока с из цепи основного светодиода, в котором появится обрыв $p-n$ перехода, на цепь резервного.

В качестве контрольных реле P_i рационально использование герконов, габариты которых сравнимы с корпусами интегральных микросхем. Конструктивно геркон вводится в схему СДМ в виде нескольких витков проводника, соединяющего светодиоды в последовательную цепь, вокруг корпуса геркона. Это не намного увеличит стоимость и материалоемкость рассматриваемого резервированного светофора.

В настоящее время выпускаются герконовые реле, конструктивно выполненные в виде микроминиатюрного модуля в корпусе интегральной микросхемы. Их практическое применение в устройствах железнодорожной автоматики и телемеханики позволяет реализовать схемы наиболее эффективных светодиодных светофоров по схеме рис. 3.5.

Приведенный в настоящем разделе анализ процессов работы схем резервированных светофоров с питанием от источника постоянного напряжения определяет следующие закономерности их функциональных возможностей, разработки, функционирования и эксплуатации в условиях сети железных дорог:

- широко применяющиеся схемы светодиодных светофоров (см. разд. 1 и 2) обладают невысокой энергетической эффективностью и для схем с питанием от переменного напряжения не выполняют требования безопасности движения поездов, что обусловлено необходимостью применения в них смешанного соединения светодиодов в СДМ, когда обычно имеет место неравенство $k > m$ и используется переменное напряжение;

- длина кабеля управления от светофора до поста управления в стандартных известных схемах светофоров при их питании от постоянного напряжения невелика и не превышает нескольких десятков метров. Причина этого заключается в том, что число m последовательно включаемых светодиодов в СДМ подобных светофоров обычно невелико;
- из-за небольшого количества последовательно включаемых светодиодов в типовых схемах управления светофором долговечность функционирования светодиодных светофоров невелика, так как при появлении обрыва в последовательной цепи светодиодов яркость излучения СДМ снижается (иногда недопустимо);
- выполненный анализ предложенных оригинальных схем резервированных светодиодных светофоров показывает, что они имеют преимущества перед известными, что обуславливает возможность их применения на сети железных дорог;
- применение схемы резервированного светодиодного светофора не только увеличивает надежность его работы, но и создает предпосылки диагностики функционирования СДМ при наличии в ней отказов одного или нескольких (или даже всех) светодиодов путем субъективной оценки яркости его излучения;
- анализируемые в данном разделе схемы резервированных светодиодных светофоров за счет возможности повышения и применения постоянного напряжения питания позволяют осуществлять централизованное управление светофорами при больших длинах сигнальных кабелей, а это позволяет реализовать более простые и экономически более эффективные структуры управления выходными, маневровыми и входными светофорами на станциях или на перегонах.

Выбор той или иной схемы управления светодиодным светофором для практического применения на сети железных дорог может быть сделан после проведенного полного цикла разработки, последующего критического их сравнения и соответствующих испытаний.

Раздел 4

Контроль излучения и работоспособности светодиодных светофоров

Светофоры железнодорожного транспорта могут работать в двух режимах, каждый из которых должен обеспечиваться соответствующими задачами диагностики.

Первый из них — «горячий» режим работы. Здесь задачи диагностики и принятия соответствующих мер для него — исключение появления ненадлежащего показания светофора и контроль наличия требуемого (надлежащего) показания светофора в режиме рабочего излучения СДМ. Очевидно, что контроль излучения ненадлежащего показания светофора наиболее важен, так как при реализации подобного контроля обеспечивается выполнение требований безопасности движения поездов. Невыполнение требований контроля надлежащего показания светофора приводит лишь к задержке поездов и, следовательно, к снижению пропускной способности участков пути или станций.

Задача диагностики второго («холодного») режима работы — определение работоспособности светодиодов СДМ того или иного показания светофора в состоянии отсутствия протекания через них тока, то есть при разомкнутом состоянии соответствующих контактов того или иного сигнального реле.

В силу существенного различия функционирования и методов диагностики светодиодных светофоров при управлении от переменного и постоянного напряжения рассмотрим разработанные схемотехнические решения диагностики для различных видов светофоров отдельно.

4.1. Диагностика функционирования светофора в «горячем» режиме работы для схем с управлением от переменного напряжения

Управление светодиодным светофором от источника переменного напряжения обуславливает два существенных недостатка.

Первый из них заключается в негативном влиянии межжильных емкостей кабелей разных сигнальных пар, что обуславливает ограничение на длину сигнальных кабелей и появление эффекта ложной засветки ненадлежащего показания светофора. Вторым недостатком является влияние шунтирующей емкости C_k между жилами одной сигнальной пары (см. рис. 1.5). Наличие этой емкости препятствует диагностике «горячего» режима и применению стандартных схем включения огневого реле, которое в стандартных схемах реализуется путем последовательного включения этого реле в первичную цепь сигнального трансформатора.

Рассмотрим схемотехнические решения, позволяющие исключить влияние межжильных и шунтирующих емкостей на работоспособность, обеспечить требования безопасности движения поездов и функции диагностики светодиодных светофоров в «горячем» режиме работы.

Чтобы избавиться от этих недостатков, функционально методом исключения негативного влияния вводят дополнительные, в частности кабельные связи от поста электрической централизации до светофора (рис. 4.1) [80].

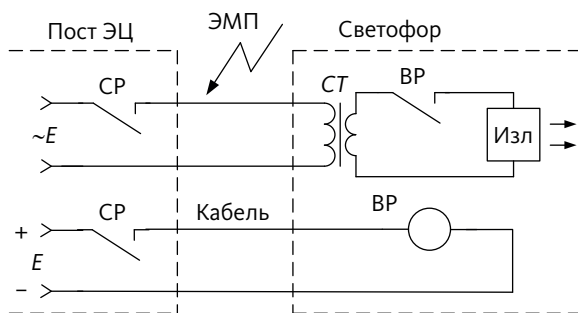


Рис. 4.1. Метод исключения влияния межжильных емкостей сигнального кабеля

На рис. 4.1 условно не показано, что в состав излучателя Изл. входят соответствующий выпрямитель переменного напряжения и элементы, задающие ток через светодиоды СДМ (активные резисторы, микроэлектронные драйверы или др.).

При разомкнутом состоянии контактов сигнального реле СР и при наличии любых помех переменного или импульсного вида и любого уровня (стрелка ЭМП на рис. 4.1), возникающих в сигнальной паре жил кабеля, излучатель Изл не включится. Это обусловлено тем, что электромагнитное реле постоянного напряжения ВР не реагирует на наличие электромагнитного влияния ЭМП переменного тока в сигнальной паре жил кабеля. Его включение, разрешающее появление излучения Изл, происходит от постоянного напряжения E , поступающего от поста электрической централизации.

Таким образом, в схеме рис. 4.1 полностью исключается появление или наличие подсветки даже минимальной интенсивности излучения ненадлежащего показания светодиодного светофора. Проникновение ЭМП в состоянии замкнутого состояния контакта сигнального реле СР в жилы кабеля увеличивает уровень напряжения, что не оказывает влияния на выполнение требований безопасности движения.

Более полная с точки зрения выполнений требований безопасности схема приведена на рис. 4.2, что достигается частичным двухполюсным размыканием цепей источников питания постоянного E переменного $\sim E$ напряжений.

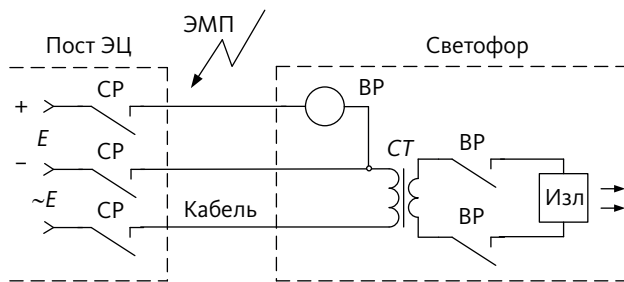


Рис. 4.2. Схема светофора с двухполюсным переключением источников питания

В схеме рис. 4.2 по отношению к схеме рис. 4.1 уменьшено количество дополнительно введенных связей от поста электрической централизации до светофора до трех.

Если в схеме автоматики и телемеханики имеются ограничения по более полной электрической изоляции имеющихся источников постоянного E и переменного $\sim E$ напряжений, то возможно питание реле ВР от напряжения E по отдельной электрической паре сигнального кабеля. Однако это приведет к увеличению количества связей от поста электрической централизации до светофора до четырех.

Принципиально возможна реализация схемы с исключением ложной подсветки сигнала светофора, где управление и контроль осуществляется по одной сигнальной паре кабеля. Это достигается совмещением в одной паре кабеля двух сигналов: основного управляющего переменного напряжения и контрольного напряжения постоянного напряжения (схема рис. 4.3) [81].

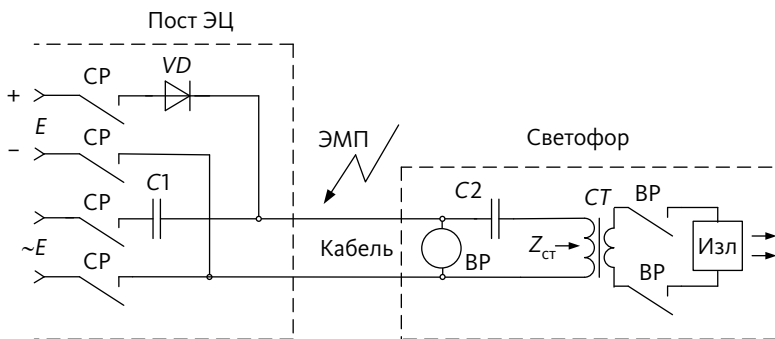


Рис. 4.3. Схема светофора с использованием совмещения передачи сигналов по одной паре жил сигнального кабеля

Для схемы светофора (рис. 4.3) с точки зрения требуемого соотношения между величинами постоянного напряжения E и переменного $\sim E$ условием работоспособности служит неравенство

$$E > \sim E_{\max}, \quad (4.1)$$

где $\sim E_{\max}$ — амплитудное значение функции синусоидального переменного напряжения $\sim E$.

Каждая емкость конденсаторов $C1$ и $C2$ схемы должна иметь величину:

$$C \gg \frac{1}{2\pi f Z_{\text{СТ}}}, \quad (4.2)$$

где $Z_{ст}$ — входное сопротивление сигнального трансформатора СТ со стороны первичной обмотки.

Если ввести зависимость емкостей от мощности $P_{изл}$, потребляемой излучателем, то выражение (4.2) примет вид

$$C \gg \frac{P_{изл}}{2\pi f(\sim E)^2}. \quad (4.3)$$

Выражение показывает, что с уменьшением мощности $P_{изл}$ требуемая величина емкости снижается, что позитивно сказывается на применении в светофорах светодиодов, у которых мощность $P_{изл}$ практически всегда меньше, чем у светофоров с лампами накаливания.

В некоторых случаях требуется проверка соотношения величин емкостей конденсаторов $C1$ и $C2$ с индуктивностью намагничивания L_{μ} первичной обмотки сигнального трансформатора СТ на появление резонансных явлений, частота которых ориентировочно может быть определена как $f_{рез} = \frac{1}{2\pi(L_{\mu}C)^{1/2}}$, где C — результирующая

емкость, действующая в рассматриваемом резонансном контуре.

Как показано в разделе 1, использование управления светофором от переменного напряжения создает определенные трудности в контроле наличия тока через светодиоды СДМ. Это обусловлено влиянием шунтирующего действия емкости между жилами в сигнальной паре кабеля (см. конденсатор C_k схемы рис. 1.5).

На схеме рис. 4.4 представлен принцип исключения влияния шунтирования емкости C_k на выполнение функции контроля излучения СДМ в «горячем» режиме работы светофора [79].

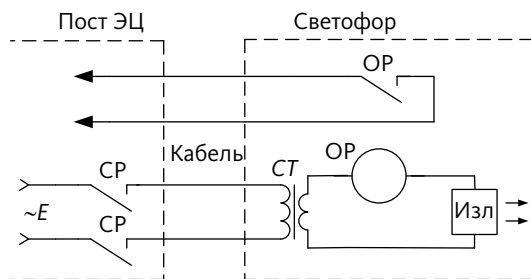


Рис. 4.4. Схема контроля тока через СДМ с включением реле ОР во вторичную цепь трансформатора СТ

Огневое реле ОР перенесено из первичной цепи сигнального трансформатора СТ в его вторичную цепь, где из-за короткой длины связи соединяющая шунтирующая емкость практически $C_k \rightarrow 0$ (рис. 4.1). Контактom реле ОР информация о наличии или отсутствия тока через СДМ передается на пост электрической централизации.

Функционально более полная схема управления светофором, включающая в себя исключение ненадлежащего показания светофора и функцию контроля тока через СДМ в «горячем» режиме работы, приведена на рис. 4.5 [68].

