

«Ўзбекистон темир йўллари»

Давлат акциадорлик темир йўл компанияси

Тошкент темир йўл муҳандислари институти

УДК 621.332.32

Қўлёзма ҳуқуқида

Джураев Алишер Хасанович

«Контакт ўтказгичи ток қабул қилгич билан ўзоро таъсирини тадқиқ
қилиш»

5А310704 – Электр техник мажмуалар ва тизимлар (темир йўл
транспортида)

Магистр академик даражасини олиш учун ёзилган
диссертация

МАГИСТРЛИК ДИССЕРТАЦИЯСИ

Илмий раҳбар:

т.ф.н., **Хушбоқов Б.Х.**

Тошкент - 2013 й.

Аннотация

Мавзу: «Контакт ўтказгичи ток қабул қилгич билан ўзаро таъсирини тадқиқ қилиш»

Ушбу «Контакт ўтказгичи ток қабул қилгич билан ўзаро таъсирини тадқиқ қилиш» мавзусидаги ушбу диссертация ишида фойдаланишда бўлган электр ҳаракат таркиблари ток қабул қилгич турлари, контакт тармоғи тузилиши таҳлил қилиниб контакт тармоғи ва ток қабул қилгич орасидаги таъсирни ўрганиш учун математик модел тузилди.

Аннотация

На диссертационную работи

По теме: «Исследование взаимодействие контактного провода с токоприемником»

В диссертационной работе по теме «Исследование взаимодействие контактного провода с токоприемником» приведены виды токоприемников электро подвижного состава, которые в используются эксплуатации, проведен анализи устройств контактных сетей,прведены расчеты взвимодействия токоприемника и контактной подвески,также составлена математическая модель для изучение взаимодействию контактных проводов и токоприемников.

Abstract

Subject: «Study of the interaction catenary with current wireless set»

This thesis on the topic "Study of the interaction catenary with current wireless set " deak with the types of power electric vehicles, which are used in the operation, conducted sampling devices contact networks, calculations of interaction of the pantograph and contact pendants, also kereare produced works on mathematical model for studying the interaction of pantographs and the overhead wires.

СОДЕРЖАНИЕ

№		стр.
	Введение	3
I	Обзор литератур по взаимодействию токоприемника и контактной подвески.....	
1.1.	Обзор литератур по взаимодействию токоприемника и контактной подвески.....	
1.2.	Токоприемники.....	
1.3.	Общие сведения о контактных сетях электрического транспорта....	
1.4.	Особенности токосъема при высоких скоростях движения.....	
1.5.	Контактные подвески и токоприемники для высокоскоростных линий.....	
II	Взаимодействие с токоприемниками при токосъеме.....	
2.1.	Общие сведения и определения.....	
2.2.	Критерии качества токосъема.....	
III	Расчеты взаимодействия токоприемника и контактной подвески.....	
3.1	Обобщенные расчетные схемы токоприемником и контактных подвесок.....	
3.2.	Сосредоточенные параметры контактных подвесок и их определение.....	
3.2.1.	Расчет жесткости (эластичности) простых и цепных подвесок.....	
3.2.2.	Приведенная масса подвесок.....	
3.3.	Определение распределенных параметров контактных подвесок....	
3.3.1.	Волновые уравнения взаимодействия нескольких токоприемников и контактной подвески.....	
3.4.	Косвенные параметры контактных подвесок взаимодействующих с токоприемниками.....	

3.5.	Расчет токосъема для токоприемников с двумя степенями свободы, с учетом контактных подвесок с сосредоточенными параметрами.....	
IV	Моделирование взаимодействия контактной подвески и токоприемника.....	
4.1.	Моделирование взаимодействия контактной подвески и токоприемника.....	
4.2.	Моделирование методом конечных элементов	
4.3.	Пример моделирования контактной подвески с частотно зависимыми конечными элементами.....	
4.4.	Математическое моделирование электродуговых процессов при различных режимах нарушения токосъема.....	
	Заключение.....	
	Основные результаты и выводы.....	
	Список литературы.....	
	Приложения.....	

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Одной из важнейших стратегических задач развития ГАЖК «Ўзбекистон темир йўллари» является рост эффективности и безопасности работы железнодорожного транспорта. Выполнение поставленных задач в немалой степени зависит от поддержания высоких эксплуатационных характеристик используемых технических объектов путем применения новых технологий в области диагностики технического состояния контролируемых элементов.

В ряду технических и экономических проблем электрических железных дорог одно из основных мест занимают проблемы обеспечения надежного и экономичного токосъема.

Задача данной исследования является изучение взаимодействия контактного провода с токоприемником, а также исследование электродуговые процессы возникающие при нарушении токосъема при различных режимах тяги ЭПС.

Представляется, что эта задача может быть решена путем анализа взаимодействия контактного провода и токоприемника с помощью аппарата математического моделирования.

Существующие модели токосъема, описанные в литературе, не в полной мере учитывают специфику электродуговых процессов для электрифицированной железнодорожной линии переменного тока. В свою очередь, экспериментальные результаты измерений позволяют получать лишь ограниченную информацию в связи с привязкой результатов к конкретным условиям исследований и невозможностью рассмотрения влияния всех сопутствующих факторов.

Для решения поставленной задачи представляется необходимой разработка математических моделей взаимодействия токоприемника ЭПС и контактного провода, выполненных с учетом особенностей токосъема на железной дороге.

Результаты моделирования физических и электрических процессов при различных режимах токосяема с учетом варьирования влияющих факторов могут быть использованы для разработки технология эксплуатации и ремонта токоприемника и контактных сетей переменного тока.

Объектом исследования является взаимодействие токоприемника ЭПС с контактом подвеской при движение подвижных состав электрического транспорта.

Цель работы - Исследование взаимодействие контактного провода с токоприемником и разработка моделей взаимодействие контактной подвески и токоприемника методом конечных элементов.

Предлагаемая нами модель взаимодействие контактной подвески с токоприемником является абсолютно новой, так как она позволяет учесть таких дополнительных элементов как пружины и массы, в результате можно рассчитывать любую подвеску, состоящую из масс, проводов и пружин.

Преимуществом этой модели является применение частотно зависимых алгоритмов решения для схемы замещения звеньевой структуры. При других моделях частотная зависимость должна учитываться путем гармонического анализа импульса. Дополнительно к этому измеряемая величина должна определяться с учетом динамической приведенной массы с целью учета передачи инерции на отдельных частотах.

Методика исследований включает в себя метода частотнозависимых конечных элементов, описывающей колебания провода. Моделирование с использованием связанных масс и жесткостей между точками соединения допускает производить учет таких дополнительных элементов как пружины и массы, что позволяет рассчитывать любую подвеску, состоящую из масс, проводов и пружин. Решение общей проблемы достигается с помощью собственных векторов.

Собственные частоты вычисляются численно с помощью итерационных алгоритмов. Определитель частот должен многократно раскрываться до тех пор, пока не будет получен нулевой итог при итерациях. После точного определения нулевого состояния может быть получено решение для собственных векторов.

Полученные результаты подтверждают достаточное приближение модели к реальной системе токоприемник – контактная подвеска, что позволяет использовать математическое моделирование как эффективное средство исследования скоростных контактных подвесок. Все расчеты выполнены с помощью пакета программ **Mathcad**.

Научная новизна работы состоит в:

- на основании проведенного анализа результатов основных аналитических описаний дугового разряда, опубликованных в зарубежной литературе, осуществлен выбор наиболее оптимального варианта математической модели с учетом особенностей дугового токосъема на железной дороге и поставленных задач исследований.

- разработке уравнение колебание провода с помощью метода частотнозависимых конечных элементов. Полученные результаты подтверждают достаточное приближение модели к реальной системе токоприемник – контактная подвеска, что позволяет использовать математическое моделирование как эффективное средство исследования скоростных контактных подвесок.

- разработке алгоритма и блок-схемы для проведения численных исследований по модели колебаний провода;

Практическая ценность. Разработанная автором модел взаимодействие контактных подвесок с токоприемником методом конечных элементов позволяет использовать математическое моделирование как эффективное средство исследования скоростных контактных подвесок.

Реализация работы. В результате данной работы автором было разработано уравнения колебания провода, на базе метода частотнозависимых конечных элементов. Данный инженерный прикладной метод позволяет производить учет таких дополнительных элементов как пружины и массы, что позволяет рассчитывать любую подвеску, состоящую из масс, проводов и пружин.

Метод может быть широко применен при проектировании новых и модернизации существующих линий контактных подвесок электрифицированных железных дорог с учетом процесса рациональной компьютеризации.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались в научные труды республиканской научно-практической конференции по теме «Инновация-2012» (19-20 октябрь 2012 года). Из них 1 статьи в X межвузовской научно-практической конференции студентов, бакалавров и магистратуры, стажеров и соискателей «Молодой научный исследователь», (3-4 апреля 2012), и 1 статьи на научном семинаре посвященной 80-летию ТашИИТ «Актуальные проблемы научно-педагогической работы», (25 -30 ноября 2011-12 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликованы 4 печатных работы, из них 1 статья в научные труды республиканской научно-практической конференции (19-20 октябрь 2012 года, ТГТУ) «Инновация-2012», 1 статья «Научно-практической конференции студентов магистратуры по итогам работы над диссертацией». «Исследование взаимодействия контактного провода с токоприемником» (12 октябрь 2012 года), ТашИИТ. 1 статьи в научно – методической конференции студентов магистратуры, стажеров-исследователей-соискателей один из которых посвященной 80-летию ТашИИТ «Актуальные проблемы научно-педагогической работы», 1 статья в межвузовской научно-практической конференции студентов, бакалавров и магистратуры, стажеров и соискателей «Молодой научный исследователь».

Работа выполнялась в Ташкентском институте инженеров железнодорожного транспорта на кафедре «Электрический транспорт» в 2011 – 2013 годах под руководством к.т.н. Хушбокова Б.Х.

Структура и объем работы. Диссертационная работа содержит 95 страниц машинописного текста, состоит из введения, четырех глав (с выводами по каждой из них), общих выводов и рекомендаций, списка использованной литературы, включающего 32 наименований, а также приложения. Работа выполнялась в Ташкентском институте инженеров железнодорожного транспорта на кафедре «Электрический транспорт» (2011÷2013 гг.).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность избранной темы, ставится цель работы, её научная новизна и практическая ценность, реализация работы и краткое содержание работы.

В первой главе «Обзор литератур по взаимодействию токоприемника и контактной подвески» представлен источники научно-технической литератур по взаимодействию токоприемника и контактной подвески. После того приведен Общие сведения о токоприемниках ЭПС и контактных сетях электрического транспорта. Приведен особенности токосъема при высоких скоростях движения.

В конце главы обосновываются задачи исследований.

Во второй главе «Взаимодействие с токоприемниками при токосъеме» приводятся общие сведения и определения и критерии качества токосъема. В конце главы приводятся обобщающие выводы.

В третьей главе «Расчеты взаимодействия токоприемника и контактной подвески» приводятся обобщенные расчетные схемы токоприемников и контактных подвесок; сосредоточенные параметры контактных подвесок и их определение; расчет жесткости (эластичности) простых и цепных подвесок; приведенная масса подвесок. Дальнейшим

было определены распределенных параметров контактных подвесок; волновые уравнения взаимодействия нескольких токоприемников и контактной подвески; косвенные параметры контактных подвесок, взаимодействующих с токоприемниками. Рассчитаны токосъема для токоприемников с двумя степенями свободы, с учетом контактных подвесок с сосредоточенными параметрами.

В конце главы сделаны выводы о том, что с увеличением скоростей движения свыше 200 км/ч использование сосредоточенных параметров нецелесообразно.

В четвертой главе «Моделирование взаимодействия контактной подвески и токоприемника» приводится определение задачи, решаемые при моделировании. После этого было составлено схема замещения токоприемника и изучены вопросы моделирования с использованием связанных масс и жесткостей между точками соединения. При этом допускалось учет пружины и массы, что позволило рассчитывать любую подвеску, состоящую из масс, проводов и пружин. Составлено алгоритм определение сил контакта отжатый метод итераций. Выполнено анализ процессов дугообразования при нормальном токосъеме и его нарушениях, вызванных различными причинами, применительно к специфическим условиям электрифицированной железной дороги; Разработана аналитическая модель нормального токосъема с использованием системы нелинейных уравнений для определения количественных характеристик электромагнитных излучений в данном режиме эксплуатации.

В заключении работы приводятся выводы и рекомендации, список использованной литературы.

I ГЛАВА

ОБЗОР ЛИТЕРАТУР ПО ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ТОКОПРИЕМНИКА И КОНТАКТНОЙ ПОДВЕСКИ

1.1. Обзор литератур по взаимодействию токоприемника и контактной подвески

С ростом скоростей движения поездов на электрифицированных дорогах “УТЙ” ГАЗК исследование взаимодействия токоприемника и контактной сети приобретает все более важное значение, так как без этого невозможно определить условия, необходимые для удовлетворительного токосъема [1, 2, 24, 25, 30, 32]. Отсутствие высокоскоростного электроподвижного состава ЭПС и соответствующей регистрирующей аппаратуры не позволяло вплоть до 1956 г. производить какие-либо экспериментальные работы в этом направлении при скоростях движения более 110 км/ч. Поэтому при проектировании контактной сети механическое воздействие токоприемника учитывали, основываясь исключительно на теоретических работах, главным образом на трудах И.И. Власова, К.Г. Марквардта, Г.Г. Марквардта, А.В. Воронина, Л.А. Вислоуха[9, 12, 20].

За рубежом разработкой вопросов взаимодействия токоприемника и контактной сети занимались Б. Финк, И. Бейер, Ф. Нитхаммер, Б. Лангер, Г. Ниблер, И. Геттингер, М. Зюберкрюб, А. Чиприани, В. Бюкнер и др [11, 21, 23, 28].

Принципиально все известные работы в области исследования динамики токосъема можно отнести к одной из трехосновных групп. К первой группе относятся работы, в которых контактную подвеску принимают абсолютно жесткой, а источниками колебаний считают неровности контактного провода, например, работы Б. Финка, И. Бейера, Ф. Нитхаммера, И. Геттингера [28]. Ко второй группе могут быть отнесены работы, посвященные взаимодействию токоприемника и простой

(трамвайной) контактной подвески, в которых контактный провод рассматривается как - жесткая нить, например, работы Г.Г. Марквардта и В. Бюкнера [19]. Третью группу составляют работы, в которых контактную подвеску и токоприемник рассматривают как колебательную систему с одной степенью свободы. При этом считают, что контактная подвеска обладает определенной периодически изменяющейся эластичностью. К этой группе относятся работы Г. Ниблера А. Чиприани И.И. Власова, А.В. Плакса [12, 13].

Пока на электрифицированных железных дорогах скорости движения поездов не превышали 100-110 км/ч, имевшиеся в то время результаты теоретических и в небольшом объеме экспериментальных исследований взаимодействия токоприемника и контактной сети были достаточными для определения оптимальных параметров обоих устройств. Когда же скорости движения стали выше, этих исследований оказалось недостаточно. Неизбежные допущения при аналитических решениях такой сложной системы, как контактная сеть-система с распределенными параметрами и бесконечным числом степеней свободы, снижают достоверность расчетов и тем в большей степени, чем выше заданные скорости движения.

Стройной математической теории, которая позволила бы путем расчета исследовать влияние отдельных факторов на токосъем с целью отыскания наивыгоднейших технических решений и параметров устройств, до сих пор нет. И поэтому, хотя для исследования взаимодействия токоприемника и контактной сети использовали вычислительные машины и моделирующие установки, основным при изучении токосъема в настоящее время повсеместно стал экспериментальный метод.

1.2. Общие сведения о токоприемниках ЭПС

Токоприемники (энергополучатели) – аппараты ЭПС, предназначенные для приема электроэнергии от контактных проводов (токопроводов). Они

могут быть контактными, квазиконтактными, бесконтактными. Конструкция токоприемников и их характеристики определяются мощностью и скоростью ЭПС, габаритами подвижного состава и приближения строений, расположением контактных проводов в плане и по высоте. Токоприемники должны обеспечивать надежный (без повреждений), экономичный (с минимальным износом контактирующих элементов) и экологичный токосъем. По величине токовой нагрузки их делят на два типа: тяжелый (Т) и легкий (Л). Комплексы конструктивных элементов, входящих в состав контактных токоприемников, подразделяют на базовые, альтернативные и дополнительные (рис.1.1.).

В базовый комплекс входят элементы, необходимые для участков, электрифицированных как на постоянном, так и на переменном токе: система подвижных рам; подъемно-опускающий механизм (привод); основание и управляющие системы [6, 7, 8].

К альтернативным относят специфические элементы для постоянного или переменного тока, а также для электровозов или электропоездов: каретки; полозы; контактирующие, токопроводящие и изолирующие элементы. Комплексы базовых и альтернативных элементов содержат все токоприемники отечественного ЭПС.

Дополнительные элементы используют для повышения эксплуатационных свойств токоприемников: скорости, надежности, экономичности и экологичности. На железных дорогах применяют токоприемники тяжелого и легкого типа магистрального ЭПС (рис.1.2, а, б): а - пантограф (токоприемник тяжелого типа Т-5); б - симметричный полупантограф (токоприемник легкого типа Л-1 ЗУ, Л-14М). Для повышенных скоростей движения используют специальные токоприемники: токоприемник Сп-бМ пантографного типа с параллелограммным подвижным основанием (рис.1.2, в); штанговый токоприемник с резино-кордным упругим элементом в подъемно-опускающем механизме (рис.1.2,г); асимметричный полупантограф фирмы «Дорнье» О5А-350 с аналогичным приводом (рис.1.

2, д). К основным узлам токоприемников относятся: контактные элементы (медные, металлокерамические, угольные); несущие конструкции полозов (рамные или сплошные) с рогами; каретки полозов; системы подвижных рам; подъемные упругие элементы; демпфирующее устройство; пневматический цилиндр с опускающей пружиной и рукавом; основание с изоляторами; управляющие элементы (клапаны); аэродинамическое устройство; нижняя система рам и авторегулятор ее высоты (см. рис.1.1).