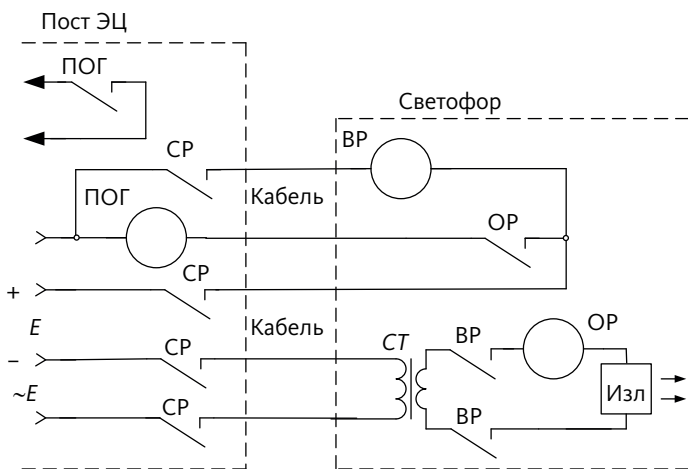


Рис. 4.5. Схема полнофункциональной диагностики и управления светодиодным светофором

В схеме рис. 4.5 совмещены два устройства: по рис. 4.2 и 4.4, работа которых рассмотрена выше.

Очевидно, что схема, приведенная на рис. 4.5, имеет существенный недостаток: относительно большое количество связей по сигнальному кабелю. Однако количество связей может быть уменьшено различными методами: совмещение передачи сигналов или объединение связей источников питания.

Например, на рис. 4.6 приведен вариант полнофункционального устройства управления светофором, который реализован совмещением схем рис. 4.4 и 4.5.

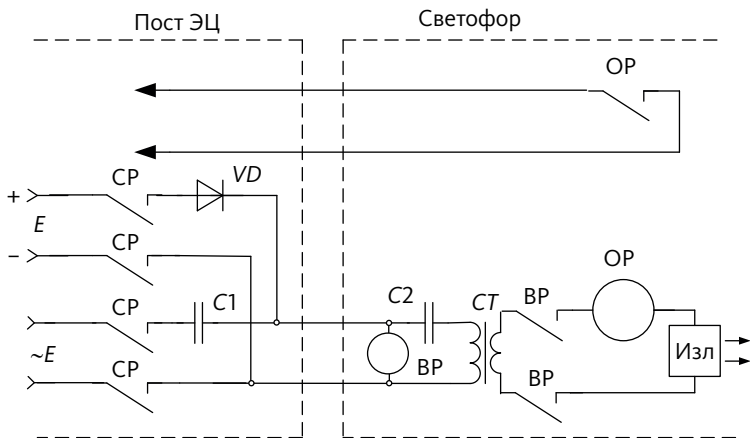


Рис. 4.6. Вариант полнофункциональной схемы светодиодного светофора

В схеме рис. 4.6 количество связей сигнального кабеля от поста электрической централизации до светофора уменьшено до четырех. Если объединить один из проводников реле ОР с одним из полюсов источника переменного напряжения $\sim E$, то количество связей может быть уменьшено до трех.

Анализ и варианты схем диагностики светодиодных светофоров в «горячем» режиме работы позволяют сделать выводы об их практическом применении и определить возможности для их дальнейшего совершенствования.

В приведенных схемах излучение СДМ в «горячем» режиме работы контролируется косвенно, то есть определяется не наличие реального излучения СДМ, а наличие тока, протекающего через светодиоды. Известные принципы «горячего» контроля с определением реального излучения СДМ приведены в разделе 1. Они же могут быть применены и в рассматриваемых в данном разделе схемах диагностики светодиодных светофоров.

Вопросы реализации схем светофоров для решения задач диагностики в «холодном» режиме работы рассматриваются далее, так как они в равной мере справедливы для любого вида управляющего напряжения светофоров как для переменного, так и для постоянного.

4.2. Диагностика функционирования светофора для схем с управлением от постоянного напряжения

4.2.1. Диагностика функционирования светофора в «горячем» режиме работы

Самые простые схемотехнические решения контроля светодиодного светофора в «горячем» режиме работы — стандартная и широко применяемая схема (рис. 4.7) [2].

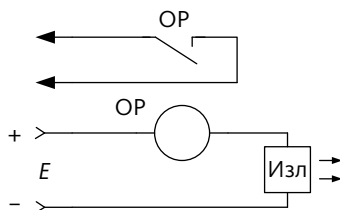


Рис. 4.7. Стандартная схема контроля функционирования светофора в «горячем» режиме работы

Схема рис. 4.7 используется не только при управлении светофором от постоянного напряжения. Если длина соединительной связи от поста управления невелика, например, от релейного шкафа станционных или перегонных устройств автоматики и телемеханики, то можно ее применить и при работе от переменного напряжения с учетом наличия в схеме сигнального трансформатора и выпрямителя.

Для сведения учтем, что в качестве излучателя Изл могут использоваться как лампы накаливания, так и группы последовательно или параллельно включенных светодиодов, входящих в СДМ.

Применение светодиодов в светофорах взамен традиционных ламп накаливания имеет определенную специфику, которая может ограничивать получение надежного контроля излучения в «горячем» режиме функционирования светофора. Для определения этой специфики выполним сравнительный анализ работы ламп накаливания и светодиодов [70]. На рис. 4.8 приведены вольт-амперные характеристики лампы накаливания (а) и светодиода (б).

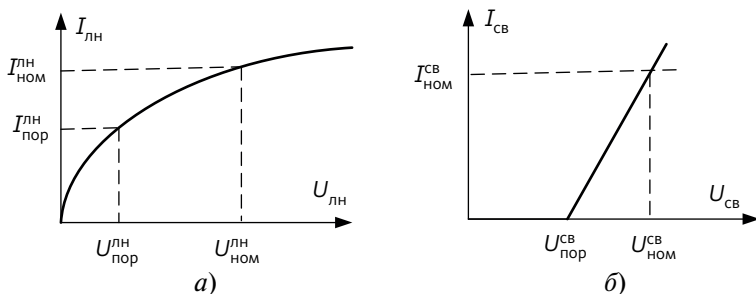


Рис. 4.8. Вольт-амперные характеристики лампы накаливания (а) и светодиода (б)

Как видно из рис. 4.8, если ВАХ лампы накаливания с некоторой степенью приближения может быть принята за линейную функцию, то для светодиодов она существенно нелинейна. Кроме того, питанием лампы накаливания может служить как постоянное напряжение, так и переменное. Номинальный режим излучения лампы накаливания задается путем подачи на нее напряжения $U_{\text{ном}}^{\text{лн}}$, а у светодиода задающим параметром является ток $I_{\text{ном}}^{\text{св}}$. В разделе 1 показано, что для одной и той же величины тока, протекающего через светодиод, практические значения напряжений $U_{\text{пор}}^{\text{св}}$ и $U_{\text{ном}}^{\text{св}}$ имеют значительный температурный и технологический разбросы при любых значениях тока через светодиод, в том числе и при $I_{\text{ном}}^{\text{св}} = \text{const}$ и $I_{\text{пор}}^{\text{св}} = 0$. Значит, если пороговое значение напряжения для конкретного типа лампы накаливания может быть принято за постоянную и нормированную величину, то напряжение $U_{\text{пор}}^{\text{св}}$, определяющее начало излучения светодиода, является неопределенной (в некоторых пределах) величиной. Она практически может лежать в пределах от 2 до 4 В и, кроме того, зависит от вида светодиода по цвету его излучения.

Поэтому для светодиодных светофоров практически невозможно задать точку срабатывания последовательно включенного огневого реле. Это один из важных факторов сложности реализации диагностики «горячего» режима работы светодиодного светофора.

Входное напряжение излучателя, которое может быть принято за исходную точку при назначении нормы допустимого уровня напряжения на входе лампы накаливания (рис. 4.8, а), должно соответствовать неравенству:

$$U_{\text{ВХ}}^{\text{ЛН}} < U_{\text{пор}}^{\text{ЛН}}. \quad (4.3)$$

Для светодиодного светофора с количеством последовательно включенных светодиодов m (см. схемы включения светодиодов в СДМ рис. 1.2) при применении токозадающих активных резисторов аналогичное неравенство имеет вид:

$$U_{\text{ВХ}}^{\text{СВ}} < (mU_{\text{пор}}^{\text{СВ}} + U_{\text{ток}} + U_{\text{впр}}), \quad (4.4)$$

где $U_{\text{ток}}$ — падение напряжения на токозадающем резисторе; $U_{\text{впр}}$ — падение напряжения на диодах выпрямителя в случае питания излучателя от переменного напряжения.

Практически для ламповых и светодиодных светофоров выполняется неравенство:

$$U_{\text{ВХ}}^{\text{ЛН}} > U_{\text{ВХ}}^{\text{СВ}}. \quad (4.5)$$

Проведем сравнительный анализ различных схем включения светодиодов приведенных на рис. 1.2 в СДМ с точки зрения реализации надежной и качественной диагностики «горячего» режима работы светодиодного светофора.

В схеме рис. 1.2, *а* светодиоды СДМ включены последовательно. Если не учитывать рассмотренной ранее нестабильности и неоднозначности параметров ВАХ светодиодов, то при появлении обрыва в любом из светодиодов ток через них прекращается, что будет соответствовать выключению последовательно включенного огневого реле, определяя этим неисправность светофора.

Устройство светофора по рис. 1.2, *б* имеет смешанное соединение светодиодов. Обрыв в любой из параллельно включенных последовательных цепей светодиодов уменьшает потребляемый всей СДМ ток на величину $\Delta I_{\text{СВ}}$. В соответствии с этим, интегральная яркость излучения СДМ также снизится. Очевидно, что если количество параллельно включенных цепей m велико, то яркость излучения при отказе одного светодиода снизится незначительно и может находиться в допустимых пределах. В этом случае малая величина тока $\Delta I_{\text{СВ}}$ не сможет быть выявлена огневым реле из-за нестабильности ВАХ светодиодов при установленной точке срабатывания огневого реле.

Этим же недостатком обладает схема с параллельным соединением светодиодов, приведенная на рис. 1.2, *в*. Более того, при ра-

венстве суммарного количестве светодиодов схем рис. 1.2, *б* и *в* величина тока $\Delta I_{\text{св}}$ будет меньше, что затрудняет выполнение условия контроля неисправности светодиодного светофора.

Следовательно, с точки зрения выявления неисправности светофора в «горячем» режиме работы лучше всего использовать схему светофора с последовательным включением светодиодов (рис. 1.2, *а*). Однако она не может быть применена из-за невысокой надежности работы, так как обрыв в любом из *p-n* переходов светодиодов полностью прекращает излучение всей СДМ.

В этом отношении предпочтительно использование схемы резервированных светофоров, рассмотренных в разделе 3 (схемы рис. 3.1 или 3.5), в которых при появлении обрыва в одном или нескольких светодиодах функционирование светофора с прежними нормированными показателями яркости излучения сохраняется.

Кроме того, применение рассмотренных резервированных светофоров дает возможности для увеличения максимальной длины сигнального кабеля без появления эффекта засветки ненадлежащего показания светофора.

Это обусловлено тем, что питание схемы светофора осуществляется от постоянного напряжения, а его величина определяется количеством последовательно включенных светодиодов и может достигать нескольких десятков-сотен вольт. Использование схем резервированных светофоров за счет соответствующего переключения основного и резервного светодиодов повышает надежность и долговечность его функционирования и одновременно с этим улучшает условия обеспечения диагностики «горячего» режима его работы. Отпадает и необходимость использования низкочастотного материалоёмкого сигнального трансформатора.

Рассмотрим варианты описанных схем реализации «горячего» режима работы светофора.

В разделе 2 при рассмотрении схем повышения энергетической эффективности светофоров приведены также схемы диагностики «горячего» режима работы. В схеме рис. 2.8 реализована схема диагностики, где использовано свойство появления напряжения обратной полярности напряжения на вторичной обмотке соответствующего трансформатора при появлении обрыва в цепи светодиодов. Схема светофора по рис. 2.9 обладает свойством контроля реального излучения СДМ за счет использования фотодиодов, оптически связанных со светодиодами. Использование фоторезисторов, также оптически связанных со светодиодами, применено в схеме рис. 2.10.

Здесь, кроме диагностики «горячего» режима работы, реализуются функции регулирования и стабилизации яркости излучения СДМ в светофоре. Однако применение схем по рис. 2.9 и 2.10 ограничивается необходимостью выполнения требований безопасности.

Один из других вариантов схемы реализации диагностики «горячего» режима работы приведен на рис. 4.9.