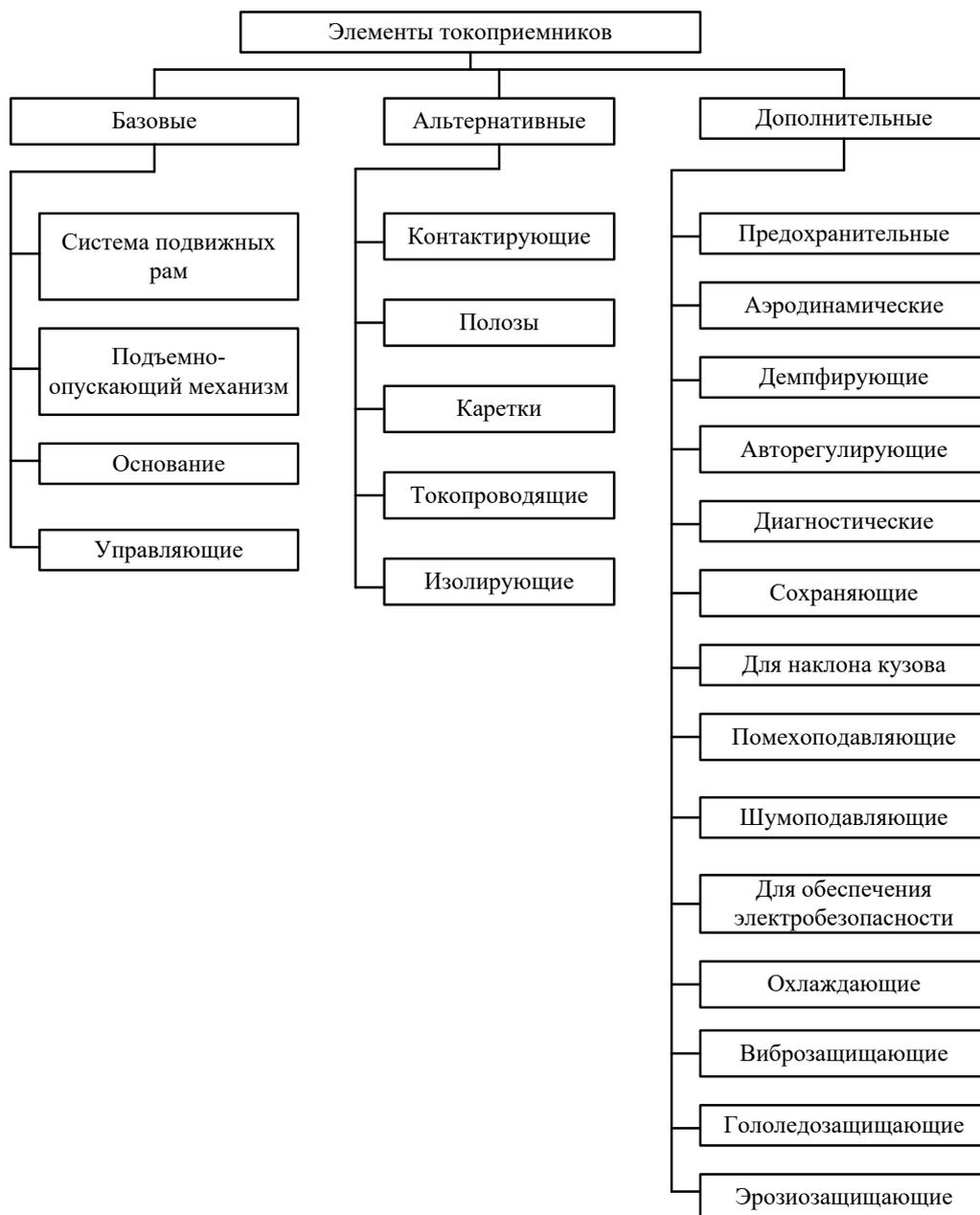


Рис. 1.2. Классификация элементов токоприемников

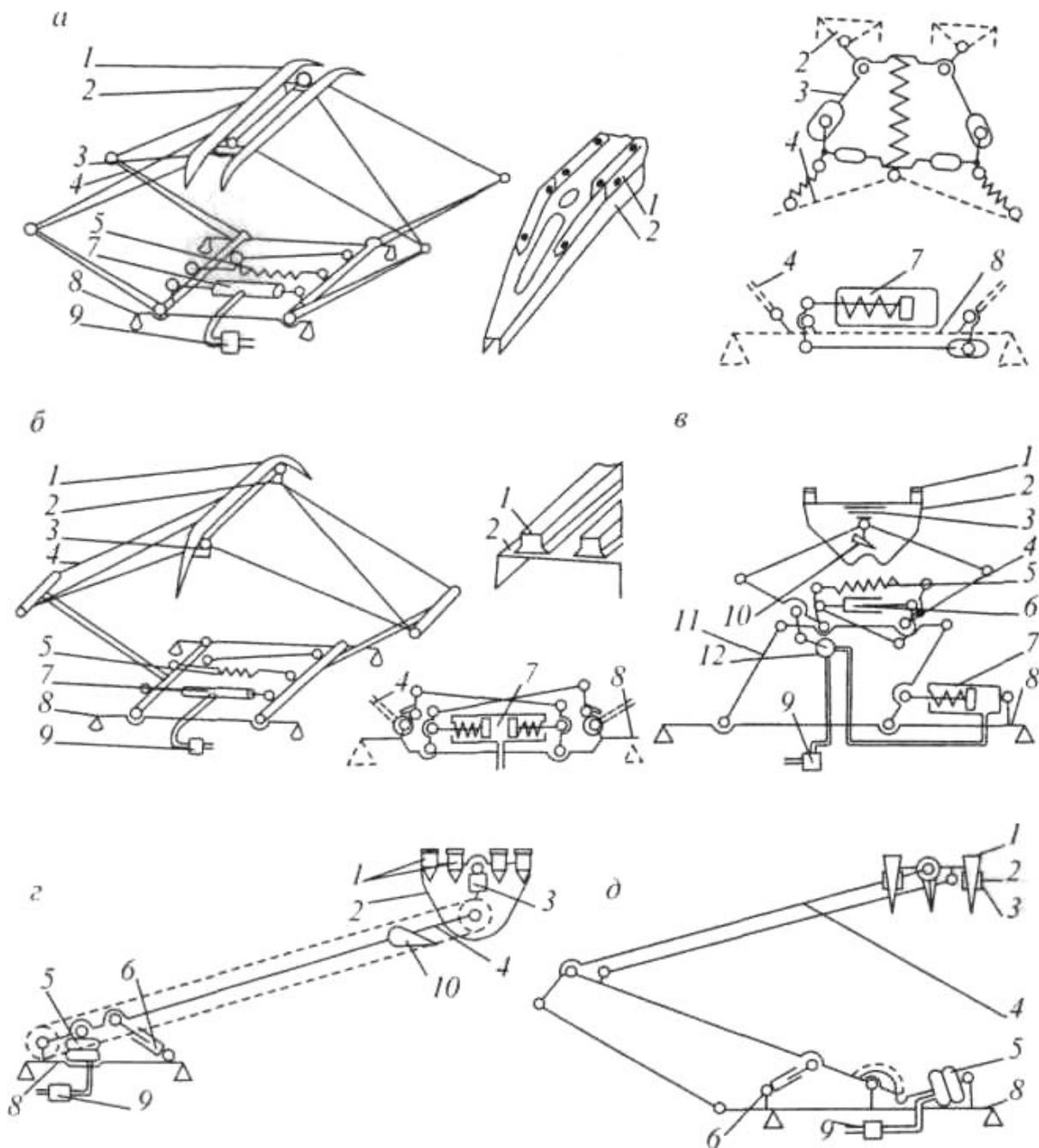


Рис.1.2. Схемы токоприемников ЭПС: магистральных (а. б): высокоскоростных специальных (в. г, д): 1 - контактные элементы; 2 - несущие конструкции полозов; 3 - каретки полозов; 4 - системы подвижных рам; 5 - подъемные упругие элементы; б - демпфирующее устройство; 7 - пневматический цилиндр с опускающей пружиной и рукавом; 8 - основание с изоляторами; 9 - управляющие элементы; 10 - аэродинамическое устройство; II - нижняя система рам; 12 - авторегулятор высоты нижней системы рам

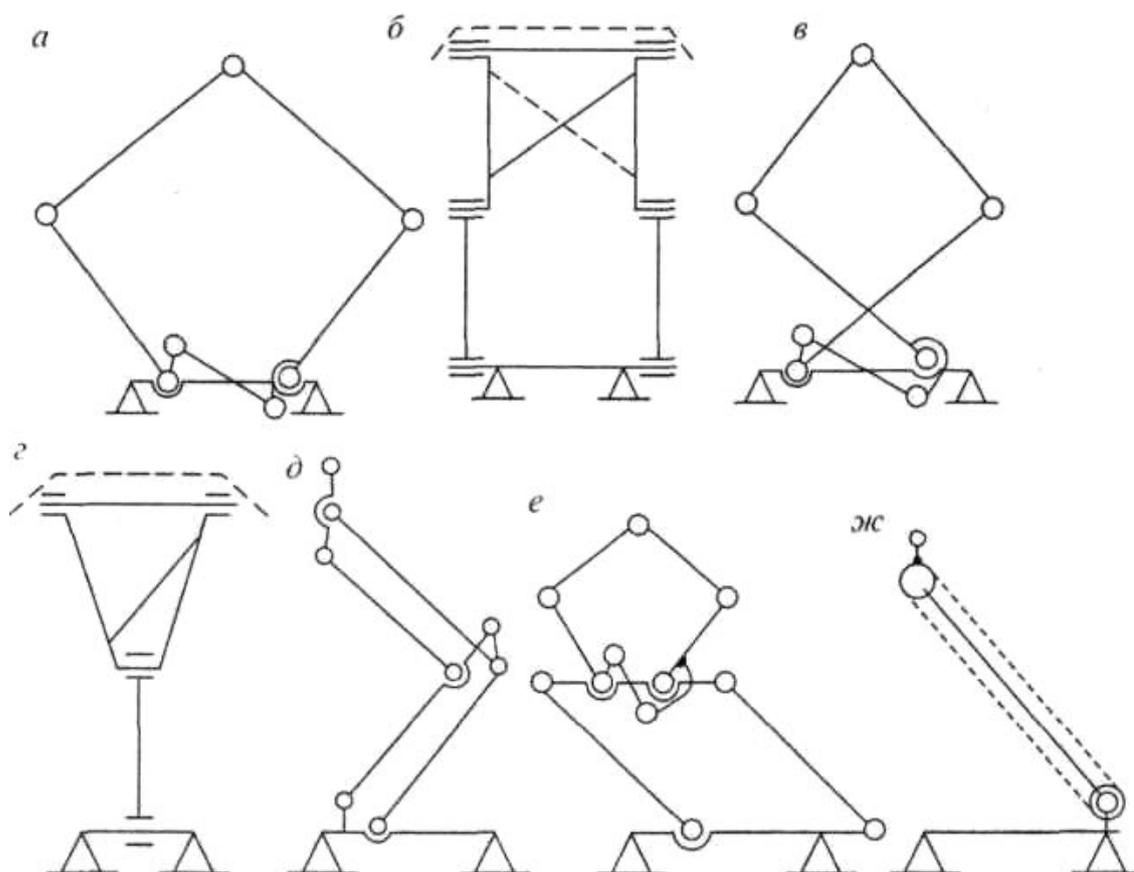


Рис.1.3. Основные схемы систем подвижных рам токоприемников: ромбические {а. б) и X-образные (в) пантографы; симметричные (г) и асимметричные (д) полупантографы: с подвижным основанием (е) и штанговые с тросовой или цепной передачей {жс)

Система подвижных рам предназначена для обеспечения надежного контакта полозов (лыж) токоприемника с контактными проводами при изменении высоты последних в заданных пределах. Для магистральных железных дорог эта высота составляет 5550 – 6900 мм. Диапазон рабочих высот токоприемника (400 – 1900 мм) определяет размеры его конструкции [5].

Основные схемы систем подвижных рам токоприемников могут быть классифицированы следующим образом: пантографы; полупантографы симметричные; полупантографы асимметричные; штанговые токоприемники и токоприемники с подвижным основанием.

В России наиболее распространены и длительное время эксплуатируются *ромбические пантографы* типа ДЖ-5, П-1, П-3, Т-5, 10РР, 17РР, 25Б5-1 и др. (рис.1.3, а, б). В Японии для экономии места на крыше ЭПС применяют Х-образные (рис.1.3, в) пантографы. Главные валы пантографа соединяют между собой тягой антипараллелограмма, обеспечивающей их синхронный поворот, и как следствие, вертикальное перемещение верхних шарниров.

Конструкция *симметричных полупантографов* (рис.1.3, г) дает возможность уменьшить габариты основания токоприемника и его металлоемкость. Однако при этом появляется повышенная нагрузка на подшипники средних шарниров. К таким полупантографам относятся токоприемники типа П-7, Л-13У, Л-14М и др.

Асимметричные полупантографы нашли широкое применение за рубежом. По сравнению с симметричными, они обладают меньшей массой и габаритами. Такие токоприемники активно внедряет французская фирма «Faiveley». В России разработаны токоприемники такого типа ПН-2 для электровоза ВЛ-41, Тас-11 для ЭП-200, ТП-250 для поезда «Сокол» и СВАРЗ - для трамвая (рис.1.3, д). Они эффективны в случае применения высокопрочных материалов и точной технологии.

Штанговые рамы токоприемников применяют для троллейбусов, трамваев, метрополитена. Они вновь привлекли к себе внимание в связи со стремлением снизить приведенную массу токоприемника, сделать его малошумным, а рамы - статически определяемыми. К недостаткам трамвайной штанги (бугеля) относится поворот контактной вставки вокруг своей оси при изменении высоты подъема. Более рациональным является вариант с цепной или тросовой передачей (рис.1.3, е), применяемый для штанговых токоприемников ТС-3М, 5М70. Они представляют собой статически определяемую конструкцию, не боящуюся перекосов, с минимальными трением и массой [6].

Токоприемники с подвижным основанием (рис.1.3, е) возникли в связи со стремлением снизить приведенную массу так, чтобы обеспечить работу при скоростях свыше 55 м/с (200 км/ч). Высота подвижного основания поддерживается специальным авторегулирующим устройством, срабатывающим, например, перед входом в тоннель со сниженными контактными проводами.

1.3. Общие сведения о контактных сетях электрического транспорта

Контактные сети электрического транспорта предназначены для питания ЭПС и в зависимости от типа транспортных средств могут быть выполнены в виде:

- воздушной эластичной контактной подвески с одинарным или двойным контактным проводом верхнего расположения (электрифицированные железные дороги, трамвай, промышленный транспорт);
- то же с двумя разнополярными контактными проводами (троллейбус);
- жесткого контактного рельса (метро, монорельсовый транспорт).

На электрифицированных железных дорогах и трамвайных линиях питание ЭПС осуществляется по контактной сети в основном с верхней эластичной контактной подвеской над путями (рис. 1.4). Контактные подвески (провода) закрепляются на опорах, расположенных вдоль железной дороги, с помощью консолей или поперечин. В качестве обратного провода используются ходовые рельсы.

Специфика троллейбусной контактной сети заключается в наличии двух параллельных (разнополярных) гибких воздушных контактных подвесок с дистанционно управляемыми из кабины водителя воздушными

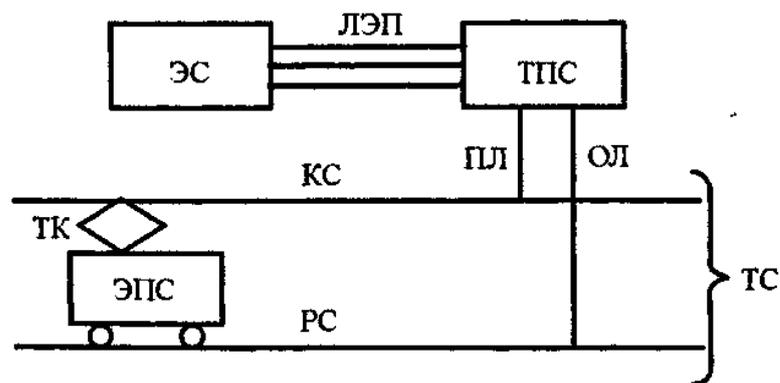


Рис. 1.4. Схема внешнего электроснабжения и питания электроподвижного состава электрической железной дороги: ЭС - электрическая станция; ЛЭП - линия электропередачи; ТПС - тяговая подстанция; ПЛ - питающая линия; ОЛ - отсасывающая линия; КС - контактная сеть; ТК - токоприемник; РС - рельсовая сеть; ЭПС - электроподвижной состав; ТС - тяговая сеть

стрелками. Токоприемники троллейбусов выполнены в виде поворотных штанг с направляющими токосъемными башмаками и ловителями, срабатывающими при сходе башмаков с контактных проводов. В местах пересечения троллейбусных проводов с трамвайными устанавливают специальные секционные изоляторы, в которых токоприемники трамваев проходят под троллейбусными проводами по инерции (по воздуху).

В метрополитене в качестве контактного провода используется третий (четвертый) рельс, а в качестве обратного провода – ходовые рельсы. В местах стрелочных переводов контактные рельсы прерываются, превращаясь в концевые отводы, или их нижняя поверхность разворачивается в сторону оси пути (токоприемника), образуя боковой отвод. Токоприемники выполняются в виде рычагов с контактными башмаками на одних концах и шарнирными основаниями с пружинами на других. Основания устанавливаются на изоляторах или деревянных брусках, закрепленных на буксах колесных пар вагона (рис. 1.5).

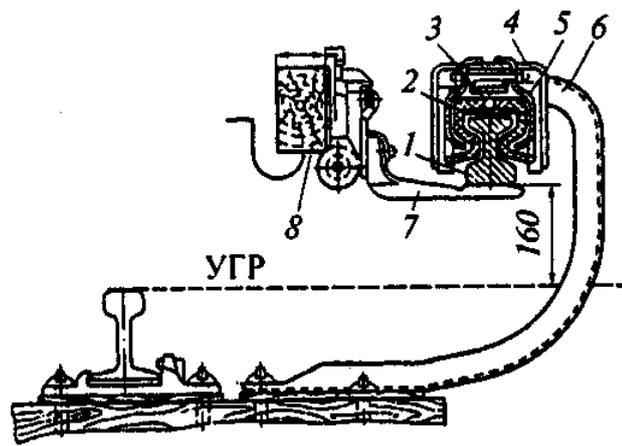


Рис. 1.5. Схема расположения контактного рельса метрополитена: 1 – контактный рельс; 2 – изоляторы; 3 – резиновый шнур; 4 – деревянный короб; 5 – скоба; 6 – кронштейн; 7 – контактный башмак; 8 – деревянный брус

Применяется токосъем с верхней и боковой поверхностей контактных токопроводов.

В монорельсовом транспорте подвижной состав перемещается по бетонной эстакаде. Контактные рельсы крепятся к вертикальным стенкам балок-эстакад. К ним прижимаются контактные башмаки токоприемников, закрепленных на кузовах вагонов. Все элементы токоприемников работают в сложных аэродинамических потоках в пространстве «экипаж – эстакада» (рис. 1.6).