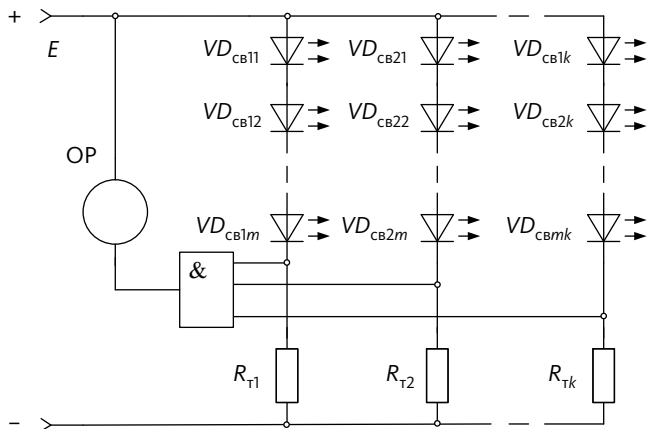


Рис. 4.9. Схема диагностики «горячего» режима со снятием информации с токовыми резисторами R_{T_i}

В схеме рис. 4.9 используется свойство протекания тока по токовому резистору R_{T_i} при отсутствии обрыва светодиодов в той или иной последовательной светодиодной цепи. Очевидно, что обрыв в соответствующей цепи светодиодов сигнал на одном из входов элемента & исчезает, что фиксируется выходным сигналом этого элемента. Эта же схема может быть применена в устройствах по рис. 1.2.

Для обеспечения работоспособности функционирования диагностики схемы рис. 4.9 требуется выполнение условия:

$$U_T \geq U_{\min}^1, \quad (4.6)$$

где U_T — падение напряжения на токовом резисторе R_T ; U_{\min}^1 — минимально допустимое значение единичного уровня входного сигнала логического элемента &.

4.2.2. Диагностика функционирования светофора в «холодном» режиме работы

Трудность реализации устройств диагностики «холодного» режима работы заключается в том, что здесь требуется проверка работоспособности светодиодов схемы при отсутствии протекания через них тока. Это соответствует режиму работы схемы светофора на участке ВАХ от $U_{св} = 0$ до $U_{св} = U_{пор}^{св}$ ВАХ (рис. 4.8, б). Очевидно, что принятые в электронике традиционные методы теории электрических цепей здесь не применимы. В этом случае необходимо использовать некоторые физические свойства $p-n$ переходов светодиодов.

Например, можно использовать свойство принципиального существования тока $I_{обр}$ через любой $p-n$ переход светодиода в области обратной проводимости ВАХ. Вариант схемы с использованием наличия обратного тока для реализации диагностики «холодного» режима работы светофора приведен на рис. 4.10 [82].

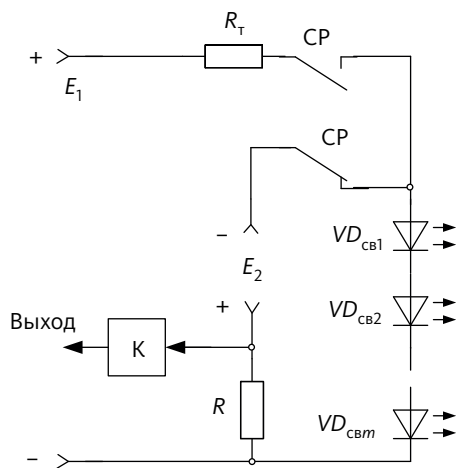


Рис. 4.10. Схема диагностики «холодного» режима с использованием обратного тока светодиода

Здесь на этапе выключенного состояния сигнального реле CP и замкнутого состояния его тылового контакта на группу последовательно включенных светодиодов $VD_{св1}, \dots, VD_{свm}$ от источника постоянного напряжения E_2 подается напряжение обратной для $p-n$

переходов полярности. Существующий ток обратной полярности, протекающий через светодиоды, не вызывает излучения СДМ. Образующееся при этом падение напряжения на резисторе R поступает на компаратор K , и его выходной сигнал служит информацией о целостности всех последовательно включенных светодиодов.

В случае обрыва в любом из светодиодов СДМ обратный ток, протекающий через них и соответствующее напряжение на входе компаратора отсутствуют, что является признаком отказа неизлучающей СДМ.

Другой вариант схемы диагностики контроля «холодного» режима функционирования светофора приведен на рис. 4.11. Здесь используется свойство существования температурного потенциала у $p-n$ перехода практически у всех полупроводниковых приборов [2].

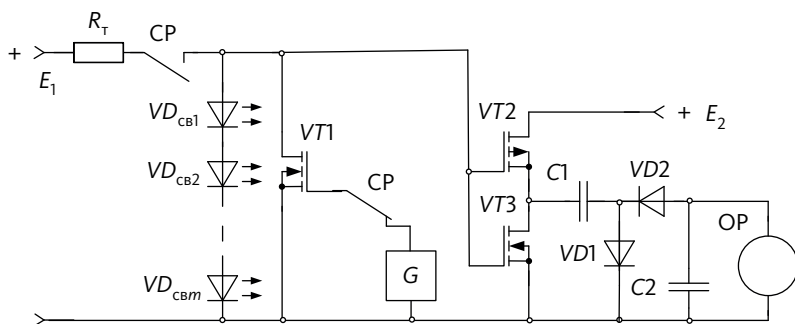


Рис. 4.11. Схема диагностики «холодного» контроля с использованием температурного потенциала $p-n$ переходов

При выключенном состоянии сигнального реле CP , то есть при отсутствии излучения светодиодов, через его тыловой контакт подается питание на генератор импульсов G , например, от какого-либо источника питания постоянного напряжения. Существующий температурный потенциал последовательно включенных светодиодов $VD_{cb1}, \dots, VD_{cbm}$ шунтируется работающим в импульсном режиме транзистором $VT1$. Этим постоянное аналоговое напряжение температурного потенциала преобразуется в импульсное напряжение.

Это импульсное напряжение поступает на вход стандартного безопасного элемента [109], состоящего из транзисторов $VT3$, $VT4$ и соответствующих диодов и конденсаторов. Его входное сопро-

тивление из-за применения МОП-транзисторов достаточно велико, и шунтирование этой схемой маломощного температурного потенциала светодиодов отсутствует.

Функция безопасного элемента заключается в безопасном преобразовании импульсного сигнала на его входе в постоянный уровень напряжения на обмотке огневого реле ОР. Безопасность заключается в том, что при любом виде отказов любого или всех элементов его схемы и отсутствии импульсного сигнала на его входе находящееся реле ОР во включенном состоянии исключено.

Выбор типа и параметров транзисторов $VT2$ и $TV3$ зависит от амплитуды напряжения температурного потенциала светодиодов и определяется неравенством $U_{зи\ пор} < U_{имп}$, где $U_{зи\ пор}$ — пороговое напряжение затвор-исток МОП-транзистором; $U_{имп}$ — амплитуда импульсов на входе безопасного элемента. По существу, напряжение $U_{имп}$ является суммарной величиной напряжения температурного потенциала всех последовательно включенных светодиодов схемы, приведенной на рис. 4.11.

Температурный потенциал p - n перехода в общем виде выражается:

$$\varphi_T = \frac{kT}{q} = \frac{T}{11600}, \quad (4.7)$$

где k — постоянная Больцмана; q — элементарный заряд; T — температура кристалла полупроводника [K].

Практически для комнатной температуры кристалла будем иметь: $\varphi_T(300\text{ K}) = 0,025\text{ В}$.

Очевидно, что эта величина потенциала относительно невелика и достаточно точно выявить ее в условиях работы реальных устройств СЦБ невозможно. Если в СДМ используется большое количество последовательно включенных светодиодов, например, несколько десятков, то регистрация такого напряжения вполне возможна. Кроме того, малые величины напряжения $U_{зи\ пор}$ будут способствовать применению рассматриваемой схемы при меньшем количестве последовательно включенных светодиодов.

Применимость подобной схемы диагностики «холодного» режима относится к рассмотренным выше устройствам резервированных светофоров (см. рис. 3.1 и 3.5), где все светодиоды СДМ включены последовательно, и их общее количество может достигать нескольких десятков. В этом отношении резервированные светофоры перспективны для практического использования.

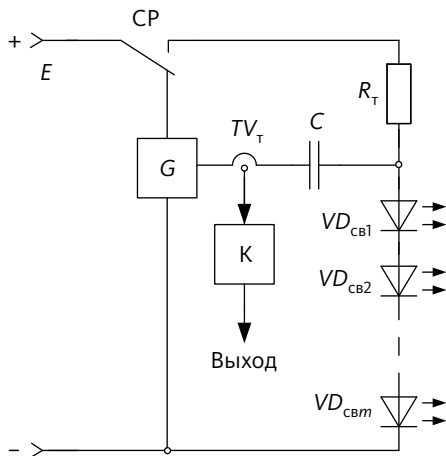


Рис. 4.12. Схема диагностики «холодного» контроля с использованием барьерной емкости p - n переходов

Другой вариант схемы диагностики «холодного» режима работы приведен на рис. 4.12. Здесь используется принципиальное наличие барьерной емкости в p - n переходах, которая существует при подаче обратного напряжения на переход [2]. Это свойство p - n перехода широко используется в варикапах для регулирования частоты резонансных LC контуров генераторов или приемников высокой частоты [2].

В общем случае величина барьерной емкости определяется уравнением

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{I_0} \sqrt{\frac{\Delta\varphi_0}{\Delta\varphi_0 - |U|}}, \quad (4.8)$$

где ε_0 и ε — диэлектрическая проницаемость вакуума и материала соответственно; S — площадь кристалла p - n перехода светодиода; I_0 — ширина перехода; $\Delta\varphi_0$ — температурный потенциал; U — обратное напряжение, прикладываемое к переходу.

Так как для прямого включения светодиода уравнение (4.8) дает в определении емкости большую погрешность, то для диффузионной емкости справедливо выражение

$$C_d = \frac{\tau}{r_d} \left(1 - \operatorname{sech} \frac{w}{L} \right), \quad (4.9)$$

где τ — постоянная времени жизни носителей заряда; r_d — активное сопротивление p - n перехода постоянному току; w — ширина базы p - n перехода; L — диффузионная длина электронов.

На рис. 4.13 показана типичная вольт-фарадная характеристика диода $C = f(U_d)$, то есть зависимость величины емкости p - n перехода от прикладываемого к нему напряжения. График показывает существенную нелинейность характеристики, что необходимо учитывать при практическом использовании подобного светофора.

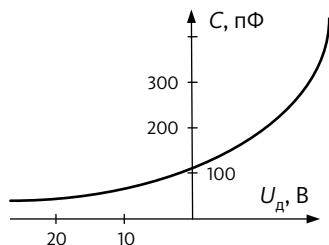


Рис. 4.13. Типичная вольтфарадная характеристика p - n перехода

Вольт-фарадная характеристика показывает соотношение между емкостью p - n перехода и величиной выходного напряжения высокочастотного генератора переменного напряжения G (см. схему на рис. 4.12).

Иллюстрация этого положения, показывающая взаимодействие напряжения генератора G с ВАХ p - n перехода, приведена на графиках рис. 4.14. Здесь рассмотрен случай работы схемы при подаче выходного переменного напряжения генератора G на светодиоды без смещения по оси напряжений, то есть относительно нулевой оси времени сигнал, подаваемый на светодиоды, является симметричным.

Как видно из графиков рис. 4.14, амплитуда переменного высокочастотного напряжения, поступающего от генератора G , не должна превышать величины $U_{\max} = U_{\text{пор}}$. Невыполнение этого условия приведет к появлению прямого тока через светодиоды, что может вызвать их излучение. Это напряжение относительно невелико, составляет величину 1–2,5 В, а это обусловит малые значения контрольного

переменного тока, протекающего через барьерные емкости светодиодов. Малый обратный (контрольный) ток обусловит невысокую чувствительность схемы диагностики.

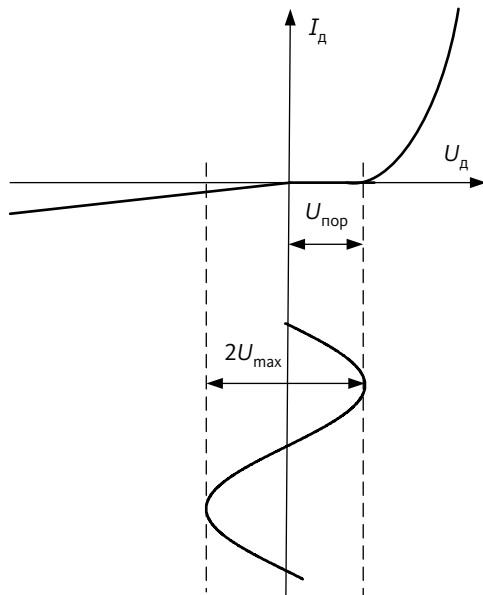


Рис. 4.14. Функционирование схемы рис 4.12 при работе от симметричной синусоиды

Задача увеличения переменного напряжения может быть решена смещением синусоиды относительно точки $U_d = 0$ (рис. 4.15).

Это может быть достигнуто путем последовательного с переменным напряжением постоянного напряжения смещения $U_{см}$ (см. графики рис. 4.15), что позволит увеличить амплитуду переменного напряжения до величин нескольких единиц-десятков вольт без опасения появления излучения светодиодов. Это увеличит обратный ток через светодиоды, что обусловит увеличение чувствительности схемы диагностики. Однако для реализации этого положительного качества схемы требуются определенные схемотехнические затраты.

Рассмотренные схемы диагностики функционирования светодиодного светофора в «горячем» и «холодном» режимах работы показывают практическую осуществимость их реализации.

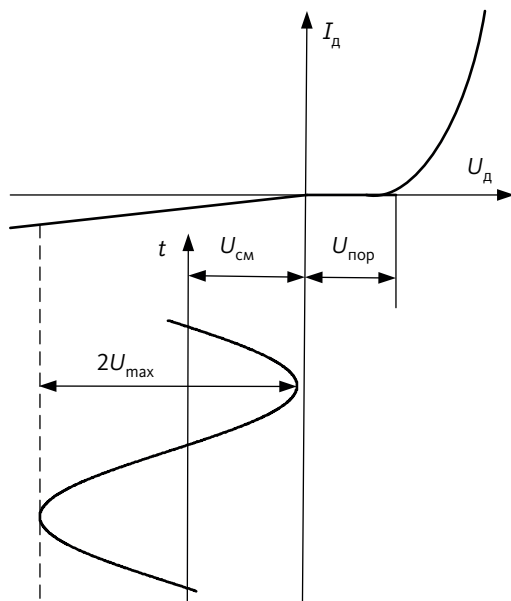


Рис. 4.15. Функционирование схемы рис. 4.12 при введении смещающего напряжения $U_{см}$

Выполненный анализ приведенных схем в «холодном» режиме диагностики и их работа определяют специфические особенности их функционирования, а также преимущества и недостатки различных схем. Их сравнение позволяет понять возможности их применения в практических устройствах автоматики и телемеханики железнодорожного транспорта.

Некоторые другие варианты устройств диагностики различных видов светодиодных светофоров рассмотрены в разделе 2. Разнесение рассмотренных схем по различным функциональным разделам монографии связано с тем, что одна и та же схема может иметь преимущества и недостатки, относящиеся к различным выполняемым функциям и к различной схемотехнике. Например, схемы резервированных светофоров по рис. 3.1 и 3.5 обладают специфическими свойствами и преимуществами, которые относятся к различным разделам монографии.

Раздел 5

Применение волоконно-оптических линий связи для управления светофорами

В современных устройствах и системах автоматики, телемеханики и информатики широко используются устройства с применением волоконно-оптических линий связи (ВОЛС). Их несомненное преимущество по сравнению с металлосодержащими кабелями заключается в большой помехозащищенности и увеличенном объеме передаваемой информации и высокой экономической эффективности в части использования цветных металлов. На железнодорожном транспорте подобные устройства применяются для преобразования и передачи больших объемов информации различного вида. В частности, на сети железных дорог заменяют многие системы магистральной, служебной и местной связи, в которых до недавнего времени применялись металлосодержащие кабели и воздушные линии, на системы с использованием оптоэлектронной аппаратуры и кабелей ВОЛС [12]. Однако это практически не коснулось инфраструктуры нижних уровней устройств автоматики и телемеханики.

Рассмотрим схемотехнические и структурные решения применения довольно простых оптоэлектронных устройств преобразования информации для передачи по ВОЛС небольших объемов данных, например, для управления станционными светофорами [74, 77, 81]; их применяют для повышения помехозащищенности, экономической эффективности 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 кабеля ВОЛС. Это позволяет увеличить длину сигнальных кабелей, кроме того, здесь исключается засветка ненадлежащего показания сигнала светофора. Возможность практического применения подобных устройств основана на использовании в канале преобразования информации МОП-транзисторов с оптоэлектронным управлением [83].

Известны устройства, в которых для управления стационарными светофорами используются ВОЛС [84, 85]. В этих устройствах энергетически маломощный оптический сигнал, получаемый по световоду ВОЛС, преобразуется в относительно мощный электрический сигнал, управляющий переключением и излучением соответствующего показания светофора.

Основная задача, которую требуется решать при разработке подобных устройств, — выполнение требований безопасности, предъявляемых к стандартным устройствам железнодорожной автоматики и телемеханики железнодорожного транспорта [86, 87].

5.1. Устройство безопасной передачи аналогового оптического сигнала на излучатель светофора

Схема устройства безопасной передачи сигнала по ВОЛС приведена на рис. 5.1 [2].

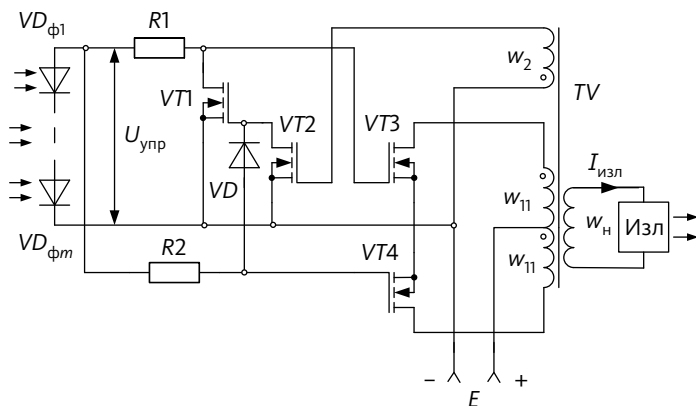


Рис. 5.1. Схема безопасного устройства преобразования оптического сигнала управления светофором

В схеме рис. 5.1 маломощный сигнал $U_{упр}$, представляющий собой сумму фото-ЭДС, последовательно включенных m фотодиодов $VD_{\phi 1}, \dots, VD_{\phi m}$, управляет работой безопасного устройства. Приемные входы этих фотодиодов оптически связаны с выходом

соответствующей жилы оптоэлектронного кабеля ВОЛС. На выходе безопасного устройства включен излучатель Изл, в качестве которого может выступать не только СДМ с соответствующими выпрямителем и токозадающими элементами, но лампа накаливания.

С энергетической точки зрения устройство представляет собой двухтактный преобразователь входного постоянного напряжения E , реализованный на МОП-транзисторах $VT3$ и $VT4$.

Функция выполнения требований безопасности заключается в следующем. Включение излучателя определяет сигнал, получаемый от единичного световода ВОЛС. Он воспринимается фотодиодами $VD_{\phi 1}, \dots, VD_{\phi m}$. Если нет, то схема, приведенная на рис. 5.1, исключает появление сигнала, который может вызвать излучение соответствующего показания светофора при любых отказах элементов схемы (обрывах, замыканиях и других неисправностях полупроводниковых и других элементов схемы).

Принцип функционирования устройства достигается тем, что преобразователь постоянного напряжения представляет собой автогенератор с самовозбуждением, для управления которым требуется достаточно маломощный электрический сигнал. В данном случае это фото-ЭДС фотодиодов.

Для управления элементами схемы рис. 5.1 применены МОП-транзисторы, которые обладают в статическом режиме работы чрезвычайно большим входным сопротивлением (10^{12} и более Ом), что радикально снижает мощность для управления безопасным устройством [76].

По световоду ВОЛС передается оптический сигнал от поста электрической централизации или другого управляющего объекта. Этот сигнал далее поступает на оптические входы фотодиодов $VD_{\phi 1}, \dots, VD_{\phi m}$.

Определим энергетические характеристики преобразования выходного оптического сигнала ВОЛС в управляющее напряжение $U_{упр}$ схемы, представленной на рис. 5.1.

Функционально фотодиоды схемы являются элементом солнечной батареи [75], который вырабатывает напряжение для управления МОП-транзисторами $VT1$ и $VT2$ устройства. Поэтому основы теории работы, включая энергетические характеристики, этого функционального узла, изложенные в [80], могут быть применены и здесь.

Эквивалентная схема преобразования оптического сигнала в электрический и ВАХ фотодиода приведена на рис. 5.2, а и 5.2 б [89, 90].

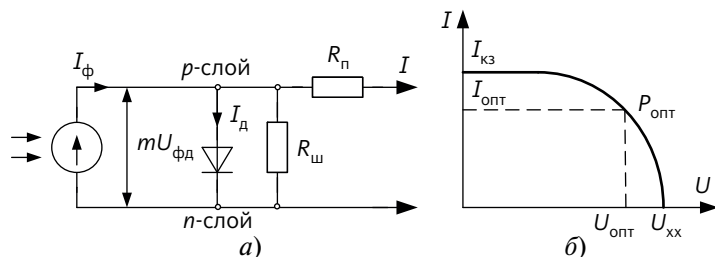


Рис. 5.2. Эквивалентная схема группы фотодиодов (а) и ВАХ фотодиода (б)

Далее примем, что емкостными составляющими $p-n$ перехода можно пренебречь, так как на их оптический вход поступает практически постоянное излучение, и его изменения во времени из-за специфики работы светофора достаточно редки по сравнению с постоянными времени изменения инерционных процессов в фотодиоде.

ВАХ (рис. 5.2, б) показывает, что существует оптимальная величина выходного тока $I_{\text{опт}}$, которой соответствует оптимальная величина выходного напряжения $U_{\text{опт}}$. Эти величины определяют максимальное значение мощности $P_{\text{опт}} = P_{\text{max}} = U_{\text{опт}} I_{\text{опт}}$, которую может отдать фотодиод или группа m последовательно включенных фотодиодов в нагрузку.

Необходимость анализа этих процессов для схемы, приведенной на рис. 5.1, обосновывается тем, что несмотря на то, что в безопасном устройстве нагрузкой фотодиодов являются МОП-транзисторы, но здесь же по условиям схемотехники присутствуют и активные резисторы $R1$ и $R2$.

Уравнение, связывающие параметры нагрузки (активные резисторы) с характеристиками фотодиода:

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

где $I_{\text{н}}$ — ток нагрузки, ток элемента солнечной батареи; A — коэффициент, уточняющий различие между реальной и теоретической ВАХ фотодиода; $R_{\text{п}}$ — последовательное сопротивление элемента; $R_{\text{ш}}$ — шунтовое сопротивление элемента; $I_{\text{ф}}$ — фототок, протекающий через $p-n$ переход; $I_{\text{он}}$ — обратный ток насыщения $p-n$ перехода; e — заряд электрона; T — температура $p-n$ перехода [K].

Уравнение (5.1) относительно тока I_n и напряжения $U_{упр}$ является трансцендентным, в общем виде нерешаемым. Поэтому практическая реализация существующих энергетических систем солнечных электростанций с точки зрения получения максимальной выходной мощности выполняется при помощи специальных систем автоматического управления. Эти системы методом последовательных приближений непрерывно выполняют промежуточные вычисления величины мощности, определяя на основе этого точку максимума выходной мощности $P_{\text{опт}}$ солнечной электростанции. Система автоматического регулирования производит непрерывный динамический расчет требуемых параметров для получения экстремального значения выходного параметра.

Если в рассматриваемой схеме применяются МОП-транзисторы с большим входным сопротивлением, а величины сопротивлений резисторов $R1$ и $R2$ достаточно велики, то от известного принципа необходимости получения максимальной мощности в нагрузке можно отказаться. Однако это не говорит, что величины сопротивлений резисторов $R1$ и $R2$ могут быть любой малой величины.

В этом случае за счет появляющейся возможности значительного уменьшения выходного тока фотодиодов, близкого к $I \rightarrow 0$, напряжение $U_{упр}$ возрастает до величин, которые требуются для выполнения заданных значений порогового напряжения $U_{\text{зи пор}}$ существующих МОП-транзисторов. Очевидно, что для уменьшения требуемого значения величины управляющего напряжения $U_{упр}$ рационально использовать МОП-транзисторы с возможно меньшими значениями порогового напряжения $U_{\text{зи пор}}$.

В данном случае рациональным является работа фотодиодной системы безопасного устройства в области вольт-амперной характеристики, близкой к точке напряжения холостого хода $U_{\text{хх}}$. График ВАХ (рис. 5.2, б) показывает, что с уменьшением тока I выходное напряжение фотодиодной системы увеличивается и в пределе $U_{упр} \rightarrow U_{\text{хх}}$. В соответствии с изложенным, для увеличения напряжения $U_{упр}$ необходимо увеличение сопротивления резисторов $R1$ и $R2$ (рис. 5.1). Так как входное сопротивление МОП-транзисторов велико, то величины сопротивлений $R1$ и $R2$ могут быть выбраны достаточно большими, чтобы выходное напряжение фотодиодной группы приближалось к $U_{\text{хх}}$.

Назначение верхнего предела увеличения сопротивлений $R1$ и $R2$ будет определяться выбором частоты работы импульсного преобразователя, что обусловлено влиянием емкостей p - n переходов фото-

диодов и соответствующих паразитных межэлектродных емкостей МОП-транзисторов $VT1$ и $VT2$ схемы, приведенной на рис. 5.1. Эти динамические процессы работы схемы рассмотрены далее.