В случае применения магнитного подвеса условия еще больше усложняются в связи с тем, что высота кузова при «всплытии» (подъеме) периодически изменяется относительно уровня эстакады. Токоприемник должен отслеживать суммарные изменения высотного положения рельсов и подъема (всплытия) экипажа. На стрелках эстакада поворачивается в горизонтальной плоскости вместе с рельсами или ее секция вместе с экипажем перемещается трансбордером (рельсовой тележкой).

Известно переворачивание эстакады на стрелках на 180° относительно продольной оси [7].

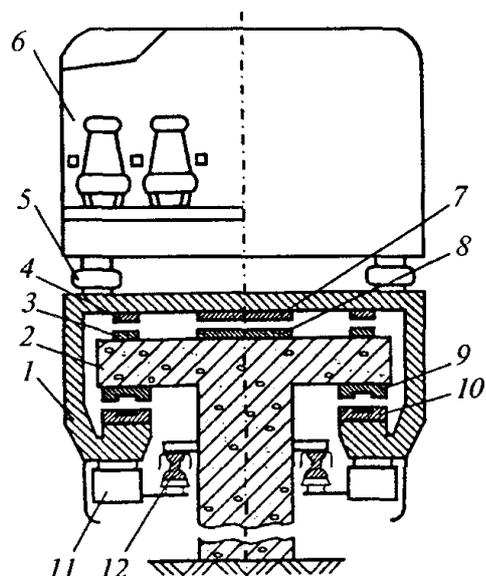


Рис. 1.6. Особенности системы токосъема монорельсового транспорта на магнитном подвесе: 1 – тележка вагона; 2 – Т-образная эстакада; 3 – опорные рельсы; 4 – посадочные упоры; 5 – элементы подрессоривания; 6 – кузов; 7 – линейный двигатель; 8 – реактивная шина; 9 – феррорельс; 10 – электромагниты подвеса; 11 – токоприемник; 12 – контактный рельс с изолятором

Составить общее представление об устройстве контактной сети электрифицированных железных дорог можно, рассмотрев ее основные элементы (**рис. 1.7**).

Контактная сеть – это часть электротяговой сети, состоящая из контактных подвесок с проводами или жестких рельсов вместе с расположенными вдоль электрифицированных путей опорно-поддерживающими, изолирующими, защитными, секционирующими и диагностическими устройствами и служащая для подвода электрической энергии к подвижному составу через непосредственные контакты с его токоприемниками. Среди элементов, образующих электрифицированную железную дорогу, на устройства контактных сетей приходится до 30 – 45 % капиталовложений. Контактные сети не имеют резерва, поэтому от них в значительной степени зависит безопасность движения поездов и требуется очень высокая надежность, особенно при обеспечении международных перевозок [16, 30].

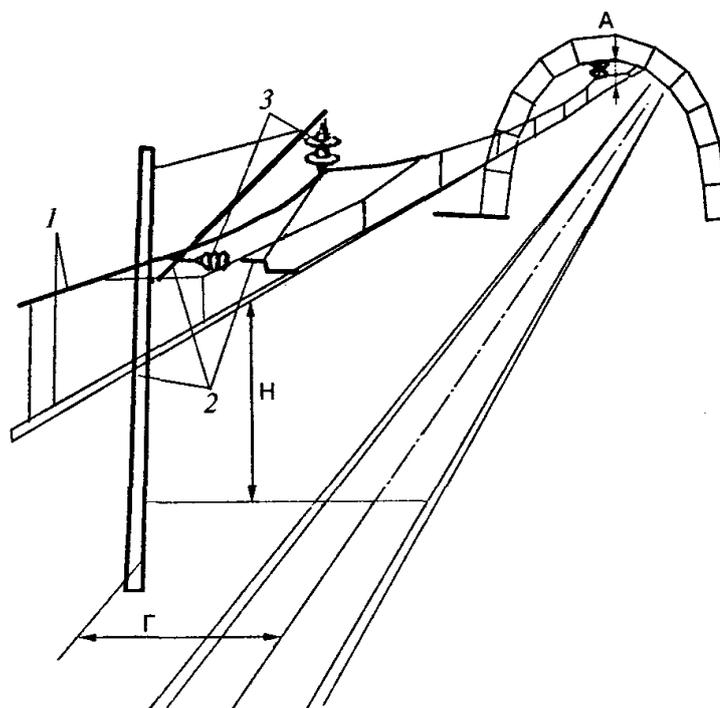


Рис. 1.7. Основные элементы контактной сети и размеры, характеризующие ее размещение относительно других постоянных устройств магистральных железных дорог: 1 – подвеска контактной сети; 2 – опора, консоль, фиксатор; 3 – изоляторы.

Габариты: Г - опор; Н - проводов; А - заземленных искусственных сооружений

Основные требования к контактным сетям – передача (канализация) электроэнергии и обеспечение надежного, экономичного и экологически чистого токосъема в расчетных метеоусловиях при установленных максимальных скоростях движения, типах токоприемников и значениях токов ЭПС. Эти положения закладываются в технических условиях для конкретных типов контактных сетей по всем их подсистемам. Так, например, для сети КС-200 устанавливается срок службы изоляторов 30 лет, для контактных проводов – по износу, для остальных устройств – 50 лет. Оговариваются типы контактных подвесок на перегонах и станциях, коэффициент неравномерности жесткости (эластичности), конструктивная высота подвесок и т.п.

Кроме того, для облегчения корректировки документации контактной сети, повышения четкости спецификации рабочих чертежей, а также для обеспечения возможности компьютерной систематизации чертежей и оперативности оформления и учета поставок элементов и узлов техническая документация контактной сети ряда КС-200 маркируется буквами латинского алфавита (А-І) и цифрами (КС 100000000 – КС 900000000), в том числе чертежи фундаментов и анкеров обозначаются буквой А, опор и стоек – В, поперечных устройств контактной подвески – С, продольной контактной подвески – D, усиливающих и питающих линий – Е, разъединителей и разрядников – F, заземлений и обратных проводов – G, монтажных агрегатов – H, деталей разного назначения – І.

Условия работы. На условия работы контактных сетей влияют три группы факторов: климатические, конструктивные и эксплуатационные.

К основным климатическим факторам, которые необходимо учитывать при проектировании и эксплуатации, относятся: температура воздуха, скорость ветра, толщина стенки гололеда, влажность воздуха (туман, дождь), интенсивность солнечной радиации, плотность абразивных (пыль, песок) и химически активных частиц в воздухе, наличие биологических организмов и насекомых, особенности грунта (вечная мерзлота и т.п.).

Конструктивные факторы для контактных сетей определяются зависимостью от рельсовой колеи и воздействием ЭПС. К ним относятся: малые допуски на горизонтальные и вертикальные габариты контактных проводов, отсутствие резерва питания ЭПС, вибрационное воздействие ЭПС на фундаменты и изоляторы, изнашивание контактных проводов, вероятность отжига и пережога проводов при токосъеме, возникновение блуждающих токов от перемещающегося ЭПС, необходимость пропуска поездов при обслуживании сетей. Дополнительные конструктивные сложности возникают в тоннелях из-за ограничений вертикальных габаритов для контактной подвески и необходимости размещения грузовых компенсаторов.

К факторам, облегчающим эксплуатацию контактных сетей, относятся: возможность монтажа, обслуживания и восстановления рельсового пути, а также наличие протяженного заземлителя – рельсов.

Основные габариты. Все подсистемы контактных сетей должны соответствовать требованиям габаритов приближения строений и подвижного состава. В верхнем зазоре между этими габаритами должны помещаться контактные провода и токоприемники.

Габарит приближения строений – предельное поперечное (перпендикулярное оси пути) очертание, внутрь которого не должны заходить никакие части сооружений и устройств, расположенных вдоль железнодорожного пути, на самом пути или при его пересечении, а также лежащие вдоль пути материалы, запасные части, оборудование, в том числе и на территории станций. Для магистральных железных дорог общей сети с колеёй 1520 мм, а также для подъездных путей с такой колеёй принят габарит С. Для путей на территории промышленных предприятий установлен облегченный габарит C_{II} . Габариты С и C_{II} корреспондируются с габаритом подвижного состава Т и применяются при строительстве новых железных дорог, сооружений и устройств.

1.4. Особенности токосъема при высоких скоростях движения

Скорости движения свыше 160 км/ч стали реальными на многих электрифицированных дорогах мира. На отдельных дорогах “УТЙ” ГАЖК они достигли и даже превысили 200 км/ч. В этих условиях исследование токосъема приобретает особую актуальность, и прежде всего в направлении определения наибольших допустимых скоростей движения по условиям токосъема при существующих конструкциях контактных подвесок и токоприемников [7, 10, 26].

Как видно из упрощенной схемы взаимодействия токоприемника и контактной подвески, высокие скорости оказывают существенное

воздействие на диапазон изменений контактного нажатия из-за квадратичной зависимости от скорости движения как аэродинамической, так и динамической составляющих его.

Действительно, аэродинамическая подъемная сила токоприемника

$$P_y = k_a v^2,$$

где k_a - аэродинамический коэффициент пропорциональности.

Динамическая (инерционная) составляющая контактного нажатия пропорциональна ускорению, получаемому приведенной массой токоприемника в вертикальном направлении. Если считать траекторию полоза изменяющейся по синусоидальному закону ($y = A \sin \omega t$), то вертикальная скорость перемещения полоза токоприемника

$$v_T = dy/dt = \omega A \cos \omega t,$$

а ускорение

$$\varpi = \frac{d^2 y}{dt^2} = -\omega^2 A \sin \omega t = -\omega^2 y,$$

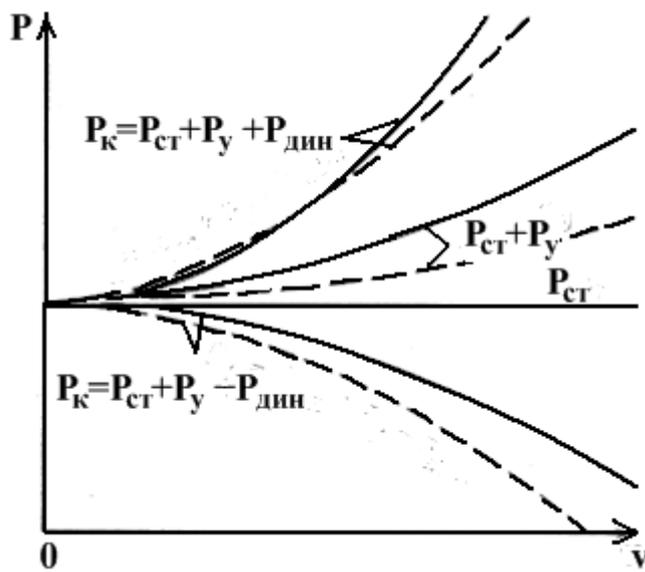


Рис.1.8. К исследованию условий нарушения контакта между полозом и проводом

где ω - частота вертикальных колебаний токоприемника; в пролете l частота $\omega = 2\pi v/l$; y - вертикальное перемещение полоза.

Поэтому

$$P_{дин} = -m_T \frac{4\pi^2 v^2}{l^2} y,$$

т.е. динамическая составляющая действительно пропорциональна квадрату скорости движения подвижного состава.

В зависимости от знака ускорения динамическая составляющая может быть или положительной,

или отрицательной, т.е. вызвать увеличение контактного нажатия или уменьшение его (рис.1.8). При определенных скоростях движения ЭПС, контактное нажатие в моменты отрицательных динамических составляющих может оказаться равным нулю, т.е. контакт между ползком и проводом может нарушиться.

Для предупреждения отрывов можно, во-первых, увеличить статическое нажатие (см. рис.1.8), где оно условно показано постоянным (силы трения в токоприемнике не учитываются), во-вторых, уменьшить динамическую составляющую и, в третьих, усилить рост аэродинамической подъемной силы при увеличении скорости движения.

Статическое нажатие во многом определяет степень износа контактных проводов и контактных элементов токоприемника: при малых его значениях усиливается электрический износ, при больших - механический. Наименьший износ имеет место при некотором среднем нажатии, являющемся оптимальным. Из условия экономичности токосъема необходимо, чтобы на большей части пути ЭПС, среднее контактное нажатие ненамного отличалось от оптимального. Поскольку же, очевидно, на большей части пути скорость движения не превышает $\frac{3}{4}$ наибольшей (конструкционной) скорости, можно заключить, что увеличение статического нажатия приведет к усилению интенсивности износа контактирующих элементов на всем участке. Кроме того, увеличение контактного нажатия до наибольших значений при высокой скорости (из-за увеличения статического нажатия) может привести к таким отжатию контактного провода, при которых не исключены удары ползков по фиксаторам. Поэтому увеличение статического нажатия нельзя считать приемлемым способом для устранения отрывов в режиме движения с высокой скоростью [8].

Динамическая составляющая контактного нажатия должна быть как можно меньшей, поскольку это обеспечивает не только увеличение скорости движения, при которой начинаются отрывы (так как увели-

чивается контактное нажатие при отрицательных $P_{дин}$), но и уменьшение отжатый контактного провода и износа при высоких скоростях (так как уменьшаются наибольшие контактные нажатия при положительных $P_{дин}$).

Динамическая составляющая, как видно из предыдущей формулы, может быть уменьшена снижением приведенной массы токоприемника и вертикальных перемещений полоза в пролетах или увеличением длин пролетов. Увеличение длин пролетов ограничено условиями обеспечения необходимой ветроустойчивости контактной подвески. Уменьшению вертикальных перемещений полоза в пролетах способствует более высокое постоянство эластичности контактной подвески и ее массы, а в условиях съема тока несколькими токоприемниками-также более высокие демпфирующие свойства контактной подвески и токоприемников.

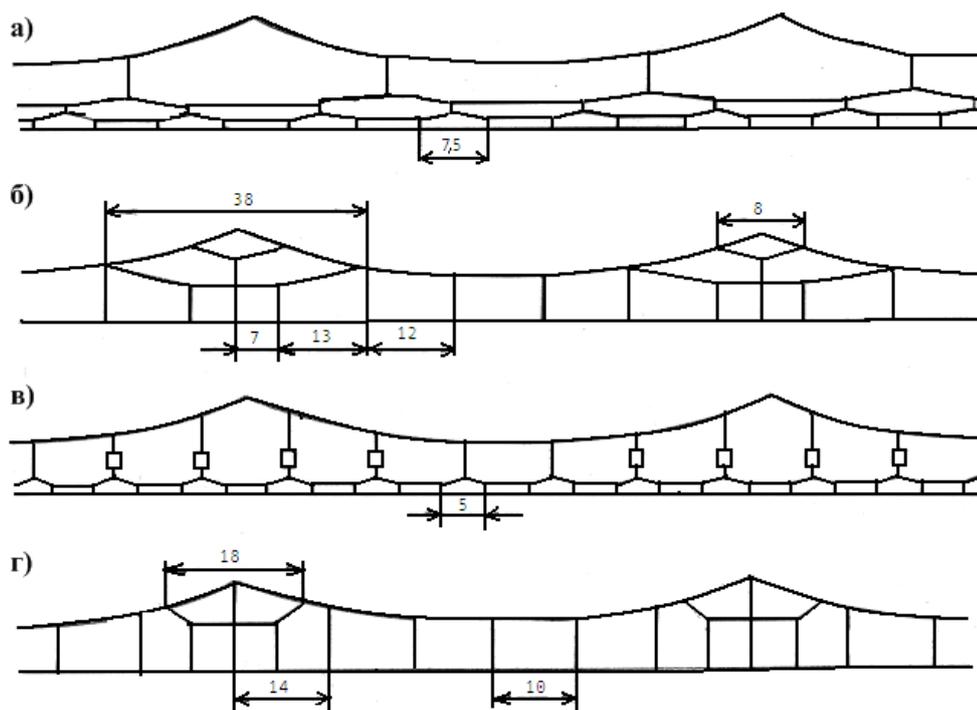


Рис.1.9. Схемы контактных подвесок для высокоскоростного движения:

а - японская тройная компенсированная подвеска; *б*-подвеска Государственных железных дорог ФРГ с двумя рессорными проводами в опорной точке; *в* – японская двойная компенсированная подвеска с демпферами; *г*- советская одинарная компенсированная подвеска с ограничительными струнами

Выше было отмечено, что отрицательное влияние непостоянства эластичности контактной подвески в пролетах на качество токосъема в значительной мере может быть уменьшено подвешиванием контактного провода с небольшой положительной стрелой провеса. Однако исследования английских и итальянских специалистов [43], а также последние исследования, проведенные во Франции, показали, что это справедливо только для условий движения ЭПС, со скоростями до 170-200 км/ч. При более высоких скоростях траектория полоза даже при наличии положительной стрелы провеса провода в подвеске с непостоянной эластичностью не останется прямолинейной, поскольку точка наибольшего отжатия контактного провода, перемещающаяся с ростом скорости из середины пролета к следующей по ходу опоре, удаляется от середины пролета на значительное расстояние. В результате начальный провес контактного провода не только не уменьшит размах вертикальных колебаний полоза в пролете, но еще больше увеличит его и длительность нарушений контакта возрастет (рис.1.8). А это означает, что для условий движения со скоростями выше 170км/ч контактные подвески должны быть обязательно равноэластичными, т.е. иметь $k_{эл} = 1$.

Аэродинамическая подъемная сила токоприемника - это один из параметров, изменением которого можно предотвратить отрывы токоприемника. Действительно, если увеличение аэродинамической подъемной силы P_y с ростом скорости движения сделать более существенным, то графики контактного нажатия в зоне высоких скоростей заметно поднимутся и нулевая ордината P_k будет иметь место при более высокой скорости движения (см. рис.1.9). Задавшись наибольшей скоростью (при которой P_k должно быть еще больше нуля), можно найти необходимую аэродинамическую силу.

Многочисленные экспериментальные исследования, проведенные в нескольких странах, показали, что при наибольшей скорости 200км/ч аэродинамическая подъемная сила должна составлять 4-8 кгс для

токоприемников ЭПС, переменного тока. Большие значения нежелательны, поскольку чрезмерное увеличение контактного нажатия (в моменты положительных значений динамических сил) может приводить к таким подъемам контактного провода в опорных точках, при которых не исключены удары полозов по фиксаторам.

На основании приведенного анализа составляющих контактного нажатия можно заключить, что наиболее целесообразными способами улучшения токосъема при высоких скоростях являются уменьшение приведенной массы токоприемника и выравнивание эластичности контактной подвески в пролетах. Другие же способы из-за их недостатков менее желательны.

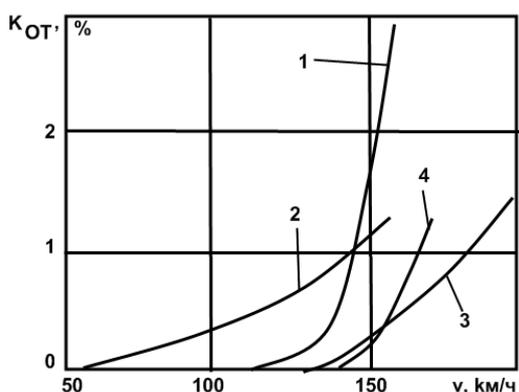


Рис.1.10. Зависимости между коэффициентами отрыва (для заднего токоприемника электровоза) и скоростью движения для японских подвесок: тройной (1), двойной рессорной (2), двойной с демпферами (3) и двойной нерессорной (4)

В условиях моторвагонной тяги, когда на контактную подвеску одновременно воздействует несколько токоприемников поезда, расположенных на значительном расстоянии один от другого, необходимо принимать меры, уменьшающие взаимное влияние токоприемников, например увеличить расстояние между ними. При этом следует исключить, конечно, тот вариант, когда расстояние между токоприемниками несущественно отличается от длины волны свободных колебаний контактной подвески, при котором из-за синфазности возбуждения амплитуды вертикальных колебаний

полоза могут оказаться весьма большими. Следует также уменьшить приведенную массу токоприемников, установить гасители колебаний (демпферы) на токоприемники и контактную подвеску, т.е. искусственным

путем увеличить внутреннее трение в колебательной системе «токоприемник - контактная подвеска».

Увеличение внутреннего трения особенно необходимо в контактных подвесках, у которых для повышения эластичности в опорных узлах в струны включены спиральные пружины, как это принято, например, в японской двойной подвеске.

Установка в каждом пролете японской подвески четырех гасителей колебаний-демпферов (см. [рис.1.10, в](#)) -с коэффициентом демпфирования $30,2 \text{ кгс} \cdot \text{с/м}$ позволила значительно уменьшить амплитуды колебаний полоза, особенно в зонах критических скоростей, и уменьшить длительность нарушений контакта (коэффициент отрыва $k_{от}$) при высоких скоростях движения ([рис.1.9](#)). Однако, несмотря на положительный эффект, контактная подвеска с пружинно-воздушными демпферами, кроме Японии, распространение нигде не нашла из-за сложности примененных демпферов и больших затрат на их обслуживание.

Для повышения демпфирующих свойств одинарных компенсированных подвесок разработан простой, но достаточно

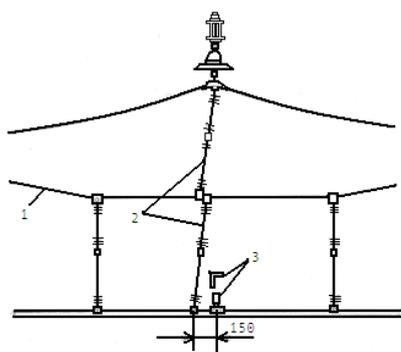


Рис. 1.11.

Опорный узел рессорной компенсированной подвески с ограничительной струной: 1 - рессорная струпа; 2- ограничительная струна; 3-фиксатор.

эффективный способ, заключающийся в оборудовании опорных узлов подвески наряду с рессорными струнами простыми (ограничительными) струнами ([см.рис.1.10, з](#)).

Дополнение рессорной подвески ограничительными струнами ([рис. 1.11](#)), не нагруженными в свободном состоянии, но препятствующими контактному проводу при колебаниях, занимать более низкое по высоте положение, чем то, которое было до начала колебаний, приводит к увеличению логарифмического декремента колебаний

подвески в 2,3 раза.

Установка гасителей колебаний (демпферов) на токоприемники получила значительное распространение на высокоскоростном ЭПС, западноевропейских стран.

Увеличение скоростей движения вызвало определенную трудность в выборе материала контактных элементов полоза, что объясняется большим искрением (несмотря на принимаемые меры по стабилизации контактного нажатия) и увеличением нагрева контактных элементов из-за длительности больших токов и трения в скользящем контакте [16].

В общем виде, по результатам японских исследований, рост скоростей движения приводит к уменьшению среднего износа контактных проводов и увеличению его неравномерности; средний износ контактных элементов токоприемника в этих условиях резко увеличивается. Главное, на что обратили внимание японские специалисты, исследовавшие износ при высоких скоростях, это необходимость учета разницы в состоянии скользящего контакта при движении на большой скорости и в режиме малых скоростей съема малых токов.

1.5. Контактные подвески и токоприемники для высокоскоростных линий

Контакт между проводом и токоприемником является важнейшим элементом электрической тяговой системы, от которого зависит надежность эксплуатационного процесса. В высокоскоростном движении им определяются границы увеличения тяговой мощности.

Система токоприемник- контактный провод предназначена для непрерывной передачи необходимой электрической мощности с соблюдением допусков, определяющих качество токосъема. При этом должна гарантироваться надежная работа во всех эксплуатационных режимах.

Одним из важных критериев надежной работы является свободное прохождение токоприемника, т.е. при движении поезда должны быть исключены удары токоприемника об элементы подвески под действием их динамических перемещений. Не допускаются электромагнитные влияния процесса токосъема, обуславливаемые возникновением электрической дуги, на внешние устройства.

Место нажатия токоприемника на контактный провод представляет собой скользящий контакт между двумя колеблющимися элементами, который перемещается с большой скоростью. При этом через него передается большая электрическая мощность. В высокоскоростном движении могут использоваться поезда мощностью до 20 МВт. Для оценки безопасности и эксплуатационной надежности установлены граничные величины геометрических, механических и электрических параметров, а также разработаны методы их проверки.

Геометрические параметры. Для обеспечения надежной эксплуатации контактная сеть проектируется таким образом, чтобы контактный провод при всех эксплуатационных условиях контактировал с ползцом токоприемника в определенной рабочей зоне. При этом следует учитывать боковое смещение контактного провода относительно оси пути (зигзаг) и перемещения токоприемника относительно пути. Последние обусловлены кинематическими колебаниями подвижного состава и отклонениями от нормы геометрии пути. Для расчета колебаний подвижного состава разработаны специальные методики.

Важными факторами геометрического взаимодействия являются профиль контактных пластин токоприемника и боковая качка подвижного состава.

Параметры рабочей части ползца токоприемника в большой степени влияют на выбор конструкции контактной сети и величину затрат на ее сооружение. Большая рабочая часть требует увеличения пролетов между опорами и, следовательно, снижает капитальные затраты. В то же время

габаритный профиль для пропуска такого токоприемника под искусственными сооружениями или в тоннеле с учетом защитного расстояния от токоприемника до заземленных частей должен быть больше, что удорожает сооружение подвески.

В силу многих причин токоприемники на подвижном составе разных европейских стран имеют полозы разной длины: в Германии, Австрии и Испании 1950мм, в Великобритании 1600мм, во Франции и Швейцарии 1450мм.

При оценке геометрических факторов следует учитывать не только горизонтальные перемещения контактного провода по полозу, но и вертикальные колебания полоза и провода. При взаимодействии обоих элементов происходит отжатие контактного провода выше уровня беспровесного положения.



Рис. 1.12. Отжатие контактного провода под фиксатором

На рис.1.12 показан пример прохождения токоприемника с рабочей частью под фиксатором. Токоприемник смещается в сторону опоры на величину s в результате раскачивания кузова, а максимальное отжатие контактного провода при этом равно величине b . Эта величина называется предельным отжатием, допускаемым конструкцией. Для полозов с различной длиной рабочей части под контактной подвеской одного типа возможны разные значения предельного отжатия.

В нормальном режиме эксплуатации предельное отжатие не используется полностью. Здесь сохраняется резерв для особых случаев,

например неисправного токоприемника или необычных условий окружающей среды. В разработанных стандартах даны величины коэффициентов использования допустимого отжатия для различных конструкций фиксаторов.

Важным геометрическим фактором является расстояние между контактными пластинами в полозе токоприемника. Так, для беспрепятственного прохождения секционных изоляторов контактной подвески необходимо минимальное расстояние между пластинами. Для проследования поезда без отрыва токоприемника по изолирующим промежуткам, разделяющим фидерные зоны с питанием от разных фаз, необходимо, чтобы расстояние между пластинами не превышало максимально допустимого значения.

Особые требования предъявляются к движению электропоездов с несколькими поднятыми токоприемниками. Здесь должны выполняться специальные условия, в частности, чтобы поезд не мог перекрыть изолирующий промежуток, разделяющий две фазы.

Электротехнические условия. В Европе используются различные системы тягового электроснабжения. На участках постоянного тока в связи с относительно низким напряжением в контактной сети для передачи нужной мощности используются большие тяговые токи. Это сильно нагружает контактную подвеску и токоприемники [14].

На линиях, электрифицированных на переменном токе, как правило, используются легкие подвески с повышенным натяжением контактного провода, обеспечивающим более благоприятное динамическое взаимодействие подвески с токоприемником при высокой скорости движения.

На подвижном составе переменного тока применяются токоприемники с контактными вставками из электролитного графита. При этом токоприемник с двумя такими вставками способен работать при токе нагрузки до 1000А, так что максимальная тяговая мощность может быть

подведена через один токоприемник. Пара трения медный провод - угольная вставка характеризуется малым износом обоих компонентов.

Эксплуатация многосистемного подвижного состава на линиях переменного тока возможна лишь в ограниченных масштабах по ряду причин:

токоприемник с металлическими пластинами слишком тяжел и при высокой скорости имеет плохие динамические характеристики;

если подвижной состав с токоприемниками, оснащенными металлическими пластинами, попадает на линию, где в основном применяются токоприемники с угольными вставками, пластины разрушают образовавшуюся на контактном проводе графитовую пленку. Это приводит к повышенному износу контактного провода и угольных вставок.

Из сказанного следует, что для европейской сети нет также общего решения в отношении контактных элементов для токоприемников.

Динамические условия. Для того чтобы максимально уменьшить дугообразование в контакте токоприемник- контактный провод, ведущее к усиленному износу и возникновению радиопомех, стремятся к таким режимам эксплуатации, при которых обеспечивается постоянный контакт при минимальной силе нажатия.

Износ контактного провода и пластин зависит от многих факторов. Здесь играют роль не только механические силы и величина тока, но также интенсивность движения поездов и подбор материалов в паре трения. Надежных зависимостей для оценки износа в функции качества контакта не существует. Исследования, направленные на оптимизацию контакта, ведутся во многих странах. Эмпирические результаты подтверждают зависимость усиленного износа от дугообразования на токоприемнике и большой силы прижатия в контакте. При этом воздействие дуги постоянного тока более значительно из-за больших токов и повышенной устойчивости дуги постоянного тока по сравнению с дугой переменного.

Силы, действующие в контакте, и интенсивность нагрева как основные факторы износа не могут быть измерены непосредственно в точке прижатия токоприемника к контактному проводу. Для выполнения этих измерений разработаны различные методы, в соответствии с которыми силы прижатия контактной пластины измеряются в нескольких ее точках. Поскольку точное определение контактных сил возможно с помощью корректировок, выполняемых на базе последних технических разработок, параметры качества контакта в различных измерительных системах определяются по-разному.

На железных дорогах Германии (DBAG) для скорости до 250 км/ч при движении с одним токоприемником установлены следующие значения сил в контакте, Н:

Среднее <120

Максимальное 200

Минимальное 40

Стандартное отклонение ± 24

Разработаны также методы оценки воздействий на величину износа со стороны электрической дуги. Установлено, что результаты измерений в значительной степени зависят от величины тока и состояния окружающей среды.

На базе изложенных зависимостей эксперты изменили направленность разрабатываемого документа. При этом потребовалось систематизировать параметры, которые определяют режимы работы токоприемников и контактных сетей различных типов в рамках европейской высокоскоростной сети с учетом обеспечения надежности и экономической эффективности.

Европейская высокоскоростная сеть состоит из линий:

новых, рассчитанных на скорость до 250км/ч;

модернизированных под скорость 200км/ч;

прочих, отвечающих критериям TSI.

Для перспективных линий документ применим лишь в том случае, если они будут электрифицированы на переменном токе.

В документах представлены рекомендации и требования к контактным подвескам и токоприемникам для скорости более 100 км/ч с учетом современного состояния линий. Эти требования также должны выполняться при конструировании новых подвесок, токоприемников и их компонентов, а также при проектировании и сооружении новых участков высокоскоростной сети.

Важным моментом является принятие единого профиля полоза для токоприемников переменного тока (рис.1.13).



Рис.1.13.Единый профиль токоприемника для европейских линий, электрифицированных на переменном токе

Содержащиеся в документе рекомендации в отношении конструкций контактных подвесок и токоприемников разработаны с учетом современного уровня техники и опыта эксплуатации высокоскоростных линий, накопленного в разных странах.

Вывод по первой главе

1. Все известные работы в области исследования динамики токосъема можно отнести к одной из трехосновных групп: 1) контактную подвеску принимают абсолютно жесткой, а источниками колебаний считают неровности контактного провода; 2) взаимодействию токоприемника и простой (трамвайной) контактной подвески, в которых контактный провод рассматривается как - жесткая нить; 3) контактную подвеску и токоприемник рассматривают как колебательную систему с одной

степенью свободы. При этом считают, что контактная подвеска обладает определенной периодически изменяющейся эластичностью.

2. Несмотря для исследования взаимодействия токоприемника и контактной сети используется вычислительные машины и моделирующие устройств, основным при изучении токосъема в настоящее время повсеместно стал экспериментальный метод;

3. Токоприемники должны обеспечивать надежный (без повреждений), экономичный (с минимальным износом контактирующих элементов) и экологичный токосъем;

4. Контактные сети не имеют резерва, поэтому от них в значительной степени зависит безопасность движения поездов и требуется очень высокая надежность, особенно при обеспечении международных перевозок;

5. На основании приведенного анализа составляющих контактного нажатия можно заключить, что наиболее целесообразными способами улучшения токосъема при высоких скоростях являются уменьшение приведенной массы токоприемника и выравнивание эластичности контактной подвески в пролетах. Другие же способы из-за их недостатков менее желательны.

II ГЛАВА

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С ТОКОПРИЕМНИКАМИ ПРИ ТОКОСЪЕМЕ

2.1. Общие сведения и определения

Токосъем - процесс передачи электрической энергии от канализирующих ток устройств энергополучателям (токоприемникам), электрооборудованию ЭПС. Это понятие распространяется на любой вид неавтономного электротранспорта с любым способом токосъема (контактного, бесконтактного, квазиконтактного).

Надежность токосъема определяется отсутствием повреждений, связанных с задержками поездов, предотвращением ущерба от них, т.е. с обеспечением безопасности движения. К экономичности токосъема относится минимальный износ контактирующих элементов (проводов и пластин токоприемников, электродов и т.п.), т.е. ресурсосбережение дефицитных материалов (меди и т.п.). Энергосбережение при токосъеме - экономия электроэнергии на тягу поездов - осуществляется за счет снижения лобового сопротивления токоприемников. Экологичным токосъемом может быть только без больших радио- и телепомех, шумовых воздействий и засорения почвы.

Способы токосъема. При контактном способе токосъема (рис. 2.1) токопроводы могут иметь как жесткую (или полужесткую), так и гибкую конструкцию, а также специфические токосъемные или токоприемные локальные узлы (точки).

Жесткие контактные токопроводы укладывают между рельсами или подвешивают либо к своду тоннеля, либо внизу на стойках сбоку от ходовых рельсов (с верхней, нижней, боковой контактными поверхностями), а также монтируют в подземной траншее под путями или прокладывают в полимерной эластичной трубе. Токоприемники жестких контактных токопроводов имеют плоские скользящие контакты.

Полужесткие контактные токопроводы представляют собой ненапряженные балки-модули, имеющие незначительную гибкость и

упругие подвесы в опорных точках. Некоторые из модулей (например, трубчатые или штампованные профили) в нижней части имеют контактные шины или провода. В качестве токоприемников для них используют цилиндры-челноки, плоские скользящие контакты или катящиеся ролики (троллей), валики, вращающиеся щетки.



Рис.2.1. Способы контактного токосъема: контактные токопроводы и элементы токоприемников ЭПС

Гибкие токопроводы с воздушными проводами включают в себя или трубы с разрезом в нижней части, подвешенные к несущему тросу, или провода круглого, восьмеричного и грушевидного профиля сечения с продольными крепежными канавками. Профилированные контактные провода с канавками могут быть монометаллическими, биметаллическими, комбинированными из различных металлов. Их используют в различных типах простых и цепных (плоских и объемных) контактных подвесок.

К специфическим способам контактного токосъема можно отнести смонтированные между ходовыми рельсами токоприемника точки с верхними контактными поверхностями, получающими питание от кабеля при срабатывании путевых педалей, а также установленные на прямых консолях токосъемные точки с нижними контактными поверхностями,

питающимися от трехфазной ЛЭП, смонтированной на опорах контактной сети. В этих случаях токоприемники выполняются в виде длинных лыж, подвешенных вдоль подвижного состава на подвижных рамах токоприемников.

Использование контактных систем при увеличенных скоростях движения до 200-350 км/ч требуют создания и применения новых специальных контактных материалов, имеющих минимальную массу и способных снимать ток большой плотности, не отжигая при этом провода.

Бесконтактные способы токосъема (рис. 2.2) основаны на емкостном, волновом или индуктивном принципах передачи электроэнергии. Однако они требуют больших капиталовложений для создания питающей сети, источников и преобразователей энергии. Кроме того, сам процесс передачи энергии сопровождается значительными потерями. Возможно использование передачи электроэнергии с помощью лазеров. В этом случае кроме низкого КПД, добавляются сложности, связанные с поворотами прямолинейного луча на кривых участках пути. Индуктивный токосъем может применяться для обеспечения электромагнитного подвеса движущегося экипажа в случае использования синхронного линейного двигателя, обмотка которого расположена на эстакаде.

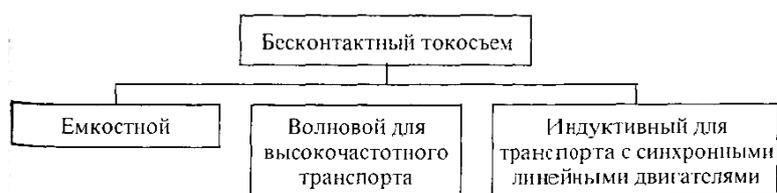


Рис.2.2. Способы бесконтактного токосъема

Квазиконтактные способы токосъема (жидкостной и электродуговой) (рис. 2.3) позволяют использовать существующую систему тягового электроснабжения без ее коренного переустройства и обладают более высоким КПД токопередачи по сравнению с бесконтактными. При жидкостном способе необходимо располагать электропроводящей

жидкостью с заданными свойствами и устройствами для образования струй и их сбора. Для электродугового способа необходимы поджигающие дуги плазматроны и авторегулирующие устройства, перемещающие дугу по электродам со скоростью, предотвращающие их износ. Переход на электродуговой токосъем целесообразен после достижения ЭПС определенной скорости. Но при этом на столб дуги начинает воздействовать воздушный поток, а также изменение тягового тока и расстояния между электродами. Перспективность применения способа определяется теоретической возможностью замены медного провода стальным и исключением необходимости стабилизации нажатия токоприемника на токопровод (достаточно стабилизации величины зазора).