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

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

где $U_{\text{зи}}$ — напряжение затвор исток МОП-транзистора, требующееся для создания его включенного состояния при протекании по нему требуемого тока стока $I_{\text{с}}$.

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

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

где $U_{\text{зи пор}}$ — пороговое напряжения затвор-исток МОП-транзисторов $VT1$ и $VT2$.

У транзисторов $VT3$ и $VT4$ ток стока существенно больше. Он определяется мощностью излучателя $P_{\text{изл}}$ и напряжением питания E схемы рис. 5.1: $I_{\text{с}} = \frac{P_{\text{изл}}}{2E}$. Для этих транзисторов выражение (5.2) приобретает следующий вид:

$$n_{\text{ф}} > \frac{U_{\text{зи пор}} + \frac{P_{\text{изл}}}{SE}}{U_{\text{фд}}}, \quad (5.4)$$

где S — крутизна характеристики МОП-транзисторов $VT3$ и $VT4$.

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

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

Для включенного состояния транзистора $VT3$ и выключенного состояния транзистора $VT4$ получим

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

где $U_{\text{си1}}$ и $U_{\text{си3}}$ — напряжение сток-исток транзисторов $VT1$ и $VT3$ при их включенном состоянии; $U_{\text{д}}$ — падение напряжения на диоде VD (см. схему рис. 5.1).

Таким образом, если значения напряжения $U_{\text{зипор}}$ невелики и составляют несколько вольт, то различие в нагрузке на фотодиодную группу может быть существенным. Это обуславливает появление динамических пульсаций напряжения источника $U_{\text{упр}}$, 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 в цепи напряжения $U_{\text{упр}}$.

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

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

Они служат руководством для выбора частоты преобразования $f_{\text{пр}}$ и определения величин сопротивлений резисторов $R1$ и $R2$, частота $f_{\text{пр}}$ может лежать в пределах нескольких десятков-сотен кГц.

Для увеличения напряжения $U_{\text{упр}}$ необходимо увеличить сопротивление резисторов $R1$ и $R2$. Это требуется также для уменьшения количества $n_{\text{ф}}$ фотодиодов, что упрощает конструкцию фотоприемного устройства и снижает его стоимость. Однако в соответствии с условиями (5.7), это препятствует повышению частоты $f_{\text{пр}}$. Масса, габариты, материалоемкость и стоимость импульсных преобразователей снижаются с увеличением частоты преобразования электрической энергии, больше всего это относится к материалоемкости трансформатора TV (рис. 5.1).

Итак, задача 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 по схеме рис. 5.1; D — аналогичный условный показатель, определяющий стоимость рассматриваемого безопасного устройства

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

Предложенный подход к разработке безопасного устройства передачи и преобразования оптического сигнала дает возможность получить максимальную эксплуатационную эффективность, в том числе и при его разработке.

Предложенное нами техническое устройство для управления светофорами по ВОЛС в некоторых случаях имеет функциональное ограничение по применению — необходимость наличия в безопасном устройстве специального источника постоянного напряжения E , которое иногда отсутствует в традиционных схемах управления, расположенных непосредственно в светофорах. Хотя при существовании на станциях разветвленной системы постоянных и переменных напряжений это не становится принципиальным ограничением. Кроме того, в предлагаемой системе управления стационарными светофорами можно использовать кабели, содержащие жилы как ВОЛС, так и металлические.

Преимущества применения ВОЛС в системах управления светофорами или другими устройствами автоматики и телемеханики подтверждают рациональность отказа от традиционных схем управления светофорами.

Использовать описанное безопасное устройство можно не только для управления светодиодными светофорами. Как видно из рис. 5.1, выходная мощность импульсного преобразователя напряжения определяется лишь выбранными типами МОП-транзисторов и их соответствующими параметрами. Так как входное сопротивление МОП-транзистора велико, то увеличение тока стока вовсе не увеличивает напряжение $U_{\text{упр}}$. Поэтому применение подобного устройства возможно и для управления ламповыми светофорами и другими устройствами железнодорожной автоматики и телемеханики. Это, например, может относиться к системам централизованной автоблокировки с размещением управляющей аппаратуры (на станции или на других удаленных пунктах управления).

5.2. Принципы реализации схем контроля функционирования светофоров с использованием ВОЛС

Принципы реализации управления и контроля излучения светофора с передачей контрольной информации по ВОЛС основаны на том, что последовательно в цепь питания излучателя включается светодиод, излучение которого служит признаком протекания через светодиод, то есть признаком функционирования соответствующего показания светофора. Этот оптический сигнал по световоду может быть передан на пост ЭЦ или на другой объект управления светофором.

Возможны различные варианты практической реализации подобного принципа схем контроля [2, 92] (рис. 5.3, а, б).

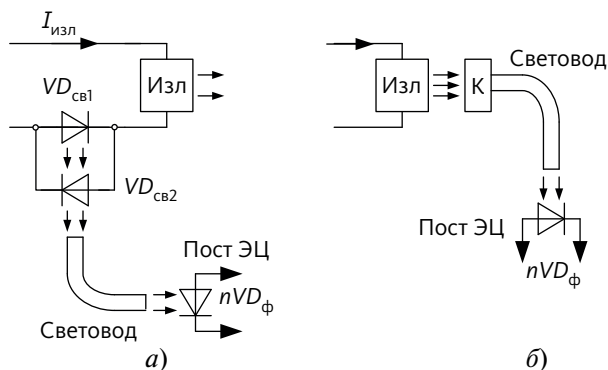


Рис. 5.3. Схема контроля тока, протекающего через излучатель (а), контроля излучения показания светофора (б)

В первой схеме (рис. 5.3, а) контролируется ток, протекающий через излучатель. Схему можно использовать как для контроля постоянного тока излучателя, так и переменного. Например, если контролируется постоянный ток, то в схеме контроля используется только один светодиод $VD_{св1}$. Для контроля существования переменного тока параллельно и встречно по полярности должен быть включен второй светодиод $VD_{св2}$. Этим обеспечивается протекание тока через светодиоды как при одной полярности контролируемого переменного тока, так и при другой.

Вторая схема (рис. 5.3, б) осуществляет непосредственный контроль излучения показания светофора, воспринимаемый концентратором К, который должен концентрировать излучение светодиодов СДМ в небольшой по углу рассеяния луч излучения, передаваемый в соответствующую жилу ВОЛС контрольного кабеля. То есть концентратор является интегратором излучения СДМ. В качестве концентратора К может использоваться вариант светодиодного устройства, приведенного на рис. 2.12 и 2.13.

Если в качестве излучателя используется лампа накаливания — точечный источник излучения, то задача точной диагностики упрощается.

Обе схемы контроля по рис. 5.3, а и 5.3, б могут быть применены как в светодиодных светофорах, так и в ламповых. Использование рассмотренных схем контроля вместе с безопасным элементом (рис. 5.1) позволяет полностью отказаться от металлосодержащих компонентов (кабелей, низкочастотных сигнальных трансформаторов, материалоемких электромагнитных реле и других аналогичных дорогостоящих элементов).

5.3. Принципы структурной реализации систем управления и контроля светофоров с использованием ВОЛС

Спецификой реализации схемы управления по ВОЛС служит необходимость питания безопасного элемента от источника постоянного напряжения E (см. рис. 5.1). Это определяет существование различных вариантов схем управления.

Первый из них, приведенный на рис. 5.4, относится к системе централизованного управления входными светофорами станции.

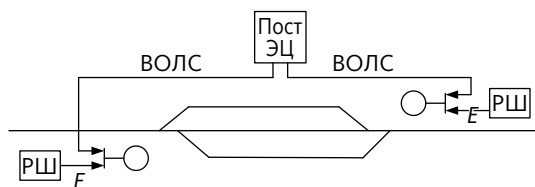


Рис. 5.4. Структурная схема организации управления входными светофорами станции

На входных светофорах в релейном шкафу (РШ) всегда имеется источник энергоснабжения, использование которого позволяет известными методами получить напряжение питания E безопасного элемента (см. рис. 5.1). Поэтому структура управления светофорами по рис. 5.4 наиболее проста и экономически целесообразна, она не нуждается в дополнительном источнике электропитания.

Эта же схема может быть использована и в других устройствах автоматики и телемеханики, в частности, в централизованных системах автоблокировки или др.

Организация управления выходными или маневровыми светофорами имеет более сложный характер вследствие рассмотренной выше необходимости подачи на безопасный элемент постоянного напряжения E . На рис. 5.5 на примере горловины станции показан один из вариантов подобной структуры.

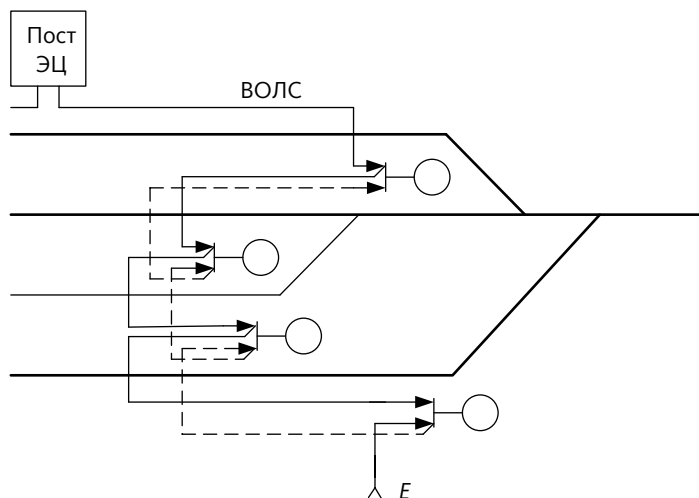


Рис. 5.5. Вариант управления выходными светофорами станции

На рис. 5.5 сплошными линиями показаны управляющие и контрольные связи поста электрической со светофорами по ВОЛС. Пунктирными линиями показаны цепи подачи напряжения E на все светофоры. Здесь это напряжение передается от одного первичного источника E в горловине станции. Возможны и другие варианты организации электропитания схем безопасных устройств светофоров. В частности, напряжение E может подаваться и от поста

ЭЦ по тому же кабелю вместе ВОЛС. Это практически возможно, так как в номенклатуре выпускаемого кабельной продукции имеются кабели, содержащие как оптоэлектронные жилы, так и медные.

Организация схем управления и контроля станционных и других светофоров не ограничивается рассмотренными вариантами. Возможно применение различных вариантов подачи напряжения E на схему управления светофорами, которые определяются конкретным видом систем автоматики и телемеханики и структурой их электроснабжения.

Рассмотренные вопросы показали практическую возможность применения ВОЛС для управления светофорами и контроля их функционирования. При этом использование данного принципа управления дает неоспоримые преимущества, заключающиеся в повышении безопасности движения поездов и улучшении экономических показателей за счет отказа от использования металлосоержающих сигнальных кабелей.

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

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

Определены преимущества и недостатки предлагаемого принципа управления и контроля функционирования светофоров, который определил области его использования в станционных, перегонных и в других устройствах СЦБ.

Предложены варианты осуществления контроля излучения светофора без огневого электромагнитного реле с передачей контрольной информации на пост ЭЦ по волоконно-оптическим линиям связи.

Сделан вывод, что рассмотренные схемотехнические и структурные решения могут быть использованы для управления и контроля как светодиодными светофорами, так и светофоров с лампами накаливания.

Предложено несколько вариантов структурных схем управления входными, выходными или маневровыми 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.

Рассмотренные в данном разделе принципы оптоэлектронного управления МОП транзисторами и реализации безопасного устройства имеют определенные преимущества. Они могут более широко применяться в других устройствах и системах автоматики и телемеханики.

Основная трудность практического применения рассмотренных принципиальных и структурных схем с ВОЛС заключается в отсутствии функционально и конструктивно законченных оптических устройств сопряжения световода с фотодиодами. Считается, что ВОЛС существует для передачи логических сигналов большой информативной емкости. Для рассматриваемых в данном разделе схем требуется довольно простое устройство согласования световода с фотодиодами и с передачей одного относительно низкочастотного сигнала. Этот новый функциональный узел единообразен и стандартен для всех видов светофоров железнодорожного транспорта. Его также можно применять в других объектах сложной инфраструктуры железнодорожного транспорта.

Электропитание безопасных элементов на каждом из управляемых по ВОЛС светофоров может осуществляться путем использования солнечных батарей [85, 89].

Это обусловлено тем, что мощность, потребляемая по источнику E (схема рис. 5.5) достаточно мала и не превышает 10–15 Вт. Поэтому емкость аккумуляторов, которая требуется для круглосуточной и надежной работы светофоров, будет относительно небольшой. Требуемая площадь солнечных элементов также будет невелика. В частности, аналогичные устройства небольшой мощности широко используются в устройствах ГИБДД для электропитания устройств регулирования уличного движения и для освещения переездов железнодорожного транспорта. Очевидно, что в этом случае снимаются проблемы центрального или местного способа передачи электроэнергии на светофор по металлсодержащим кабелям или по отдельным металлическим жилам кабелей.