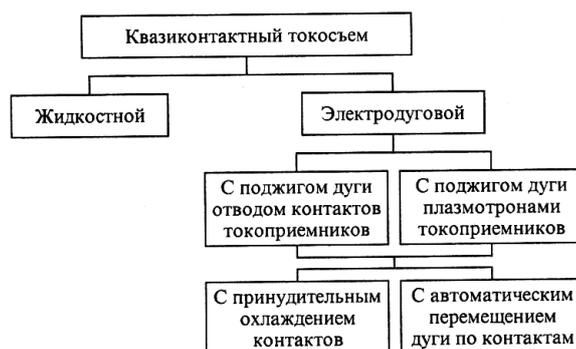


Рис.2.3. Способы квазиконтактного токосъема

2.2. Критерии качества токосъема

Актуальность проблемы токосъема на электрифицированном железнодорожном транспорте определяется следующими обстоятельствами:

1) реализацией скоростей до 220 км/ч на скоростных и 350 км/ч на высокоскоростных магистралях в пассажирском движении и для перевозки контейнеров при 160 км/ч, значительно ухудшающей динамические условия процесса взаимодействия токопровода и токоприемника. Кинетическая энергия, выделяющаяся на неровностях (спецчастях) контактной подвески зависит от квадрата скорости движения. По условию критических скоростей электропоезд после 220 км/ч должен работать не

более, чем на двух токоприемниках, после 300 км/ч - на одном. Это предопределяет использование электрической тяги с переменным повышенным напряжением 15-27 кВ и уменьшенным током;

2) повышением мощностей электровозов и электропоездов, а также централизованным электроснабжением пассажирских вагонов, что приводит к увеличению силы тока, проходящего через один токоприемник. Пассажирские электропоезда для реализации высоких скоростей должны иметь повышенную мощность, т.е. должны также снимать увеличенный ток при уменьшении числа токоприемников;

3) ужесточением экологических норм на радиопомехи, шум и продукты токосъема;

4) ужесточением требований к надежности перевозок в связи с перспективами увеличения международного евроазиатского транзита, в том числе к надежности токосъема.

Проведенными анализами последствий ухудшенного токосъема установлено, что наиболее рациональным путем решения проблемы увеличения скорости ЭПС до 220 км/ч надо считать усовершенствование токоприемников, а также углубленные исследования процессов токосъема в установившемся и переходном режимах.

При скоростях выше 220 км/ч необходимо принимать меры и по усовершенствованию контактной сети. В пользу этого утверждения говорит рассмотрение технических и социологических аспектов.

В установившемся режиме неудовлетворительный токосъем может привести:

а) к катастрофически нарастающему износу контактирующих элементов (при этом движение поездов может продолжаться некоторое время);

б) повреждениям с задержкой поездов; отрывам, ведущим к отжигу и пережогу провода; к круговому огню по коллекторам тяговых двигателей и перенапряжениям и разборке схем ЭПС; к недопустимому увеличению

радио- и телепомех; а также к отрывам, сопровождаемым ударами, вызывающими раскрепление деталей; к периодическим увеличениям контактного нажатия, ведущим к поджатиям фиксаторов, и т.д.

Таким образом, в установившемся режиме решающим фактором становится экономичный (с малым износом) и надежный (без повреждений) токосъем. Проблемы токосъема в этом случае решаются улучшением характеристик контактных подвесок и усовершенствованием токоприемников. Каждый путь включает в себя улучшение антифрикционных свойств контактных материалов.

В переходных режимах неудовлетворительный токосъем ведет не только к пережогам проводов, но и поломкам элементов токоприемников и контактных подвесок из-за кратковременного появления вертикальных и горизонтальных продольных и поперечных сил, к недопустимому изменению характеристик и параметров узлов во время эксплуатации и т.д. Причинами таких повреждений могут быть поперечные и вертикальные колебания кузова, горизонтальные силы от контактного провода, удары при подъеме и опускании токоприемника, удары о препятствия на контактном проводе, недостаточное время опускания токоприемника и прочность узлов, боковой ветер, отсутствие должного контроля в эксплуатации. Путь обеспечения надежного токоснимания в переходных режимах один - усовершенствование элементов токоприемников [32].

К основным критериям процесса токосъема относятся: величины износа контактной пары, отрывы токоприемников от проводов, размах колебаний полоза и контактного нажатия, коэффициенты надежности работы контакта и экономичности токосъема, а также минимум годовых эксплуатационных расходов.

Величина износа контактных динамических пар в эксплуатации является наиболее объективным критерием оценки их работы. Износ может использоваться как сравнительный показатель для материалов контактной пары и величины тока. Он характеризует работу динамической

системы. Однако процесс износа контактного провода протекает медленно, несколько лет, в течение которых будут неоднократно изменяться метеоусловия, а также типы ЭПС и токоприемников с разными характеристиками, токами, скоростями движения.

Изнашивание пластин токоприемника проходит значительно быстрее. Срок их службы - это пробег до замены. Но конкретный токоприемник будет изнашиваться при езде по тяговому плечу (или плечам) с конкретными профилями при меняющихся за несколько суток метеоусловиями, при разных манерах ведения поездов машинистами и поездных ситуациях (ток, скорость), истощением смазок и т.д. Тем не менее важнейшими для эксплуатации являются статистические данные по среднему удельному износу проводов и расходу пластин, соотнесенные к пробегу ЭПС.

Отрывы токоприемников от проводов являются критерием, который можно использовать во время инспекционных и опытных поездок. Они дают мгновенную оценку надежности токосъема, хотя и не учитывают возможность поджатия проводов. При визуальной оценке (по вольтметру) учитывается количество отрывов, при их регистрации осциллографом или другими приборами - их продолжительность. Вариантом такой оценки является коэффициент отрывов K' , представляющий процентное отношение суммы времени отрывов к периоду наблюдения T (рис. 2.4, а)

$$K_{\text{отр}} = \frac{\sum t_{\text{отр}}}{T} \cdot 100\%.$$

Размах колебаний полоза (рис. 2.4, б) относительно уровня головки рельса (или отжатия проводов токоприемником) определяются динамической составляющей контактного нажатия токоприемника и рассчитываются по формуле

$$\Delta H_{\text{л}} = H_{\text{л max}} - H_{\text{л min}}.$$

Наиболее объективным критерием токосъема является контактное нажатие, которое также характеризуется размахом его колебаний в пролете (рис. 2.4, в):

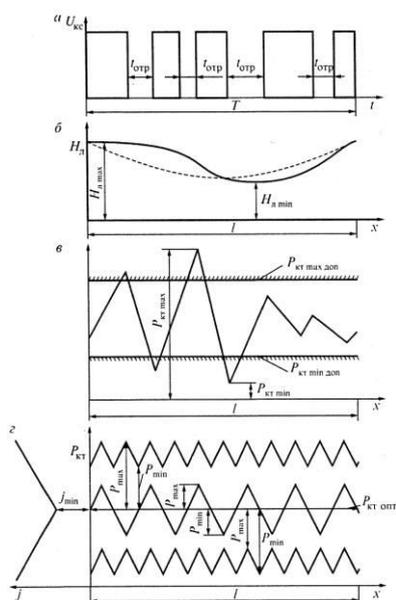


Рис. 2.4. К определению критериев токосъема: коэффициента отрывов (а), колебаний полоза (б), контактного нажатия, коэффициента ненадежности (в), упрощенного коэффициента экономичности (г): $U_{кc}$ - напряжение сети; $H_{л}$ - траектория полоза; l - длина пролета; x - координата пути; $P_{кx}$ - контактное нажатие; j - износ проводов и вставок

$$2\Delta P_{кx} = P_{кx \max} - P_{кx \min}.$$

Малый размах колебаний означает, что динамическая составляющая контактного нажатия оказывает незначительное влияние на нажатие. Однако для измерения контактного нажатия необходима специальная аппаратура и, кроме того, при автоматическом сканировании кривой нажатия могут быть пропущены экстремальные значения.

Вывод по второй главе

1. Использование контактных систем при увеличенных скоростях движения до 200—350 км/ч требуют создания и применения новых специальных контактных материалов, имеющих минимальную массу и способных снимать ток большой плотности, не отжигая при этом провода.
2. Проведенными анализами последствий ухудшенного токосъема установлено, что наиболее рациональным путем решения проблемы увеличения скорости ЭПС до 220 км/ч надо считать усовершенствование токоприемников, а также углубленные исследования процессов токосъема в установившемся и переходном режимах.
3. При скоростях выше 220 км/ч необходимо принимать меры и по усовершенствованию контактной сети.

III ГЛАВА

РАСЧЕТЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТОКОПРИЕМНИКА И КОНТАКТНОЙ ПОДВЕСКИ

3.1. Обобщенные расчетные схемы токоприемников и контактных подвесок

Теоретическое определение траекторий элементов токоприемника и контактного нажатия связано с решением задач динамики о движении тел переменной массы под действием разного рода сил. В связи этим первым этапом расчетов является определение в рассматриваемой системе «токоприемник-контактная подвеска» масс, жесткостей, сил сухого и вязкого трения, моментов инерции и установление числа степеней свободы и обоснованный выбор координат [17].

Обобщенные расчетные схемы токоприемников и контактных подвесок, максимально полно отражающие процесс токосъема и позволяющие получить уравнения, результаты решения которых будут совпадать с результатами экспериментов, составлены на основании рассмотрения конструкции всех узлов современных токоприемников и контактных подвесок как механических систем.

На обобщенной схеме (рис. 3.1) представлен токоприемник с двухкаркасным (двойным) полозом положительной кривизны с вторичным подрессориванием, рамного типа, а также с рогами, установленными на раме, не синхронизированными кареткам рычажного типа с нелинейной характеристикой и элементами с сухим и вязким трением, препятствующими повороту полоза вокруг продольной оси.

Система подвижных рам токоприемника, имеющая силы сухого трения, установлена на авто регулируемом основании и снабжена гидравлическим демпфером (амортизатором). Статическое нажатие рам зависит от высоты. Крыша кузова совершает вертикальные перемещения.

Учтены силы воздействия воздушных потоков на различные элементы токоприемника и силы трения о контактные провода.

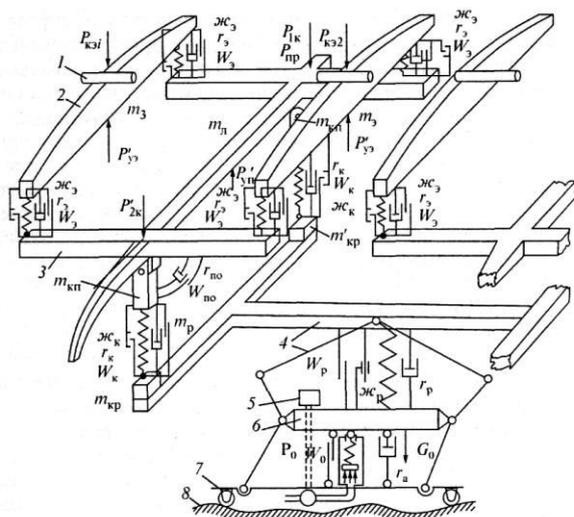


Рис. 3.1. Обобщенная расчетная схема токоприемника: 7 - контактный провод; 2- подрессоренный контактный элемент; 3- полз с рогами и каретками; 4-авторегулятор основания; 5 - авторегулятор высоты подвижного основания; 6 - подвижное основание; 7- основание на ЭПС; 8 - неровности пути

Для проведения расчетов вводятся следующие обозначения:

$H_{\text{под}}$, $H_{\text{кас}}$ - высота подвеса контактных проводов при отсутствии токоприемника, отсчитываемая от верхней поверхности ползцов опущенного токоприемника соответственно под опорой и в любой точке пролета;

H_c , $H_э$, $H_{\text{п}}$, H_p - высота соответственно контактных проводов, верхней поверхности контактных элементов, каркасов ползцов, верхнего шарнира системы подвижных рам токоприемника (высоту отсчитывают от верхней поверхности ползцов опущенного токоприемника);

$H_{\text{куз}0}$, $H_{\text{куз}}$ - высота верхней поверхности полза опущенного токоприемника над уровнем головок рельсов соответственно на стоянке (т.е. при отсутствии колебаний кузова) и при движении;

H_0 - расстояние от верхней поверхности ползцов авторегулируемого токоприемника при опущенной верхней системе рам (в любом положении подвижного основания) до этой поверхности при полностью сложенном токоприемнике;

m_{ε} , $m_{\varepsilon \text{ пр}}$ - масса одного контактного элемента соответственно полная и приведенная;

W_{ε} - сила сухого трения кареток вторичного подрессоривания;

r_{ε} , $P_{к\varepsilon}$ - соответственно коэффициент и сила вязкого трения кареток вторичного подрессоривания;

$ж_{\varepsilon}$, $P_{к\varepsilon}$ - соответственно жесткость и функция нажатия вторичного подрессоривания;

$P_{y\varepsilon}$ - вертикальная сила от воздушного потока, действующая на один токосъемный элемент;

$m_{\text{п}}$, $m_{\text{п пр}}$ - полная и приведенная массы полозов;

$P_{y\text{п}}$ - аэродинамическая подъемная сила полозов;

z - приращение высоты полоза (элемента) за счет кривизны;

$m_{кп}$, $m_{кр}$ - массы частей кареток, скрепленных соответственно с полозом и рамой;

$ж_{к}$, $P_{к}$ - жесткость пружин и функция нажатия кареток;

$r_{к}$, $P_{дк}$ - коэффициент и сила вязкого трения кареток;

$W_{к}$ - сила сухого трения кареток;

$r_{\text{по}}$, $W_{\text{по}}$ - соответственно коэффициент вязкого трения и сила сухого трения при повороте полоза вокруг поперечной оси;

$m_{\text{р}}$ - приведенная масса рам токоприемника;

$ж_{\text{р}}$ - приведенная к верхнему шарниру жесткость подъемных пружин токоприемника;

$P_{\text{р}}$ - статическое нажатие рам токоприемника с учетом весовой характеристики;

$r_{\text{р}}$, $P_{\text{др}}$ - коэффициент и сила вязкого трения подвижных рам;

$W_{\text{р}}$ - сила сухого трения в шарнирах рам;

$P_{y\text{р}}$ - аэродинамическая подъемная сила рам;

m_0 - приведенная масса подвижного основания;

W_0 - приведенная сила сухого трения в механизме подвижного основания;

$r_0, R_{до}$ - приведенный коэффициент и сила вязкого трения в системе подвижного основания;

$ж_0, T_0$ - приведенная жесткость возвратной пружины и опускающая сила основания;

P_{y0} - аэродинамическая подъемная сила основания;

$P_{кэ}, P_{кт}$ - контактное нажатие соответственно в отдельных точках контакта ползоров токоприемника с контактными проводами и полное.

Обобщенная расчетная схема контактной подвески (рис. 2.6) учитывает в общем виде взаимодействие рассмотренных выше элементов для совершенствования существующих методов расчета с целью повышения достоверности их результатов. На схеме представлена распределенными параметрами цепная контактная подвеска, состоящая из несущего троса и контактных проводов, имеющих массы, собственные жесткости и внутреннее вязкое трение. Струны приняты нелинейно-эластичными как под опорой, так и в средней части пролета с элементами, создающими силы сухого и вязкого трения (демпферами). Подопорный узел (крепление несущего троса к поддерживающему устройству) принят пружинным. Учтены сосредоточенные массы на проводе под опорой. Подвеска объемная, расположение ее контактных проводов в плане задается около опор фиксирующими устройствами. Для проведения расчетов вводятся следующие обозначения:

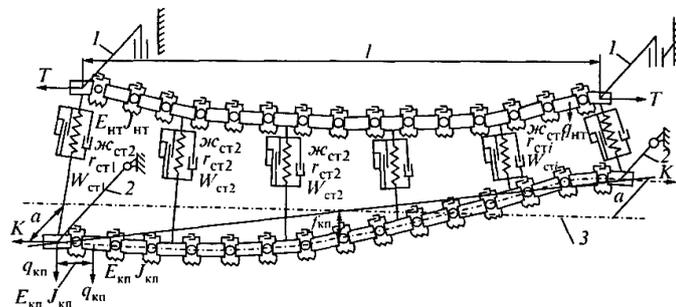


Рис. 3.2. Обобщенная расчетная схема контактной подвески: 1 - консоль; 2 - фиксатор; 3 - ось пути, l - длина пролета; а - зигзаг; f- стрела провеса провода; T- натяжение троса; K-натяжение контактного провода

K - натяжение контактного провода; $q_{кп}$ - погонная масса контактного провода; $J_{кп}$ - момент инерции сечения контактного провода; $E_{кп}$ - модуль упругости контактного провода; $r_{кп}$ - коэффициент внутреннего вязкого трения контактного провода; $q_{нт}$ - погонная масса несущего троса; T - натяжение несущего троса; $J_{нт}$ - момент инерции сечения несущего троса; $E_{нт}$ - модуль упругости несущего троса; $r_{нт}$ - коэффициент внутреннего вязкого трения несущего троса; $ж_{ст}$, $P_{ст}$ - жесткость и функция нажатия струны; $r_{ст}$, $P_{дст}$ - соответственно коэффициент и сила вязкого трения в демпферах струн; $W_{ст}$ - сила сухого трения в демпферах струн; $m_{под}$, $W_{под}$ - сосредоточенная масса и сила сухого трения подпорного узла; $ж_{под}$, $P_{под}$ - жесткость и функция нажатия подпорного узла; $ж_{к уд}$ - ударная жесткость контактного провода; $r_{под}$, $P_{д под}$ - коэффициент и сила вязкого трения подпорного узла; F - стрела провеса несущего троса; f - стрела провеса контактного провода; a - зигзаг контактного провода.

Основные методы, которые можно рекомендовать для применения при расчетах взаимодействия, должны быть точными, с использованием ЭВМ. Приближенные расчеты по упрощенным методам можно проводить лишь для анализа работы или усовершенствования конструкций в условиях депо или участков энергоснабжения.

Методы расчетов можно классифицировать по числу степеней свободы у токоприемника и способу представления контактной подвески (с сосредоточенными или распределенными параметрами).

3.2. Сосредоточенные параметры контактных подвесок и их определение

Сосредоточенные параметры включают в себя следующие характеристики контактных подвесок в пролетах, входящие в расчетные схемы (И.И. Власов, А.В. Фрайфельд): 1) высотное положение при отсутствии токоприемника; 2) жесткость (эластичность); 3) приведенная масса; 4) сила сухого трения; 5) коэффициент вязкого трения [3].

Перечисленные параметры используются в качестве исходного массива данных по контактной подвеске для расчета по описываемой ниже методике. От тщательности расчета или экспериментального определения параметров зависит достоверность получаемых траекторий полоза, рам токоприемника, а также контактного нажатия.

Высотное положение проводов простых и цепных подвесок. Эпюра высотного положения проводов определяется экспериментально путем прямых измерений с изолированной съемной вышки (лейтера) относительно уровня головки рельсов в различных точках пролета (под струнами и в середине между ними), начиная от опоры. Эта же эпюра может быть определена расчетно относительно горизонтальной оси на уровне головки рельсов. Формулы для расчета были приведены в гл.3. Для случая упрощенного определения стрелы провеса простой контактной подвески (когда пересечение осей координат взято относительно опоры):

$$H_{\text{под}x} = H_{\text{под}} - \frac{qx(l-x)}{2K},$$

где $H_{\text{под}}$ - высота провода под опорой.

Для цепной контактной подвески высотное положение определяется аналогичным способом, но с учетом стрел провеса несущего троса. Для полукомпенсированной подвески с простыми подпорными струнами высотное положение изменяется в течение года. При этом кривая зависимости высотного положения от температуры выглядит как парабола выгнутая вниз при положительных температурах и вверх при отрицательных, а при температуре беспровесного положения - в виде прямой линии. Для полукомпенсированной подвески с рессорными струнами на эпюре от опоры до первой нерессорной струны появляются горизонтальные площадки. Влияние температуры аналогично рассмотренному выше. Для полностью компенсированной подвески высотное положение постоянно.

Для типовой компенсированной подвески стрела провеса задается равной 60 мм, соответственно выглядит и эпюра. Для современных скоростных подвесок провод регулируется на стрелу провеса, равную нулю, например, в контактной подвеске КС-200. Точные расчеты высотных положений проводов подвески следует проводить на ЭВМ (например, с учетом конечного числа струн).

Жесткость подвески представляет собой отношение силы, поднимающей провода, к величине этого подъема. Обратная величина жесткости-эластичность подвески-величина подъема провода под действием единичной силы, направленной снизу вверх и действующей в данной точке. Экспериментальное определение жесткости производят со съемной вышки (лейтера) или площадки дрезины. Возможна запись аппаратурой вагона-лаборатории сначала высотного положения проводов, а затем траектории полоза при заданном нажатии токоприемника и движении поезда с малой скоростью. Частное от деления нажатия на разность траектории и высотного положения дает эпюру жесткости.

Более точные результаты измерения получаются вручную установленной на лейтере простой стойкой с блоком, тарированными грузами и линейкой. При этом функция нажатия подвески имитируется грузами и измеряется по линейке. Кроме того, может быть установлена линейность характеристики, а также определена величина силы сухого трения как разность ординат измеренной кривой при нагруженном состоянии и без нагрузки. Под опорой функция нажатия измеряется при Действии силы, направленной сверху вниз для оценки способности подвески гасить колебания после прохода токоприемника (ЭПС).

При проектировании новых контактных подвесок целесообразно коэффициент неравномерности представлять как отношение максимальной жесткости в пролете к минимальной. В расчетах можно использовать параметры эластичности, затем брать обратные ей величины жесткости.

3.2.1. Расчет жесткости (эластичности) простых и цепных подвесок.

Точный расчет эластичности представляет значительные трудности, приближенные же ее значения могут быть легко найдены, если принять ряд допущений, позволяющих применить упрощенные методы расчета. В первом приближении при статическом приложении сил можно принять, что натяжение проводов остается неизменным, и не учитывать жесткости проводов. Постоянное натяжение проводов вполне допустимо для компенсированных контактных проводов, а также и некомпенсированных несущих тросов при подвесных изоляторах и поворотных или полуповоротных консолях. Примем также, что сила нажатия P токоприемника невелика по сравнению с основной нагрузкой, равномерно распределенной на контактную подвеску [18].

Рассмотрим случай простой контактной подвески с жесткими опорными точками (рис. 3.3). Действие вертикальной силы P , приложенной на расстоянии x от левой опоры, вызывает подъем контактного провода на высоту Δh и разгрузку опор. Так как после приложения силы P часть пролета, представленная на рисунке, остается в равновесии, сумма моментов действующих сил относительно точки приложения силы P должна равняться нулю:

$$K\Delta h - \frac{P(l-x)x}{l} = 0,$$

где $P(l-x)/l$ представляет уменьшение левой опорной реакции, вызванное приложением силы P .

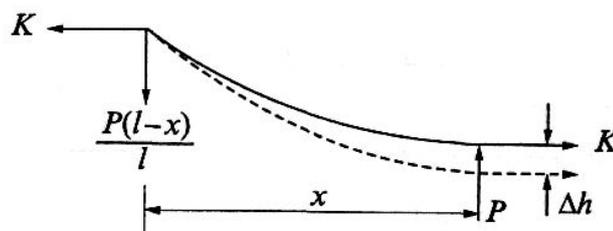


Рис.3.3. Схема для определения отжатия провода простой контактной подвески

Решая уравнение (2.11) относительно Δh , получим

$$\Delta h = \frac{Px(l-x)}{lK}.$$

Значение эластичности контактной подвески η в точке, расположенной на расстоянии x от левой опоры, определим по формуле

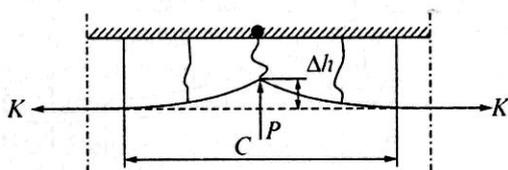
$$\eta = \frac{\Delta h}{P} = \frac{x(l-x)}{lK}.$$

При расположении силы P в середине пролета (при $x = l/2$) получим

$$\eta_m = \frac{1}{4K}.$$

Отсюда график эластичности простой контактной подвески при жестких опорах выражается параболой, имеющей ординату $\eta_m = 1/4k$ в середине пролета и нулевые ординаты под опорами.

Если контактный провод подвешен на часто расположенных гибких струнах к какой-либо неэластичной конструкции, как показано на рис. 3.4, то подъем контактного провода в точке приложения силы P может быть



представлен выражением

$$\Delta h = \frac{g_k c^2}{8K}$$

и сила P уравнивается весом

Рис. 3.4. Схема для поднятого на длине s контактного определения отжатия провода. Подставляя $P = g_k c$ в это контактного провода, выражение, получим подвешенного на струнах к жесткой конструкции

$$\Delta h = \frac{P^2}{8g_k K}.$$

При цепной контактной подвеске сила P , приложенная в средней части пролета, вызывает подъем как контактного провода, так и несущего троса.

Рассматривая часть пролета цепной подвески с простыми опорными струнами (рис. 3.5), где конструктивный коэффициент цепной подвески

$\varphi = 1$, и приравнявая к нулю сумму моментов всех сил относительно точки А, получим уравнение

$$\frac{glx}{2} - \frac{P(l-x)x}{l} - \frac{gx^2}{2} - Ty - K(y - y_0) = 0,$$

решая которое относительно y , установим, что

$$y = \frac{\frac{gx(l-x)}{2} + Ky_0}{T+K} - \frac{Px(l-x)}{l(T+K)},$$

где y_0 - ордината несущего троса в рассматриваемой точке пролета при беспровесном положении контактного провода.

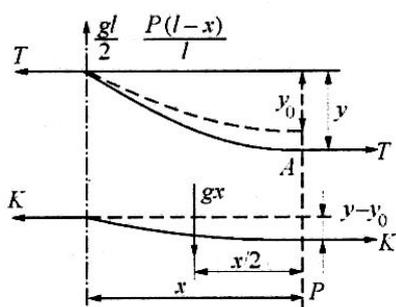


Рис. 3.5. Схема для определения отжатия контактного провода цепной подвески

При отсутствии силы P ордината y_1 несущего троса определится выражением

$$y_1 = \frac{\frac{gx(l-x)}{2} + Ky_0}{T+K}.$$

Вычитая выражение, находим Δh - отжатие цепной подвески под действием силы P :

$$\Delta h = y_1 - y = \frac{Px(l-x)}{l(T+K)}.$$

Разделив Δh на P , получим значение эластичности цепной подвески в данной точке пролета:

$$\eta = \frac{\Delta h}{P} = \frac{x(l-x)}{l(T+K)}.$$

Для точки, расположенной в середине пролета (при $x = l/2$)

$$\eta_m = \frac{l}{4(T+K)}.$$

В рессорных цепных подвесках вследствие вызываемых рессорной струной изменений высоты контактного провода под опорой момент пары сил K вместо $K(y - y_0)$ будет равен $K^\varphi (y - y_0)$.

Тогда

$$\eta = \frac{x(l-x)}{l(T + \varphi K)} \quad \eta_m = \frac{l}{4(T + \varphi K)}.$$

При расположении силы P между струнами к значению эластичности, необходимо добавить эластичность контактного провода в междуструновом пролете, которая определяется в зависимости от расстояния между струнами и от положения силы P по формуле

$$\eta_{\text{кп}} = \frac{\chi(a - \chi)}{aK},$$

где a - расстояние между струнами; χ - расстояние от левой струны.

Эти формулы справедливы для случая, когда воздействие силы P на цепную подвеску не вызывает разгрузки струн, т.е. пока $P < R_{\text{стр}}$, где $R_{\text{стр}}$ - реакция струны, которая при расстоянии между струнами a может быть определена из выражения

$$R_{\text{стр}} = g_k a - \frac{8f_k K}{l^2} a.$$

При $P > R_{\text{стр}}$ произойдет дополнительный подъем контактного провода, который можно приближенно определить из выражения, которое получено из условия, что вес поднятого контактного провода равен силе $(P - R_{\text{стр}})$, вызвавшей этот подъем:

$$\Delta h_1 = \frac{(P - R_{\text{стр}})^2}{8g_k K}.$$

В частях пролета, прилегающих к опорам, эластичность контактной подвески может изменяться в широких пределах в зависимости от конструкции опорного узла. В цепных подвесках с простыми опорными струнами подъем контактного провода под действием силы P вызывает

лишь разгрузку опорных струн и происходит в значительной своей части независимо от несущего троса.

Разберем сначала случай, когда фиксатор отсутствует, а контактный провод направлен по оси прямого пути и располагается в пролете беспровесно ($f_k = 0$). Рассмотрим отрезок АВ контактного провода (рис. 3.6), составляющий два междуструновых пролета и подвешенный на трех гибких струнах. Средняя струна крепится к седлу несущего троса и, следовательно, не обладает эластичностью; крайние струны крепятся к несущему тросу на расстоянии c от опоры. Приложение силы P в точке C вызывает разгрузку средней струны и подъем этой точки на Δh , относительно уровня расположения точек подвеса контактного провода на смежных струнах. Величину подъема Δh , определим по формуле, выведенной для свободно подвешенного провода, точки крепления которого расположены на различной высоте, откуда для принятых (рис. 3.6 и 3.7) обозначений получим

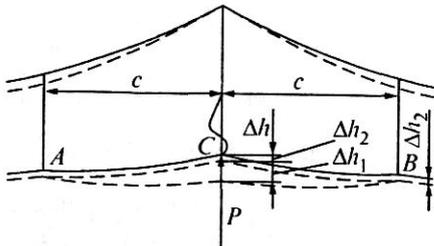


Рис. 3.6. Схема изменений положения проводов цепной подвески при отжати контактного провода силой, приложенной под опорной струной

$$b = \frac{c}{2} + \frac{2\Delta h_1 K}{g_k c}.$$

Так как $P = 2g_k b$, то из предыдущего выражения имеем

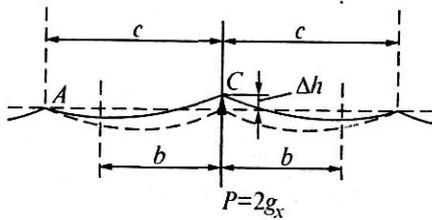
$$P = g_k c + \frac{2\Delta h_1 K}{c}.$$

Назовем через $R_{стр}$ начальную реакцию струны (до приложения силы P) и через $P_s = P - R_{стр}$ - избыточную силу, вызывающую подъем контактного провода под опорной струной.

Так как в данном случае $R_{стр} = g_k c$, то

$$P_s = P - g_k c = \frac{2\Delta h_1 K}{c}, \quad \text{откуда} \quad \Delta h_1 = \frac{P_s c}{2K}.$$

Подъем контактного провода под опорной струной (см. рис. 3.6) вызывает также разгрузку несущего троса в пролете и, следовательно, некоторый дополнительный подъем как несущего троса, так и рассматриваемого отрезка АВ контактного провода. Можно принять, что разгрузка цепной подвески в прилегающих к рассматриваемой опоре пролетах происходит под действием сосредоточенных сил, приложенных в



точках А и В где расположены первые пролетные струны.

Тогда подъем проводов цепной подвески каждой из этих точек под действием

Рис. 3.7. Схема для расчета подъема контактного провода под действием силы, приложенной под опорной струной

разгружающих сил $\frac{P_s}{2} = \frac{P - g_k}{2}$ можем определить по общей формуле для цепной подвески как

$$\Delta h_2 = \frac{(P - g_k c) c (l - c)}{2l(T + K)} = \frac{P_s c (l - c)}{2l(T + K)}$$

Общий подъем контактного провода под действием силы P, приложенной под опорной струной (см. рис. 3.7), определится выражением

$$\Delta h = \Delta h_1 + \Delta h_2 = \frac{(P - g_k c) c}{2K} + \frac{(P - g_k c) c (l - c)}{2l(T + K)} = \frac{P_s c}{2K} + \frac{P_s c (l - c)}{2l(T + K)}$$

которое после преобразовании примет вид

$$\Delta h = \frac{P_s c}{2} \frac{l(T + 2K) - cK}{l(T + K)K}$$

Рассмотрим теперь общий случай, когда имеется фиксатор, подвешенный на опорной струне к седлу несущего троса, и контактный провод располагается в смежных пролетах со стрелой провеса f_k . При отсутствии силы P (рис. 3.8) реакция опорной струны определяется выражением

$$R_{стр} = Q_\phi + Q_k \pm H_\phi \frac{h}{d},$$

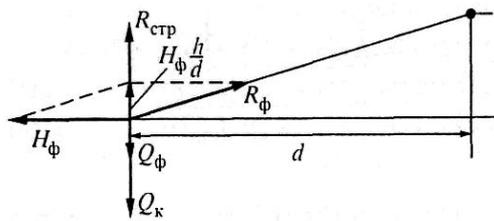


Рис. 3.8. Схема разложения сил в точке крепления фиксатора к контактному проводу

где Q_{ϕ} - передающаяся на опорную струну часть веса фиксатора; H_{ϕ} - горизонтальная составляющая реакции фиксатора; d - расстояние по горизонтали от фиксирующего зажима до шарнира фиксатора; h - расстояние по вертикали от шарнира фиксатора до уровня контактного провода в месте крепления к нему фиксатора; Q_k - передающаяся на опорную струну часть веса контактного провода, определяемая выражением

$$Q_k = \frac{8f_k K}{l} + \left(g_k - \frac{8f_k K}{l^2} \right) c; \text{ при } f_k = 0 \quad Q_k = g_k c.$$

3.2.2. Приведенная масса подвесок.

Масса контактной подвески распределена вдоль линии и в уравнениях, в которых подвеска рассматривается в виде системы с распределенными параметрами, учитывается общей плотностью проводов, составляющих цепную подвеску.

Рассматривая контактную подвеску в виде дискретной системы для заданного интервала отсчета, вводят понятие приведенной массы подвески m_k . Так как это понятие является условным, важно правильно представлять физический смысл приведенной массы в соответствии с принятой расчетной схемой. Кроме того, точность результатов теоретических исследований может зависеть от значения и характера изменения этой массы вдоль пролетов, подвески. Если рассматривать условную массу подвески при свободных колебаниях, то закон ее изменения вдоль пролета характеризуется кривой; максимальное значение массы имеет место у опор. Если же считать, что условная масса подвески имеет в точке контакта с токоприемником такую же скорость, что и контактный провод, и запас кинетической энергии, равный запасу энергии реальной

контактной подвески во всем пролете, то максимальное значение массы будет в середине пролета. При этом в первом случае масса у опор будет в несколько раз больше, чем в середине пролета, а во втором случае - на 10-20% меньше. Результаты расчетов по формулам, основанным на различной физической сущности условной массы, определяют ее значение, отличающееся в отдельных случаях для одних и тех же условий в несколько раз.

Из экспериментальных данных следует, что значения условных масс мало изменяются вдоль пролетов и немного возрастают с увеличением скоростей движения и числа контактных проводов. Расчеты, проведенные на ЭВМ, показали, что нет необходимости при теоретических исследованиях учитывать изменение массы m_k . Оказалось, что при принятых схемах замещения допустимо принимать усредненные значения m_k неизменными вдоль пролета и равными 30 кг для одинарных контактных подвесок с одним контактным проводом и 40 кг с двумя контактными проводами. Справедливость этого вывода подтверждена сходимостью расчетов, выполняемых для указанных значений m_k , с опытными данными [27].

Наиболее достоверный результат для незначительных скоростей движения может быть получен по рекомендации И.И. Власова. Среднее значение расчетной массы контактной подвески m_c за период t_2 , которое определяется при подъеме контактного провода по выражению для пассивного нажатия рам токоприемника, будет равно

$$m_c = \frac{P_{p2} \left(1 - \frac{2n}{3}\right)}{9,81},$$

где n - коэффициент скорости, который может быть принят равным нулю, при ее малых значениях.

Коэффициент вязкого и сила сухого трения. Демпфирующая характеристика контактной подвески может в значительной мере повлиять

на качество токосъема, а также на колебания подвески под действием ветровой нагрузки в таком сложном режиме, каким являются автоколебания. Разрабатывая новые контактные подвески и сравнивая их с известными конструкциями, обычно пользуются логарифмическим декрементом колебаний подвесок:

$$\delta = \ln A_{k_i} / A_{k_{i+1}}$$

где A_{k_i} и $A_{k_{i+1}}$ - два последовательных максимальных отклонения системы.