Практическое решение вопроса управления и контроля за функционированием светофоров по ВОЛС позволяет широко применять оптоэлектронные устройства для управления и другими устройствами и объектами железнодорожной автоматики и телемеханики и полностью отказаться от применения медесодержащих кабелей управления различными объектами.

Раздел 6

Нестандартные схемы управления светофорами

В данном разделе рассматриваются схемотехнические решения, которые обладают нестандартностью подхода в части управления светофорами или другими оптоэлектронными устройствами от различных источников электропитания постоянного и переменного напряжения, а также возможностью получения различного цвета излучения показателя светофора. Описываются некоторые другие нестандартные особенности применения оптоэлектронных схем и устройств, а также возможности или невозможности выполнения тех или иных эксплуатационных требований и функциональных возможностей их применения.

Приведенные в данном разделе схемы и устройства могут рассматриваться в качестве прототипов для создания новых устройств оптоэлектроники и светодиодной техники, связанных, возможно, не только с железнодорожным транспортом. В качестве ближайшего аналога их применения могут рассматриваться системы регулирования уличным движением или др.

Для получения различных цветов излучения могут использоваться группы из двух, трех или более светодиодов, p - n переходы которых конструктивно расположены в непосредственной близости друг от друга [94–97]. При этом происходит смешение цветов их излучения, создавая для человеческого глаза результирующий цвет.

Кроме того, принцип смешения цветов позволяет уменьшить количество связей от источников управляющего сигнала до излучателя.

Одна из таких схем приведена на рис. 6.1 [52]. Она позволяет получать три цвета излучения из двух типов светодиодов различного цвета излучения, то есть подобный светофор или другой излучатель является трехзначным.

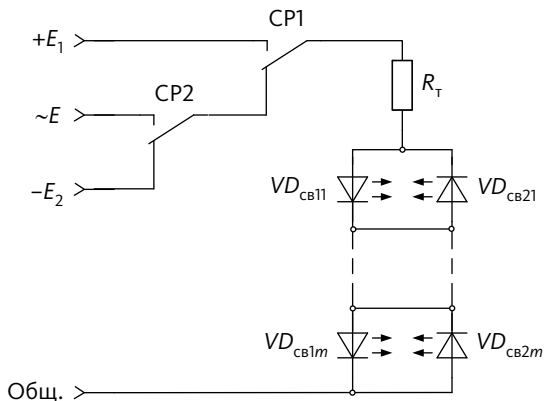


Рис. 6.1. Схема трехзначного светодиодного светофора

Рассматриваемая схема управляется двумя сигнальными реле CP1 и CP2. Для питания СДМ используются три источника питания: постоянное напряжение положительной полярности E_1 , переменное напряжение $\sim E$ и постоянное напряжение отрицательной полярности $-E_2$.

Если реле CP1 находится во включенном состоянии, то излучают светодиоды $VD_{cb11}, \dots, VD_{cb1m}$ светодиодной матрицы. При выключенном состоянии обоих реле CP1 и CP2 на СДМ подается отрицательная полярность напряжения $-E_2$ и излучают светодиоды $VD_{cb21}, \dots, VD_{cb2m}$. Если реле CP1 находится в выключенном состоянии, а реле CP2 — во включенном, то на СДМ подается переменное напряжение $\sim E$, вследствие чего одновременно излучают светодиоды $VD_{cb11}, \dots, VD_{cb1m}$ и $VD_{cb21}, \dots, VD_{cb2m}$, когда происходит смешение цветов их излучения.

Значит, в рассматриваемой схеме одновременно со смешением цветов излучения уменьшается количество связей от схемы управления до излучателя до одной пары жил сигнального кабеля.

Другой вариант схемы трехзначного светофора со смешением цветов излучения и питанием от источника переменного напряжения приведен на рис. 6.2 [53].

В этой схеме требуется лишь один источник питания схемы $\sim E$ переменного напряжения, что выгодно отличает ее от схемы, приведенной на рис. 6.1, количество связей со схемой управления также минимально.

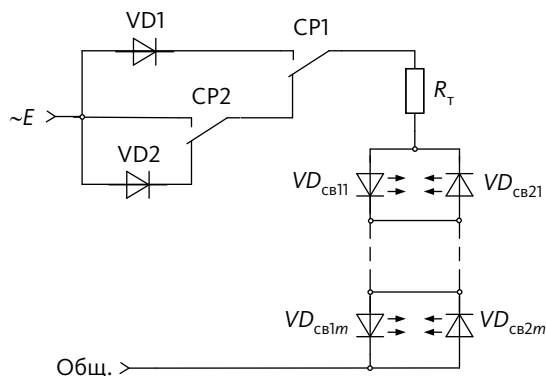


Рис. 6.2. Схема трехзначного светодиодного светофора с питанием от источника переменного напряжения

На схеме рис. 6.3 показан другой вариант трехзначного светофора [54] со смешением цветов с питанием тоже от одного источника, но постоянного напряжения. Здесь, в отличие от предыдущих схем (рис. 6.1 и 6.2), требуется ввести токозадающие резисторы R_{T1} и R_{T2} в каждую из цепей последовательно включенных светодиодов. Это определяет увеличенное количество связей со схемой управления. Очевидно, что если в схеме автоматики и телемеханики нет источника переменного напряжения требуемого номинала, то такая схема предпочтительна для применения.

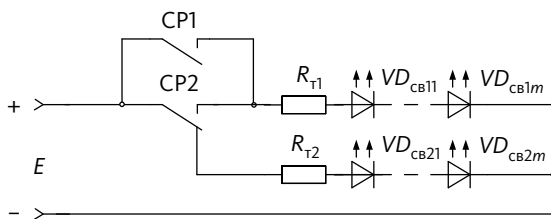


Рис. 6.3. Схема трехзначного светодиодного светофора с питанием от источника постоянного напряжения

Дальнейшим развитием устройств светодиодных светофоров со смешением цветов излучения могут служить схемы с увеличением их значности. На рисунке 6.4 приведена схема пятизначного светодиодного светофора со смешением цветов и с питанием от одного источника постоянного напряжения E [57].

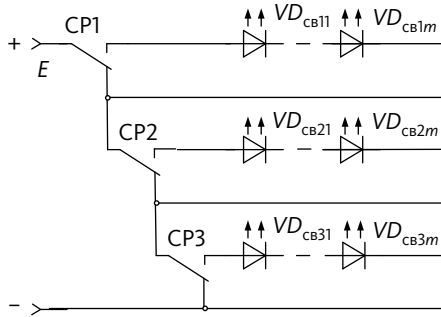


Рис. 6.4. Схема пятизначного светодиодного светофора со смешением цветов

Здесь в зависимости от состояния сигнальных реле CP1, CP2 CP3 можно получить различные показания результирующего цвета показания светофора.

Еще вариант схемы пятизначного светодиодного светофора со смешением цветов излучения, но с другим управлением сигнальных реле приведен на рис. 6.5 [58].

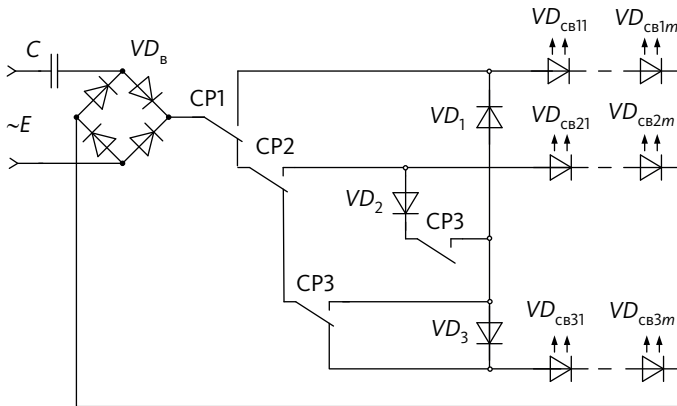


Рис. 6.5. Вариант схемы пятизначного светодиодного светофора со смешением цветов

Эта схема является модификацией светодиодного светофора конденсаторного вида, функционирование которых рассмотрено в разделе 2.1.

Вариант схемы управления светодиодами со смешением цветов, реализованный на индуктивных устройствах управления светофорами, приведен на рис. 6.6 [66].

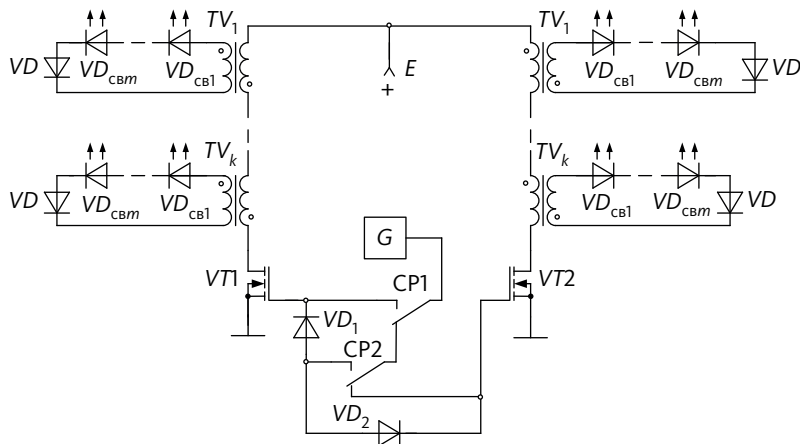


Рис. 6.6. Схема управления светодиодным светофором со смешением цветов на основе трансформаторного устройства светофора

В схеме (рис. 6.6) при помощи двух сигнальных реле CP1 и CP2 реализуется три цвета излучения светофора. Импульсы генератора G при помощи контактов этих реле подключаются поочередно ко входам транзисторов $VT1$ или $VT2$ или одновременно к обоим входам. Таким образом, с точки зрения максимального количества получаемых цветов излучения, здесь может быть получено четыре цвета излучения.

Эта схема служит модификацией светодиодного светофора индуктивного вида, работа которых рассмотрена в разделе 2.2.

Спецификой использования приведенных схем (рис. 6.1–6.6) в светофорах железнодорожного транспорта заключается в затрудненности выполнения требований по получению необходимых норм цветности в области требуемых нормативных характеристик спектра RGB светодиодов [5, 9].

Кроме этого, совмещение светодиодов различного цвета не может быть выполнено простым конструктивным расположением $p-n$ переходов, например, в виде размещения отдельных стандартных корпусов светодиодов в неминимизованном пространстве конструкции

светодиодного модуля. Для получения эффективного качества сложения цветов расстояния между этими переходами должны быть достаточно малыми и составлять доли миллиметра. Эти факторы исключают возможности реализации рассматриваемых светофоров при помощи достаточно простого использования нескольких расположенных рядом дискретных светодиодов, что не может быть реализовано в процессе изготовления СДМ в общепринятых условиях разработки дискретных электронных схем.

Различная цветность излучения светодиодов определяется различными видами полупроводников, которыми являются обычно полупроводниковые гетероструктуры. В этом заключается радикальное отличие светодиодов от обычных диодов или биполярных транзисторов, исходный материал которых является полупроводниковой монокристаллической структурой, в частности, кремний. Поэтому реализация СДМ со смешением цветов излучения — достаточно сложная задача, которая не может быть решена в условиях разработок проектных организаций железнодорожного транспорта

Применение устройств смешения цветов реально лишь при использовании функционально законченных электронных элементов, выпускаемых электронной промышленностью. В качестве примера использования смешения цветов могут служить монолитные двух- или трехцветные индикаторы включения или переключения режимов работы некоторых типов мониторов или телевизоров.

На рис. 6.7 приведена специальная схема управления светодиодным излучателем, в которой для поочередного управления различными светодиодами или группами светодиодов используется один драйвер [99].

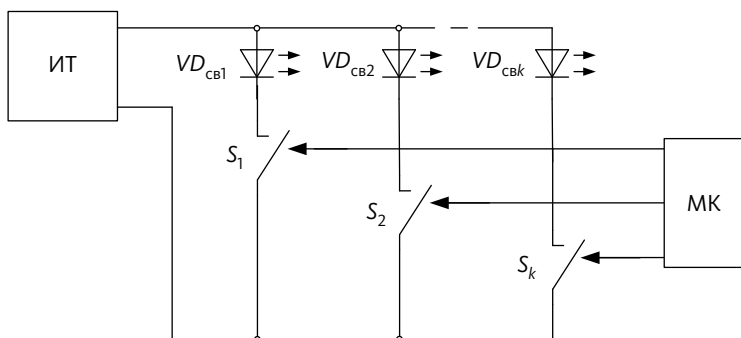


Рис. 6.7. Схема светодиодного излучателя с одним драйвером

В схеме рис. 6.7 источник тока ИТ представляет собой энергетически эффективный микроэлектронный драйвер. Управление через ключи S_1, S_2, \dots, S_m включением того или иного светодиода VD_1, VD_2, \dots, VD_m осуществляется микроконтроллером МК по соответствующей программе. В каждой из параллельных цепей схемы могут быть применены не один светодиод, а несколько.