Этот показатель является полезным лишь для качественной оценки сравниваемых конструкций, причем в таких режимах их работы, как затухание колебаний подвески до и после прохода токоприемников или при автоколебаниях.

На процесс колебаний около положения статического равновесия контактного провода, особенно в зоне опорного узла, оказывают влияние рессорные и простые струны, ограничивающие вертикальные перемещения провода.

При различных амплитудах колебания контактного провода преобладающими можно считать различные виды трения: диссипация при $A_{k_i} > 0,15 \div 0,20$ м вызывается главным образом силами турбулентного трения; при $A_{k_i} = 0,03 \div 0,15$ м - силами вязкого трения, а при $A_{k_i} < 0,03$ м - силами сухого трения. Известно также, что наибольшая диссипация энергии происходит в опорной зоне, наименьшая - в середине пролета. Уменьшение жесткости j_c около опор при использовании рессорных проводов, пружин и других устройств, как правило, приводит к ухудшению демпфирующих характеристик подвесок. Поэтому, добиваясь уменьшения жесткости подвесок около опор, необходимо принять эффективные меры по увеличению диссипации энергии в этой зоне (в частности, этого можно добиться установкой дополнительных струн, ограничивающих перемещение провода ниже положения равновесия).

3.3. Определение распределенных параметров контактных подвесок

Применение сосредоточенных параметров не отражает действительных процессов, имеющих место при токоосъеме, так как не принимаются во внимание волновые процессы в проводах при вертикальных колебаниях и двух токоприемниках. С увеличением скоростей движения свыше 200 км/ч использование сосредоточенных параметров нецелесообразно, т.е. необходимо применение подвески с распределенными параметрами по обобщенной расчетной схеме (см. рис. 2.6).

В связи с этим ряд ученых пытались использовать для учета контактной подвески волновые уравнения - дифференциальные уравнения в частных производных. Решение этих уравнений как аналитически, так и численными методами представляет значительные трудности. В целях упрощения решений и повышения достоверности результатов расчетов токоосъема предлагается ввести минимальное количество наиболее безобидных допущений, учитывающих только наиболее простые характеристики токоосъемных устройств, для которых имеются экспериментальные данные: свободных колебаний проводов $H_c(t)$, траекторий $H_n(t)$, контактных нажатий $P_{кт}(x)$, массы $m_{под}$, жесткости $J_{под}$, коэффициента вязкого трения $r_{кп}$ и силы сухого трения $W_{под}$ подпорных пружинных узлов.

3.3.1 Волновые уравнения взаимодействия нескольких токоприемников и контактной подвески.

Как указывалось выше, в расчетную схему, используемую для составления уравнений, вводятся некоторые допущения. Так, силы вязкого трения в подвеске принимаются пропорциональными $\partial H_c / \partial t$. Жесткость подпорного узла, его масса и т.д. резко возрастают под опорой, поэтому силы, действующие на провода от подпорных узлов и токоприемников,

считаются сосредоточенными в точках. Для формализации этого используется функция Дирака $\delta(x)$, равная 0 при $x \neq 0$ и ∞ при $x=0$. Причем

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(x) dx = 1.$$

Функция Дирака употребляется для описания плотности единичной массы, силы и т.д., находящейся в точке $x=0$. Например, плотность силы, вызываемой подпорной жесткостью, есть

$$- \mathcal{K}_{\text{под}} \left(H_c - H_{\text{св}} - \frac{q_{\text{кп}} l}{\mathcal{K}_{\text{под}}} \right) \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(x - nl),$$

где $H_{\text{св}}$ - высота точки подвеса при полностью разгруженном подпорным узле (в предположении полной линейности его функции нажатия); l - длина пролета; n - номер опоры.

Плотность массы от токоприемника, взаимодействующего с контактной подвеской при движении и нахождении его в начальный момент времени $t=0$ в точке $x = x_\gamma$, равна $m_\gamma \delta(x - v_T \cdot t - x_\gamma)$.

Нажатие рам и вязкое трение в них вводятся в уравнение подобным же образом.

Уравнение движения элементов рассматриваемой системы с несколькими токоприемниками под проводом имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} & \left[\frac{q_{\text{кп}}}{g} + m_{\text{под}} \sum_n \delta(x - nl) + \sum_\gamma m_{\text{T}\gamma} \delta(x - v_T t - x_\gamma) \right] \frac{\partial^2 H_c}{\partial t^2} + \\ & + \left[r_{\text{кп}+} + \sum_\gamma r_{\text{P}\gamma} \delta(x - v_T t - x_\gamma) \right] \frac{\partial H_c}{\partial t} + \\ & + \sum_\gamma w_{\text{P}\gamma} \delta(x - v_T t - x_\gamma) \text{sign} \frac{\partial H_c}{\partial t} + E_{\text{кп}} J_{\text{кп}} \frac{\partial^4 H_c}{\partial t^4} - K \frac{\partial^2 H_c}{\partial t^2} + \\ & \mathcal{K}_{\text{под}} (H_c - H_{\text{св}}) \sum \delta(x - nl) = \\ & = \sum_\gamma (P_{\text{P}\gamma} + P_{\text{B}\text{P}\gamma} + P_{\text{B}\text{L}\gamma}) \delta(x - v_T t - x_\gamma) - q_{\text{кп}}, \end{aligned}$$

где v_T - скорость движения токоприемника; x_γ - координата γ -го токоприемника при $t=0$; $E_{\text{кп}}$ $J_{\text{кп}}$ - собственная жесткость проводов; $m_{\text{T}\gamma}, w_{\text{P}\gamma}, r_{\text{P}\gamma}, P_{\text{P}\gamma}, P_{\text{B}\text{P}\gamma}, P_{\text{B}\text{L}\gamma}$ - масса, сила сухого и коэффициент вязкого трения

рам, их нажатие и аэродинамические вертикальные силы соответственно для γ -го токоприемника.

Используя эти волновые уравнения, можно найти кривые свободных колебаний проводов подвески, отыскать траектории полозов и контактные нажатия для одного и нескольких токоприемников (при любом расстоянии между ними).

Уравнение движения элементов рассматриваемой системы выводится из уравнения колебаний струны, которое в общем случае имеет вид

$$\rho(x) \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = T_0 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + p(x, t),$$

где $\rho(x)$ - линейная плотность струны; T_0 - сила натяжения, действующая на струну; u - вертикальное перемещение точек струны в момент времени t от положения равновесия; $p(x, t)$ - внешняя сила, действующая на струну.

Вышеприведенные уравнение имеет бесчисленное множество частных решений. Поэтому одного уравнения недостаточно для полного определения движения струны; нужны еще некоторые дополнительные условия. Так, в начальный момент времени $t=0$ нужно задать положение и скорость всех точек струны:

$$\begin{aligned} u|_{t=0} &= \varphi_0(x), \\ \frac{\partial u}{\partial t}|_{t=0} &= \varphi_1(x). \end{aligned}$$

Этого условия называют начальными условиями.

Так как струна ограничена и закреплена, то на ее концах должно быть

$$\begin{aligned} u|_{x=0} &= 0, \\ u|_{x=l} &= 0 \end{aligned}$$

при всяком $t \geq 0$. Этого условия называют краевыми или граничными условиями. Возможны и другие граничные условия.

Определение собственной жесткости различных проводов. Собственная жесткость проводов и тросов, входящая в волновые

уравнения, учитывается произведением $E_{кп}, J_{кп}$, которое следует рассчитывать или находить экспериментально. Значения модуля упругости $E_{кп}$ приводятся в справочниках только для монометаллических проводов, поэтому для сталемедных и сталеалюминевых проводов вопрос усложняется. Для расчета $E_{экв}$ комбинированного провода используется следующее выражение:

$$E_{экв} = \frac{E_{a(м)}S_{a(м)} + E_c S_c}{S_{a(м)} + S_c},$$

где $E_{a(м)}$ и E_c - модуль упругости алюминия (меди) и стали соответственно;
 $S_{a(м)}$ и S_c - площадь сечения алюминиевой (медной) части и стальной соответственно.

Моменты инерции сложных сечений контактных проводов определяются по формуле

$$J_{кп} = \sum F_i z_{цi}^2 + J_i,$$

где F_i - площадь i -го элемента сечения провода; $z_{цi}$ - координата центра тяжести i -го элемента сечения провода; J_i - собственный момент инерции i -го элемента сечения провода.

При этом координаты центра тяжести провода определяются по формуле

$$z = \frac{\sum F_i \cdot z_{цi}}{\sum F_i}.$$

Так как контактный провод имеет неправильную форму в сечении, то для расчета момента инерции контактного провода и определения его координаты центра тяжести необходимо сечение провода разбить на ряд более простых сечений. Тогда площадь сечения сегмента и момент инерции определяется по формулам

$$F_i = \frac{R_i^2}{2} (2\alpha_i - \sin 2\alpha_i),$$

где R_i - радиус дуги сегмента;

$$\alpha_i = \frac{\pi \alpha_i^{\circ}}{180^{\circ}},$$

$$j_{xi} = \frac{F_i R_i^2}{4} \left(1 + \frac{4 \cos \alpha_i \sin^3 \alpha_i}{2 \alpha_i - \sin 2 \alpha_i} \right),$$

где F_i - площадь сечения сегмента.

Выражение для расчета площади сечения трапеции имеет вид:

$$F_i = \frac{1}{2} (b_i + b_1) h_i,$$

где b_i , b_1 - размеры верхнего и нижнего основания соответственно; h_i - высота трапеции;

$$J_{xi} = \frac{h_i^3 (6b_1^2 + 6b_1 b_0 + b_0^2)}{36(2b_1 + b_0)},$$

где $b_0 = b_i - b_1$.

Несущий трос, как правило, состоит из нескольких проводов, поэтому для расчета его момента инерции применима формула, где собственный момент инерции J_{xi} определяется по выражению

$$J_{xi} = \frac{F d^2}{16},$$

где d - диаметр провода; F - площадь сечения провода, для круглого провода

$$F = \frac{\pi d^2}{4}.$$

3.4. Косвенные параметры контактных подвесок, взаимодействующих с токоприемниками

К группе косвенных параметров можно отнести характеристики, которые могут помочь оценить работу токосъемных устройств без сложных расчетов их взаимодействия на ЭВМ.

К ним относятся: 1) время затухания колебаний подвески $t_{с\ затух}$; 2) декремент затухания колебаний подвески D_c ; 3) критические скорости подвесок $V_{с.кр}$;

4) коэффициент Доплера подвески α_c ; 5) линии влияния отжатия (ЛВО) и эластичности (ЛВЭ) подвесок; 6) статические траектории токоприемника $H_d(x)$. Ниже рассмотрены только косвенные параметры критических скоростей и линий влияния отжатия. Остальные параметры достаточно известны из теоретической механики.

Критические скорости. Скорость распространения волны по подвеске, которая должна быть меньше скорости ЭПС, определяется по формуле

$$c_p = \sqrt{\frac{\sigma}{\gamma}} = \sqrt{\frac{H_0}{m}},$$

где c_p - скорость распространения волны; H_0 - натяжение провода; m - погонная масса провода.

Коэффициент отражения

$$r = \frac{1}{\left(1 + \sqrt{\frac{(H_F m'_F)}{(H_T m'_T)}}\right)},$$

где H_F , m'_F , H_T , m'_T - натяжение и масса контактных проводов и несущего троса соответственно.

Скорость движения:
$$v_a = c_p \frac{(1-r)}{(1+r)}.$$

Коэффициент Доплера
$$\alpha = \frac{(c_p - v)}{(c_p + v)}.$$

Коэффициент усиления
$$\gamma_v = \frac{r}{\alpha}.$$

Собственные частоты цепных контактных подвесок

$$v_1 = \frac{\bar{c}}{2l} = \frac{\sqrt{(H_F + H_T)}}{\sqrt{(m'_F + m'_T)}},$$

$$v_2 = \frac{\bar{c}}{(2l + l_1)} = \frac{\sqrt{(H_F + H_T)}}{\sqrt{(m'_F + m'_T)}},$$

где \bar{c} - средняя скорость распространения волны цепной подвески; l - длина пролета; l_1 - расстояние до первой нерессорной струны

Оптимальными должны быть приняты параметры, которые обеспечивают наиболее близкий к единице коэффициент неравномерности при нормируемой средней жесткости и скорости волны, меньшей, чем скорость ЭПС.

При анализе КС-200 из условия динамики с параметрами, удовлетворяющими условиям статики, должны анализироваться кривые контактного нажатия в пролете. Среднее его значение должно быть близким к оптимальному из рассмотренной кривой износа. Колебания нажатия не должны быть максимальными, вызывающие подъемы фиксаторов до 200 мм, и минимальными до 20 Н, вызывающими пережоги.

Критические скорости для контактной подвески КС-200 с заданными параметрами оказались для всех трех элементов выше, чем скорость движения предполагаемого ЭПС, - 97 м/с (350 км/ч) [31].

Дополнительную проверку на критические скорости высших гармоник проводят по формуле

$$V_{кр} = \frac{V_{кр0}^0}{\sqrt{1 + \frac{(16\pi^2 k^2 T^2)}{ж_{ср}^2 l^2}}},$$

где k -- номер гармоники; T - натяжение в несущем тросе; $ж_{ср}$ - средняя жесткость подвески в пролет; l - длина пролета.

Линии влияния эластичности контактной подвески показывают закон изменения подъема контактного провода в рассматриваемой точке при перемещении токоприемника вдоль пролета. Их строят для нажатия токоприемника $P = 1$. Кроме того, по этим линиям определяют статический подъем контактных проводов в данной точке при нахождении в пролете двух и более токоприемников.

Линии влияния эластичности контактной подвески в средних частях пролета строят так же, как и линии влияния изгибающего момента простой

балки на двух опорах, с той лишь разницей, что ординаты линии влияния делят, кроме того, на величину приведенного натяжения цепной подвески $T + \varphi K$ и измеряют их поэтому в м/кг. Так как приведенное натяжение цепной подвески изменяется в зависимости от температуры, то и линии влияния при таком построении будут получаться различными при разных температурах.

В цепных подвесках с простыми опорными струнами линия влияния имеет треугольную форму с нулевыми ординатами под опорами и с переломом в точке, для которой определяют значения подъема контактных проводов (рис. 3.10,а). Для цепных подвесок, в которых опорные струны находятся на расстоянии c с каждой стороны от оси опоры, принимают, что при перемещении силы $P = 1$ под опорой на участке провода между двумя ближайшими от опоры струнами передаваемые на эти струны усилия изменяются по закону прямой. Линия влияния получает при этом вид (рис. 3.10, б) с переломами под ближайшими от опоры струнами и проходит через нуль в точках расположения таких струн в смежных пролетах.

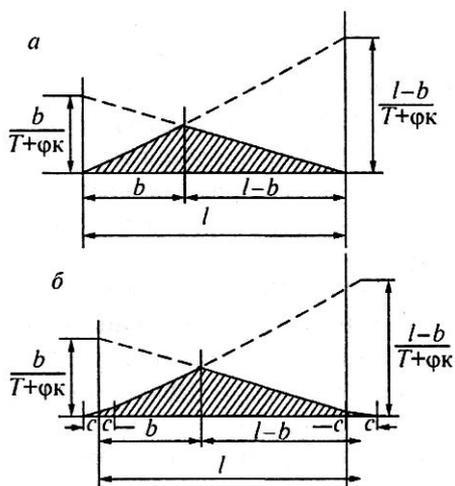


Рис. 3.10. Линии влияния эластичности в пролете цепной подвески с простыми опорными струнами (а) и струнам, смещенными относительно опор (б)

3.5. Расчет токосъема для токоприемников с двумя степенями свободы, с учетом контактных подвесок с сосредоточенными параметрами

Предлагаемый метод расчета разработан в МИИТе А.В. Фрайфельдом (с элементами метода И.И. Власова) и базируется на решении системы двух дифференциальных неоднородных линейных уравнений с коэффициентами, значение которых неодинаково в разных точках пролета.

К основным допущениям метода относятся следующие:

- контактная подвеска является системой с сосредоточенными параметрами;

- нелинейность (от высоты, скорости) характеристики токоприемника, эффекты приведения (к месту в пролете) и инерционные эффекты не принимаются во внимание;

- контактное нажатие определяется без учета отрывов и распределения по пластинам (вставкам);

- сосредоточенные параметры, входящие в расчетную схему подвески (рис. 3.11, а): высотного положения $H_{\text{кас}}(x)$, жесткости $ж_c(x)$, массы $m_c(x)$, силы сухого трения $W_c(x)$ и коэффициента вязкого трения $r_c(x)$ меняют свои размеры в разных точках пролета. Эти зависимости определяют экспериментально или расчетом с использованием точных или приближенных (парабола, синусоида и т. д.) уравнений. В программу расчетов на ЭВМ они вводятся таблицей по шагам или уравнениями.

Значения сил сухого трения могут считаться не зависящими от скорости движения элементов, но их знаки меняются каждый раз при изменении направления движения. Силы трения направлены навстречу движению. Это следует учитывать в уравнениях специальными функциями с символами sign , которые, будучи записаны после какой-либо величины, дают ей знак другой величины, записанной после этого символа. Так, для силы трения W учитывается знак скорости движения (зависящей от

направления движения), т.е. $W \text{ sign } \dot{H}$. Силы трения являются нелинейными элементами в системе.

Силы вязкого трения в системе «токоприемник - подвеска» в рассматриваемом методе упрощенно принимают линейными, пропорциональными первой степени скорости движения, и могут быть найдены через коэффициенты вязкого трения (r_c, r_k, r_p) как $r \dot{H}$.

Силы, создаваемые упругими элементами (обладающими жесткостью или эластичностью), принимаются линейными, т. е. прямо пропорциональными их напряжению сжатия (для кареток) или отжатия (для проводов). Тогда с учетом жесткости ($ж_c, ж_k, ж_p$) можно записать $ж_c (H_c - H_{кас})$; $ж_k (H_{п} - H_p - h_{ко})$ и т.д. В последнем выражении $h_{ко}$ представляет собой расстояние от верхней поверхности полоза до середины верхнего шарнира токоприемника (при освобожденных пружинах). Следует отметить, что нажатие рам (статическая характеристика) принимается постоянным, не зависящим от высоты, что допустимо для средней части рабочего диапазона высоты.

Составление уравнений при наличии расчетной схемы следует начинать с выявления масс, которые могут находиться в независимом вертикальном движении, т.е. с установления числа степеней свободы (подвижностей), определяющих число дифференциальных уравнений, из которых должна состоять система, и число неизвестных, которые должны быть определены [29].

При составлении уравнений направление снизу вверх принимают положительным для сил P , скоростей \dot{H} и ускорений \ddot{H} .