Рассматриваемую схему можно использовать в станционных пульт-табло ДСП для вывода изменяющейся информации о состоянии свободности путей, положении стрелок, показаниях светофоров и т.д. При этом требуемая информация, поступающая на МК, определяется функционирования электрической централизации станции или др.

Положительное свойство данной схемы — использование лишь одного драйвера для управления несколькими группами светодиодов.

На рис. 6.8 представлена схема переездного светодиодного светофора, в котором реализуется мигающий режим работы двух групп светодиодов $VD_{cb11}, \dots, VD_{cb1m}$ и $VD_{cb21}, \dots, VD_{cb2m}$ [98]. Схема управления представляет собой обычный симметричный мультивибратор на двух транзисторах VT_1 и VT_2 , работающий в автоколебательном режиме.

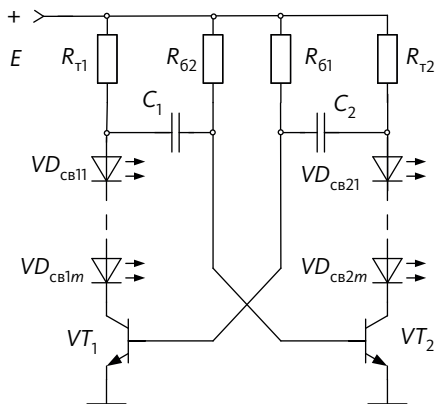


Рис. 6.8. Схема переездного светодиодного светофора

Кроме основного функционального назначения светофора — переездный, устройство может быть использовано, как и предыдущая схема, в пульт-табло ДСП для создания мигающего режима работы некоторых функциональных информационных элементов выводимой информации.

В некоторых случаях для контроля «горячего» режима работы излучателя постоянного напряжения могут применяться известные двухобмоточные огневые реле (рис. 6.10) [101].

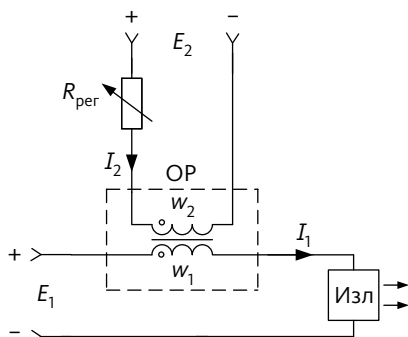


Рис. 6.10. Простая схема контроля «горячего» режима работы светофора

Схема контроля (рис. 6.10) состоит из двухобмоточного огневого реле ОР постоянного напряжения, первая w_1 и вторая w_2 обмотки которого подключены к первому E_1 и второму E_2 источникам постоянного напряжения.

Функционирование схемы описывается временной диаграммой рис. 6.11.

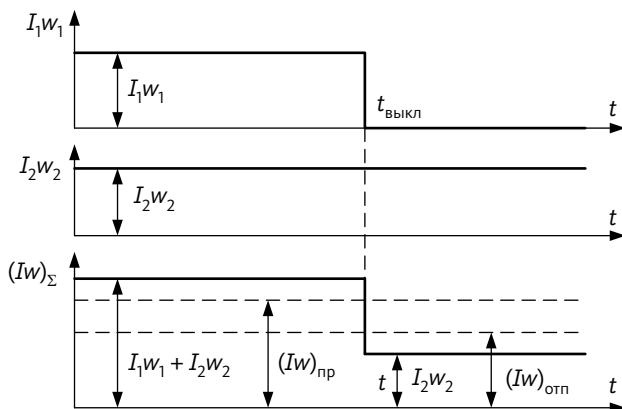


Рис. 6.11. Временные диаграммы работы схемы рис. 6.10

Назначение рассматриваемой схемы заключается в осуществлении «горячего» режима диагностики излучателя, когда ток, потребляемый им в режиме излучения, мал и его недостаточно для обеспечения включенного состояния стандартного огневого реле ОР. Сложение двух ампервитков $I_1 w_1 + I_2 w_2$ позволяет достичь требуемой величины ампервитков притяжения реле $(Iw)_{пр}$, которая соответствует включению реле ОР. Однако при этом необходимо выполнение условия $I_2 w_2 < (Iw)_{отп}$, что соответствует норме тока отпущения реле ОР.

Таким образом, схема, приведенная на рис. 6.10, позволяет реализовать схему диагностики «горячего» режима работы излучателя с достаточно малым контролируемым током. Этот принцип контроля может быть использован и в других функциональных узлах устройств автоматики и телемеханики железнодорожного транспорта.

Применение рассмотренных в данном разделе схем и устройств для управления светодиодными светофорами железнодорожного транспорта вызывает ряд принципиальных вопросов. Однако целью их рассмотрения в данной монографии служит выявление ранее не применяющихся нестандартных походов к реализации новых направлений разработки отдельных функциональных узлов оптоэлектроники и светотехники, в частности, для железнодорожного транспорта и его различных объектов сложной инфраструктуры различных уровней.

Заключение

В книге приведены достаточно полные данные по схемотехнике светофоров железнодорожного транспорта и систем организации электропитания и правления светодиодными излучателями. Практически все эти устройства светодиодных светофоров защищены патентами Российской Федерации, что свидетельствует об их мировой новизне и промышленной полезности. Объем рассмотренных устройств и систем с анализом их характеристик позволяет оценить возможные области их применения на железнодорожном транспорте. Очень важно, что они могут применяться не только на железнодорожном транспорте, но и в других отраслях народного хозяйства — для систем регулирования дорожным движением с достижением соответствующих положительных энергетических, эксплуатационных и других свойств. Так как основным принципом реализации светодиодных светофоров является использование научных и технических основ оптоэлектроники, то рассмотренные схемы и системы могут расширить применение созданных авторами методов преобразования электрической энергии в оптическое излучение на других устройствах и системах светодиодной и фотодиодной техники.

Оригинальность и новизна созданных технических решений не претендует на истину в последней инстанции. Специалистам с мотивацией на творчество рассмотренные принципы реализации элементов оптоэлектроники могут позволить создавать новые и возможно более эффективные устройства применимые в самых различных областях техники. На это положение рассчитывают авторы книги, так как любой научно-технический прогресс основывается на анализе и изучении известных устройств. Как гласит известная истина: «Все мы стоим на плечах своих предшественников».

Приведенный в книге анализ функционирования устройств и систем позволяет выполнить их инженерный расчет, осуществить выбор видов элементной базы и их рабочие режимы. Это позволяет при известных задаваемых и требуемых эксплуатационных данных реализовать практически реализуемые функционально законченные и работоспособные светодиодные светофоры или другие элементы оптоэлектроники.

Литература

1. Савельев Е. О. Исследование и разработка направлений реализации высокоэффективных светодиодных светофора : Дисс... на соиск. уч. ст. канд. техн. наук. — Екатеринбург : УрГУПС, 2005. — 130 с.
2. Оськина М. А. Развитие и исследование функциональных возможностей светодиодных светофоров железнодорожного транспорта. — Дисс... на соиск. уч. ст. канд. техн. наук. — Екатеринбург : УрГУПС, 2016. — 125 с.
3. Схемы подключения и контроля светодиодных модулей типа СЖДМ для железнодорожных светофоров автоблокировки : ПЕТИ 424565 011-01 ТР—АБ: [утв. Деп. автоматики и телемеханики ОАО «РЖД»] / ОАО «РЖД»; УрО ОАО ВНИИЖТ. — Екатеринбург, 2010.
4. Схемы подключения и контроля светодиодных модулей типа СЖДМ для железнодорожных светофоров автоблокировки: дополнение № 1 к техническим решениям : ПЕТИ 424565 011-01 ТР — АБ ДВЖД: [утв. Деп. автоматики и телемеханики ОАО РЖД] / ОАО РЖД; УрО ОАО ВНИИЖТ. — Екатеринбург, 2010.
5. Светооптические системы светодиодные мачтовых и карликовых железнодорожных светофоров : технические условия ТУ 3185-003-01404314-2009: [утв. ген. директором ЗАО НПО РоСАТ] / ЗАО НПО РоСАТ. — Армавир, 2010.
6. Системы светодиодные светооптические мачтовых железнодорожных светофоров : руководство по эксплуатации : НКМР. 676636.030 РЭ. [утв. Деп. автоматики и телемеханики ОАО РЖД] / ЗАО Транс-Сигнал. — Нижний Новгород, 2009.
7. Системы светодиодные светооптические мачтовых светофоров : НКМР. 676636.030 ТУ: включение ССС в системы автоблокировок : АБ-1-К-25-50-ЭТ-82; АБ-2-К-25-50-ЭТ-82; И-206-91 (АБТ): технические решения НКМР. 676636.030-00 ТР: [утв. Деп. автоматики и телемеханики ОАО РЖД] / ЗАО «Транс-Сигнал». — Нижний Новгород, 2010.
8. Головка светофорная светодиодная для железнодорожных переездов: руководство по ремонту: НКМР. 676636.003 РД: [утв. ЗАО Транс-Сигнал 11.10.2002] / МПС РФ. — Нижний Новгород, 2002.

9. ГОСТ Р-56057–2014. Системы светодиодные для железнодорожной автоматической сигнализации. Общие технические требования и методы испытаний. — М. : Стандартинформ, 2014. — 44 с.
10. ТР ТС 003/2014. Технический регламент ТС. О безопасности инфраструктуры железнодорожного транспорта. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc/ (дата обращения: 12.12.14).
11. Мачтовые светофорные головки с модулями светодиодных систем : технические условия ТУ 32 ЦШ 2148 — 2009 : утв. гл. инж. Гипротрансигналсвязь ОАО Росжелдорпроекта. — СПб, 2009.
12. Адауров С. Е., Розенберг Е. Н., Мурашова М. А. Концепция комплексной программы внедрения светодиодной техники в ОАО РЖД // Автоматика, связь, информатика. — 2009. — № 2. — С. 2–5.
13. Есюнин В. И. Светодиодные переездные светофоры / В. И. Есюнин, А. Е. Ефрюшкин // Автоматика связь, информатика. — 1999. — № 12. — С. 25–26.
14. Сергеев Б. С., ЩигOLEV С. А., Любар В. Г. Светодиодные светофоры: проблемы разработки и применения // Автоматика, связь, информатика. — 2001, № 5. — С. 19–23.
15. Есюнин В. И. Иткинсон И. С.. Магистральные светофоры на светодиодах // Автоматика, связь, информатика. — 2001. — № 8. — С. 33–34.
16. Сергеев Б. С., Наговицын В. В., ЩигOLEV С. А. Светодиодный светофор / Современные информационные технологии, электронные системы и приборы : Межвуз. сб. науч. тр. — Екатеринбург : УрГУПС, 2001. — Вып. 21 (103). — С. 196–204.
17. Сергеев Б. С., Верхованцев К. Г., ЩигOLEV С. А., Любар В. Г. Светодиодные поездные светофоры: проблемы разработки / Новые устройства и системы автоматизики, информатики и связи : Межвуз. сб. науч. тр. — Екатеринбург : УрГУПС, 2001. — Вып. 18(100). — С. 23–33.
18. Energy conservation Program: Test procedures for light-emitting diode lamp, 2012. [Электронный ресурс] (дата обращения: 01.03.2015).
19. Светофоры железнодорожные. URL: <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).
20. Высокоскоростные железные дороги мира. URL: <http://eriksrailnews.com/archive/hst2.html> (дата обращения: 26.01.15).
21. Светофоры мира. URL: <http://www.railsigns.uk/> (дата обращения: 10.09.14).
22. Обзор светодиодных модулей для светофоров. URL: <http://www.etrailer.com/TrailerLights/Optronics/STL90AB.html> (дата обращения: 30.01.15).

23. Уральский оптико-механический завод. URL: http://uomz.ru/products/izdeliya_dlya_jeleznoy_dorogi/ (дата обращения: 28.01.15).
24. ОАО РОСАТ (СПб). URL: <http://rosat.org> (дата обращения: 15.01.15).
25. Проэлектро (Нижний Новгород). URL: http://proelectro.ru/products/-id_-71587 (дата обращения: 06.02.15).
26. Трансигнал (Нижний Новгород). URL: <http://www.8e.ru/firms/a2122.php> (дата обращения: 06.02.15).
27. Энергопортал (Ростов-на-Дону). URL: <http://rostov.energoportal.ru/catalog/> (дата обращения: 10.01.15).
28. Вест Трейдинг (Казахстан). URL: <http://-west-trading.kz/modul.html> (дата обращения: 23.01.15).
29. Альфа ЖАТ (Нижний Новгород). URL: <http://alfazhat.ru/ru/katalog/sveto-fory-machtovye> (дата обращения: 22.02.15).
30. ЭлТэз (Армавир). URL: http://www.-aemz.elteza.ru/index.php?Itemid=43&id=351&option=com_content&task=view (дата обращения: 01.03.15).
31. ОЦВ (Москва). URL: <http://www.eav.ru/publ1.-php?publid=2010-12a19> (дата обращения: 27.01.15).
32. KAZUS.RU. URL: <http://kazus.ru/articles/249.html> (дата обращения: 12.12.14).
33. Трансигнал (Нижний Новгород). URL: http://transsignal.ru/production/-?ELEMENT_ID=151&SECTION_ID=16 (дата обращения: 14.01.15).
34. Обзор светодиодных светофоров на ОАО РЖД. URL: <http://www.moluch.ru/> (дата обращения: 01.03.15).
35. Union Swith & Signal. URL: <http://www.switch.com> (дата обращения: 15.01.14).
36. Safetran. URL: <http://www.safetran.com/> (дата обращения: 20.01.14).
37. Lincoln Industries. URL: <http://www.lincoln-industries.com/> (дата обращения: 08.03.14).
38. Alstom. URL: <http://www.transport.alstom.com/> (дата обращения: 25.02.14).
39. GE Harris. URL: <http://www.geharris.com/> (дата обращения: 09.07.14).
40. Signal House. URL: <http://www.collis.co.uk/> (дата обращения: 01.03.14).
41. NMA. URL: <http://www.nma.nl/railsign/> (дата обращения: 29.01.14).
42. Электропитание устройств железнодорожной автоматики, телемеханики и связи / Вл. В. Сапожников, Н. П. Ковалев, В. А. Кононов, Б. С. Сергеев. — М. : Маршрут, 2005. — 453 с.
43. Сергеев Б. С., Савельев Е. О. Вопросы реализации светодиодных светофоров / Безопасность движения поездов / Труды IV НТК. — 2003. — С. И-23.

44. Сергеев Б. С., Наговицын В. В., Савельев Е. О. Оптимизация энергетических характеристик устройств со светодиодными матрицами // Практическая силовая электроника. — 2002. — № 5. — С. 35–37.
45. Пат. 2237290 РФ. Трехзначный светодиодный светофор // Е.О. Савельев, Б.С. Сергеев. G08G 1/095. Публ. 27.09.2004.
46. Харитонов И. В. Повышение безопасности движения поездов за счет применения устройств оптоэлектроники локомотива на основе светодиодов. — Дисс...на соиск. уч. ст. канд. техн. наук. — Екатеринбург : УрГУПС, 2015. — 140 с.
47. Пат. 2258979 РФ. Светодиодное устройство / Е. О. Савельев. H01L 51/12. Публ. 20.08.2005.
48. Сергеев Б. С., Чечулина А. Н. Источники электропитания электронной аппаратуры железнодорожного транспорта. — М. : Транспорт, 1998. — 280 с.
49. Сергеев Б. С. Силовая полупроводниковая элементная база : учеб. пособие. — Екатеринбург : УрГУПС, 2017. — 120 с.
50. Пат. 2550743 РФ. Светодиодный излучатель // М. А. Оськина, Б. С. Сергеев. H05B 37/02. Публ. 10.05.2015.
51. Оськина М. А., Сергеев Б. С. Анализ работы светофора с удаленным управлением // Электроника и электрооборудование транспорта. — 2015, № 2. — С. 14–17.
52. Оськина М. А., Сергеев Б. С. Расширение функциональных возможностей светодиодных светофоров // Труды IV НТК / Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование. ИСУЖТ-2015. — М. : ОАО НИИАС, 2015. — С. 150–153.
53. Оськина М. А. Принципы управления удаленными светофорами // Транспорт Урала. — 2015, № 2(46). — С. 52–55. ISSN 1815-9400.
54. Савельев Е. О., Сергеев Б. С. Вопросы реализации светодиодных светофоров // Безопасность движения поездов : тр. IV науч.-практ. конференции. — М. : МПС, 2003. — С. II-23.
55. Агафонов Д. А. Исследования визуального восприятия красных железнодорожных светофоров на основе светоизлучающих диодов // Светотехника. — 2003. — № 6.
56. Маршов С. В. Особенности безопасного применения светодиодных элементов индикации в системах железнодорожной автоматики / Сборник докладов Трансжат — 2005. — Ростов-на-Дону. — С.179–180.
57. Пат. 2399957 РФ. Светодиодный светофор с контролем холодного состояния / Р. Ш. Валиев, Ш. К. Валиев, М. А. Оськина, Б. С. Сергеев, Е. О. Савельев. G08G 1/095. Публ. 20.09.2010.

58. Пусваецт Ю. Ю. Результаты опытной эксплуатации модулей СЖДМ // Автоматика, связь, информатика. — 2007. — № 9. — С. 25–26.
59. Сергеев Б. С. Схемотехника функциональных узлов источников вторичного электропитания. — М. : Радио и связь, 1992. — 224 с.
60. Абрамов А. В. Светодиодная лампа для железнодорожных светофоров // Полупроводниковая светотехника. — 2010. — № 3. — С. 47–52.
61. Мурашова М. А., Пинчуков О. П. Сравнительный анализ светотехнических параметров опытных образцов систем светооптических светодиодных, изготовленных различными разработчиками : сб. докладов // Трансжат-2005. — Ростов-на-Дону. — С. 180–185.
62. Мурашова М. А., Пинчук О. П. Железнодорожные светофоры со светодиодными светооптическими системами // Автоматика, связь, информатика. — 2006. — № 8. — С. 14–15.
63. Никулин А. А., Есюнин В. И. Светодиодные железнодорожные светофоры, миф или реальность // Автоматика, связь, информатика. — 2005. — № 1. — С. 4–7.
64. Сергеев Б. С. Забытые источники питания // Современная электроника. — 2009, № 1. С. 30–33.
65. Пат. 225046 РФ. Конденсаторный светодиодный светофор / Б. С. Сергеев, Е. О. Савельев. В61L 5/18. Публ. 27.04.2005.
66. Сергеев Б. С. Особенности схемотехники светодиодных излучателей // Электропитание. — 2013. — № 4. — С. 35–37.
67. Пат. 2206166 РФ. Устройство для заряда аккумуляторов / Н. Б. Курченкова, В. В. Наговицын, Б. С. Сергеев. H02J 7/00. Публ. 10.06.2003.
68. Сергеев Б. С. Предельные возможности применения конденсаторных источников вторичного электропитания // Электросвязь. — 1996. — № 2. — С. 38–40.
69. Сергеев Б. С., Ромаш Э. М., Савельев Е. О. Управление светодиодными матрицами с помощью реактивных элементов // Электричество. — 2004. — № 9. — С. 57–62.
70. Sergeev B. S., Romash E. M., Savyev Yr. O. Control of Light-emitting Diode Arrays using Reactive Components // Electrical Technology Russia. — 2004. — № 3. — Pp. 57–62.
71. Давиденко Ю. Н. Современная схемотехника в освещении. — СПб : Наука и техника, 2008. — 320 с.
72. Савельев Е. О., Сергеев Б. С. Новое поколение светофоров // Инновации в эксплуатации и развитии инфраструктуры железнодорожного транспорта : Сб. докл. науч.-практ. конф. Инновации ОАО РЖД. — М. : ОАО «РЖД», 2004. — С. 211–212.

73. Пат. 2207745 РФ. Светодиодный светофор // Б. С. Сергеев, С. А. Щиголев, В. В. Наговицын. G08G 1/095. Публ. 27.06.2003.
74. Пат. 2236042 РФ. Светодиодный светофор // Б. С. Сергеев, Е. О. Савельев. G08G 1/095. Публ. 16.09.2004.
75. Пат. 2237292 РФ. Светодиодный светофор (варианты). Б. С. Сергеев, Е. О. Савельев. G08G 1/095. Публ. 27.09.2004.
76. Пат. 2262217 РФ. Способ управления светодиодной матрицей и устройство для его осуществления // Б. С. Сергеев, Е. О. Савельев. H05B 43/00. Публ. 20.04.2005.
77. Тильк И. Г. Новые устройства автоматики и телемеханики железнодорожного транспорта. — Екатеринбург : УрГУПС. — 2010. — С. 168.
78. Пат. 2528523 РФ. Резервированный светодиодный светофор // М. А. Оськина, Б. С. Сергеев. B61L 23/00. Публ. 20.09.2014.
79. Пат. 2672314 РФ. Резервированный светодиодный светофор // Б. С. Сергеев, М. А. Оськина. B61L 23/00. Публ. 20.09.2014.
80. Пат. 2544428 РФ. Устройство управления светофором (Варианты) // М. А. Оськина, Б. С. Сергеев. B61L 5/18. Публ. 20.03.2013.
81. Пат. 2556045 РФ. Светофор // М. А. Оськина, В. К. Донцов, Б. С. Сергеев. B61L 5/18. Публ. 10.07.2015.
82. Пат. 2658730 Устройство контроля функционирования светодиодного светофора РФ. / Б. С. Сергеев, М. А. Оськина. B61L 5/18. Публ. 22.06.2018.
83. Сергеев Б. С. Схемы оптоэлектронного управления мощными МОП транзисторами // Современная электроника. — 2008, № 6. — С. 38–41.
84. Сергеев Б. С., Курченкова Н. Б. Управление станционными светофорами по волоконно-оптическим линиям связи // Вестник Уральского межрегионального отделения Российской Академии транспорта. — 2005. — Вып. 5. — С. 82–84.
85. Сергеев Б. С., Курченкова Н. Б. Перспективы и возможности применения солнечных батарей на железнодорожном транспорте // Вестник Уральского межрегионального отделения Российской Академии транспорта. — 2005. — Вып. 5. — С. 85–88.
86. Сергеев Б. С., Тильк И. Г. Управление станционными светофорами по волоконно-оптическим линиям связи // Тр. II Междунардн. конф. / Система безопасности на транспорте. — Пшибрам, Чехия. — 2008. — С. 28–30.
87. Сергеев Б. С., Савельев Е. О. Выбор направлений работ по разработке светодиодных светофоров // Вестник инженеров электромехаников железнодорожного транспорта. — Самара : СамГАПС, 2003. Вып. 1. — С. 264-267.

88. Савельев Е. О., Сергеев Б. С. Применение средств оптоэлектроники в устройствах СЦБ // Транспорт Урала. — 2006. — № 2 (9). — С. 52–56.
89. Раушенбах Г. С. Справочник по проектированию солнечных батарей. — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 360 с.
90. Оськина М. А. Управление светофорами по волоконно-оптическим линиям связи // Вестник УрГУПС. — 2015, № 2(26). — С. 36–40.
91. Кушпиль И. В., Бут А. Н. Использование фотодиодных модулей для питания устройств железнодорожной автоматики и телемеханики // Автоматика на транспорте. — 2017, Т. 3, № 2. — С. 202–215.
92. Пат. 2265540 РФ. Устройство управления станционными светофорами / Б. С. Сергеев, Н. Б. Курченкова. G08G 1/095. Публ. 10.12.2005.
93. Пат. 2239575 РФ. Трехзначный светодиодный светофор / Б. С. Сергеев, Е. О. Савельев. В61L 5/18. Публ. 10.11.2004.
94. Пат. 2337293 РФ. Трехзначный светодиодный светофор / Б. С. Сергеев, Е. О. Савельев. G08G 1/095. Публ. 27.09.2004.
95. Пат. 2278416 РФ. Пятизначный светодиодный светофор / Е. О. Савельев, Б. С. Сергеев. В61L23/00. Публ. 20.06.2006.
96. Пат. 2278417 РФ. Пятизначный светодиодный светофор / Е. О. Савельев. В61L 23/00. Публ. 20.06.2008.
97. Пат. 2238592 РФ. Трехзначный светодиодный светофор / Е. О. Савельев, Б. С. Сергеев. G08G 1/095. Публ. 20.10.2004.
98. Пат. 2278041 РФ. Переездный светодиодный светофор / Е. О. Савельев. G08G 1/095. Публ. 20.06.2006.
99. Пат. 2550743 РФ. Светодиодный излучатель / М. А. Оськина, Б. С. Сергеев. H05B 17/02. Публ. 10.05.2015.
100. Пат. 233522 РФ. Светодиодная лампа / Н. Б. Курченкова, Б. С. Сергеев. G08B 1/00. Публ. 10.09.2006.
101. Пат. 2276032 РФ. Устройство контроля светофора / Б. С. Сергеев, Н. Б. Курченкова. В61L 5/18. Публ. 10.05.2008.

Научное издание

Сергеев Борис Сергеевич
Савельев Евгений Олегович
Оськина Мария Александровна

**Схемотехника и исследование
светодиодных светофоров
железнодорожного транспорта**

Монография

Редактор Л.С. Барышникова
Верстка — А. В. Трубин

Подписано в печать 06.06.2019. Формат 60×84/16
Усл. печ. л. 7,78. Заказ 35. Тираж 60 экз.

Издательство УрГУПС
620034, Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66