Из расчетной схемы видно, что в рассматриваемой системе имеются две степени свободы: положения масс сети m_c и полоза $m_{п}$ определяются высотой $H_{п}$, положения массы рам - координатой H_p .

Уравнение движения масс m_c и $m_{п}$ можно составить (рис. 3.11,б), найдя сумму сил. По второму закону Ньютона масса (массы), на которую

действует сила (силы), должна двигаться с ускорением, пропорциональным этой силе. Составим уравнение этого движения, учитывая направление сил (рис. 3.11, г):

$$(m_c + m_{\Pi})\ddot{H}_{\Pi} = -r_c \dot{H}_c - \mathcal{J}_c (H_{\Pi} + H_{\text{кас}}) - W_c \text{sign} \dot{H}_p - r_k (\dot{H}_{\Pi} - \dot{H}_p) - \mathcal{J}_k (H_{\Pi} - H_p - h_{\text{ко}}) - W_k \text{sign} (\dot{H}_{\Pi} - \dot{H}_p) + P_{\text{уп}}.$$

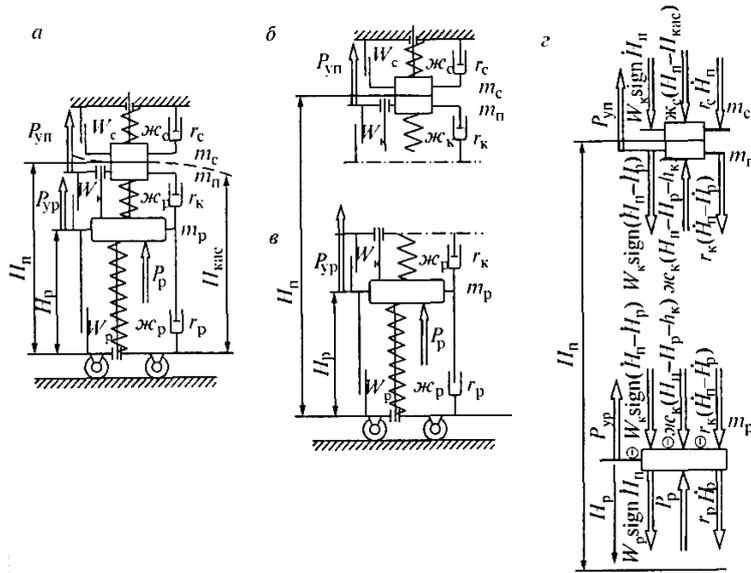


Рис. 3.11. Схемы к составлению уравнений движения для токоприемников с двумя степенями свободы при сосредоточенных параметрах контактной подвески

Знак «минус» перед упругой силой кареток объясняется тем, что выражение в скобках отрицательно.

Уравнение движения массы т составим, учитывая направление сил (рис. 2.21, б, в, г):

$$m_p \ddot{H}_p = r_k (\dot{H}_{\Pi} - \dot{H}_p) + \mathcal{J}_k (H_{\Pi} - H_p - h_{\text{ко}}) + W_k \text{sign} (\dot{H}_{\Pi} - \dot{H}_p) - r_p \dot{H}_p - W_p \text{sign} \dot{H}_p + P_p + P_{\text{уп}}.$$

Знак «плюс» перед силами кареток вместо «минус» в соответствии с направлением сил объясняется отрицательными значениями в скобках, если принять $H_{\text{п}} = 0$.

Эти уравнения можно решать численным методом на ЭВМ. Для этого надо разделить пролет на интервалы (шаги для ЭВМ). Уравнение составлено по времени, поэтому место в пролете для каждого значения полученных траекторий можно найти, умножая его на скорость поезда.

Уравнения контактного нажатия можно получить двумя способами: заменив реакцией действие проводов подвески на полоз (рис. 3.12, а, б) или действие полоза на подвеску (рис. 3.12, в, г).

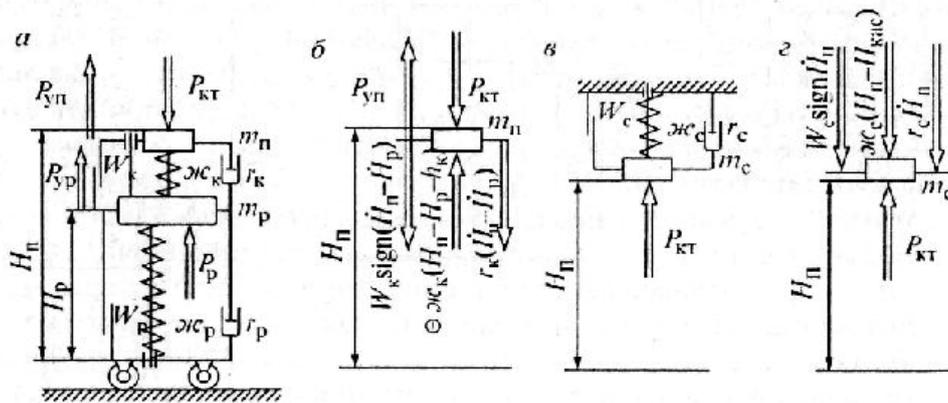


Рис. 3.12. Схемы к определению контактного нажатия для токоприемников с двумя степенями свободы при сосредоточенных параметрах контактной подвески

В первом случае получим

$$m_{\text{п}} \ddot{H}_{\text{п}} = -P_{\text{кТ}} - r_{\text{к}} (\dot{H}_{\text{п}} - \dot{H}_{\text{р}}) - z_{\text{к}} (H_{\text{п}} - H_{\text{р}} - h_{\text{ко}}) - W_{\text{к}} \text{sign}(\dot{H}_{\text{п}} - \dot{H}_{\text{р}}) + P_{\text{уп}}.$$

Сила жесткости каретки учтена с обратным знаком, так как скобка за ней отрицательна. В этом уравнении все величины получены ранее при решении основного уравнения движения; неизвестным является только $P_{\text{кТ}}$, которое определяют из формулы

$$P_{\text{кт}} = -m_{\text{п}} \ddot{H}_{\text{п}} - r_{\text{к}} (\dot{H}_{\text{п}} - \dot{H}_{\text{р}}) - \varepsilon_{\text{к}} (H_{\text{п}} - H_{\text{р}} - h_{\text{ко}}) - W_{\text{к}} \text{sign}(\dot{H}_{\text{п}} - \dot{H}_{\text{р}}) + P_{\text{уп}}.$$

Во втором случае контактное нажатие будет равно:

$$P_{\text{кт}} = m_{\text{с}} \ddot{H}_{\text{п}} + r_{\text{с}} \dot{H}_{\text{с}} + \varepsilon_{\text{с}} (H_{\text{с}} - H_{\text{кас}}) + W_{\text{с}} \text{sign} \dot{H}_{\text{с}}.$$

Вывод по третьей главе

1. Наибольшая диссипация энергии происходит в опорной зоне, наименьшая - в середине пролета;
2. С увеличением скоростей движения свыше 200 км/ч использование сосредоточенных параметров нецелесообразно;
3. При анализе КС-200 из условия динамики с параметрами, удовлетворяющими условиям статики, должны анализироваться кривые контактного нажатия в пролете.

IV ГЛАВА

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОНТАКТНОЙ ПОДВЕСКИ И ТОКОПРИЕМНИКА

4.1. Моделирование взаимодействия контактной подвески и токоприемника

Целью динамического моделирования является определение основных изменений пространственно зависимых контактных сил между контактными вставками и контактным проводом и взаимодействующие при этом отжатиями контактного провода.

Задачи, решаемые при моделировании. Можно решать следующие задачи:

- прогнозирование сил нажатия токоприемников для вновь разрабатываемых контактных сетей скоростных железных дорог;
- исследование влияния типичных параметров контактной и токоприемника;
- исследование и сравнение новых конструкций контактной подвески и токоприемника;
- оценка условий использования существующих контактных подвесок для изменившихся условий эксплуатации, включая повышение скоростей движения.

Параметры системы – контактная подвеска и токоприемник, учитываемые при моделировании.

Для контактной подвески необходимо учитывать:

- конструктивные параметры, например, подвески с тросом и без него; сложные цепные подвески; различные струновые пролеты;
- данные конкретных типов контактных проводов, струн, сил нажатия проводов, свойства материала;
- длины анкерных участков, длины пролетов;
- динамические характеристики фиксаторов;

- места возможного нарушения нормального прохода токоприемников: пересечение контактных проводов, воздушные стрелки, секционные изоляторы, данные варьирования высоты [5, 6, 7].

Для токоприемников следует учитывать:

- исполнение рычажных механизмов – одно- и двухрычажные;
- различное исполнение контактирующих элементов, отдельное подрессоривание;
- различные амортизирующие и демпфирующие свойства;
- число токоприемников, одновременно контактирующих с контактной подвеской;
- показатели точности должны соответствовать аналогичным показателям контактной подвески.

Схема замещения токоприемника.

Принимая во внимание взаимодействие с контактной подвеской следует применять соответствующее моделирование поведения контакта. В этом месте следует определить силу контактного нажатия и вертикальное перемещение.

При подобном замещении системы должна производиться соответствующая сила в определенной точке контактной вставки полоза токоприемника. Пространственное влияние перемещения контактных проводов должно учитываться путем линейного изменения силы воздействия на контактные вставки.

В наиболее простом случае токоприемник можно замещать системой, воспроизводящей пружину, гаситель и приведенную массу. Такая система описывается дифференциальными уравнениями второго порядка. Число уравнений при этом определяется количеством учитываемых эквивалентных приведенных масс, т.е. степенями свободы.

Общепринятой является модель с тремя замещаемыми массами. При этом указанные массы замещают нижнюю подвижную раму, верхнюю подвижную раму и каретку токоприемника с ползком. На рис. 4.1.

показана трехмассовая модель токоприемника типа SBS81 германских железных дорог.

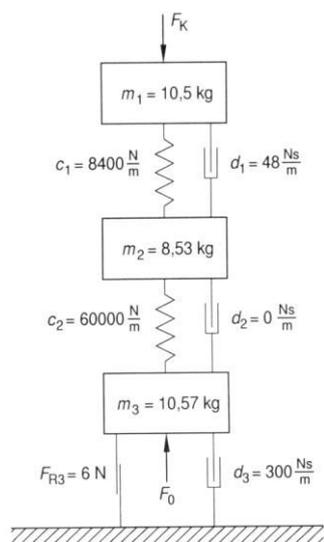


Рис. 4.1. Трехмассовая модель токоприемника SBS81 (m-масса, C- жесткость пружин, d- демпфирование, F_R – сила трения)

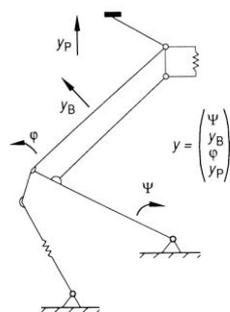


Рис. 4.2. Аналитическая модель токоприемника

Вследствие ограниченного числа приведенных масс достигается учет только определенных частот колебаний. Так, например, в такой модели не учитывается изгибные колебания токоприемника. Модель на рис. 4.1. не учитывает также отдельное подрессоривание полозов. Отдельное подрессоривание полозов предусматривается в шестимассовой модели. При этом масса полозов разделяется между точками их взаимодействия с контактным проводом. Импульс полозов разделяется соответственно положению контактов для обеих частей массы.

Рейнжер разработал аналитическую модель для полупантографа с каретным полозом. Эта модель токоприемника с четырьмя степенями свободы (рис.4.2) учитывает как независимую величину, наряду с вертикальным перемещением подрессоренной каретки y_p и изменением углов в середине ϕ_u внизу рамы ψ пантографа, также и изгиб верхней рамы y_b .

Параметры модели должны определяться исходя из геометрических размеров и материала отдельных звеньев конструкции токоприемника.

Всем указанным математическим моделям не хватает универсальности. Даже незначительное изменение модели, например

раздельный подрессоренный полоз, требует нового алгоритма решения.

4.2. Моделирование методом конечных элементов позволяет получать достаточно точные модели.

Новак и Линк получили решение, при котором для токоприемника поезда ICE методом конечных элементов с 480 степенями свободы установили подобие. Вычислительные затраты тем не менее очень велики. Оптимизация токоприемника произведена авторами только простой трехмассовой модели.

Токоприемник должен также соответствовать измеренным, частотно зависимым приведенным массам и динамической жесткости. Импульс и реакция токоприемника могут представляться в решении методом наложения отдельных реакций для проявляющихся частот. Преимуществом этой модели является применение частотно зависимых алгоритмов решения для схемы замещения звеньевой структуры. При других моделях частотная зависимость должна учитываться путем гармонического анализа импульса. Дополнительно к этому измеряемая величина должна определяться с учетом динамической приведенной массы с целью учета передачи инерции на отдельных частотах.

4.3. Пример моделирования контактной подвески с частотно зависимыми конечными элементами

Математическое описание. В качестве примера моделирования взаимодействия токоприемника – контактной подвески ниже рассмотрен метод частотнозависимых конечных элементов [1]. Цепная подвеска представлена схемой замещения согласно рис.4.3. с сосредоточенными массами и пружинами.

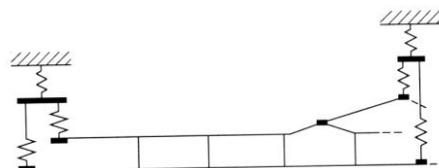


Рис. 4.3. Схема замещения колебательной системы цепной контактной подвески

Элементы проводов характеризуются сосредоточенными массами m' и силой натяжения H_0 . Гибкостью провода при этом пренебрегают [1]. Все другие элементы описываются через коэффициенты жесткости и массы с конечными элементами как вибраторами. Точки возбуждения могут лежать в любой точке контактного провода, либо на элементе троса или в точках крепления струны. Ниже представлены только наиболее важные зависимости. Уравнения для элемента провода длиной l (рис. 4.4) между точками крепления 1 и 2, который замещен распределенной массой m' и силой натяжения H_0 , представляет уравнение колебания провода. Оно представлено в форме:

$$m' \ddot{y} - H_0 y'' + K_0 y = 0,$$

где $\ddot{y} = d^2 y / dt^2$ и $y'' = d^2 y / dx^2$.

Для решения используется преобразование в частотной области с подстановкой $y = Z e^{j\omega t}$.

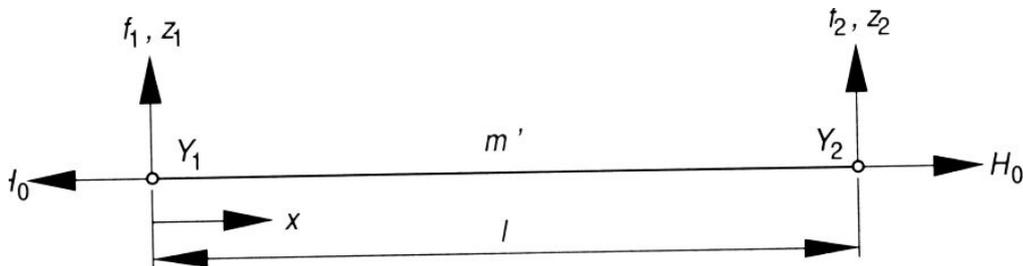


Рис. 4.4. Дискретный элемент провода с граничными степенями свободы Z_1 и Z_2

В частотной области получается стационарное уравнение второго порядка:

$$H_0 Z'' + m' \omega^2 Z = 0,$$

При использовании решения этого уравнения

$$Z(x, \omega) = A \sin \beta x + B \cos \beta x$$

и соотношения $\beta = \omega / C_F = \omega / \sqrt{H_0 / m'}$,

а также граничных условий

$$Z=Z_1 \quad \text{для} \quad x=0$$

$$Z=Z_2 \quad \text{для} \quad x=l, \quad \text{при которых } B=Z_1 \text{ и } A = Z_2 / \sin \beta l + Z_1 \cos \beta l$$

общее решение имеет вид:

$$Z = Z_1(\cos \beta x - \cos \beta l \sin \beta x) + Z_2 \sin \beta x / \sin \beta l$$

Сумма силы инерции и силы реакции дает силу в точке крепления f_i :

$$f_i = f_i^T + f_i^R$$

Путем разделения параметров с помощью функций преобразования g_i и g_k представлено:

$$f_i^T = -w^2 \sum m Z_K \int_0^l g_i g_k dx$$

При преобразовании через массу замещения получено:

$$f_i^T = -w^2 \sum m_{iK} Z_K$$

Элементы матрицы можно определить, используя:

$$m_{ik} = m \int_0^l g_i g_k dx$$

Аналогично для определения жесткости пружины:

$$f_i^R = \sum_K Z_K H_0 \int_0^l g_i^1 g_K^1 d\alpha \quad \text{и} \quad f_i^R = \sum \bar{C}_{iK} Z_K$$

Жесткость пружины в точках измерения:

$$\bar{C}_{iK} = H_0 \int_0^l g_i^1 g_K^1 dx$$

В матричной форме уравнение равновесия в узловых точках имеет вид:

$$F = (-w^2 M + C)Z = \bar{C}(w)Z$$

Моделирование с использованием связанных масс и жесткостей между точками соединения допускает производить учет таких дополнительных элементов как пружины и массы, что позволяет рассчитывать любую подвеску, состоящую из масс, проводов и пружин.

Решение общей проблемы достигается с помощью собственных векторов. Для этого используются собственные частоты из зависимостей:

$$\det|\overline{C}(w_n)| = 0$$

и для них собственные вектора определяются по соотношению:

$$\overline{C}(w_n)Z = 0$$

Собственные частоты вычисляются численно с помощью итерационных алгоритмов. Определитель частот должен многократно раскрываться до тех пор, пока не будет получен нулевой итог при итерациях. После точного определения нулевого состояния может быть получено решение для собственных векторов.

Внешние действующие силы учитываются уравнением движения, которое решается для отдельных собственных частот:

$$M(w_n)\ddot{y}_n(t) + D(w_n)\dot{y}_n(t) + C(w_n)y_n(t) = F(t)$$

Решения для отдельных частот затем используется методом наложения при нахождении общего значения реакции.

Для решения уравнения движения замещают с помощью модальной реакции в узлах:

$$y_n(t) = Z_n q_n(t)$$

и получают уравнение:

$$\ddot{q}_n + 2\xi w_n \dot{q}_n + w_n^2 q_n = r_n(t)$$

Вектор возбуждения находится при этом по соотношению:

$$r_n(t) = \frac{1}{m_n} \sum_i F_{0i} W_i$$

где $m_n = Z_n^T M(w_n) Z_n$ - модальная масса, а функция веса, соответствующая длине возбуждения между узлами i и k ,

$$W_{ik} = Z_{ni}(\cos(\beta_n l) \sin(\beta_n x) + \cos(\beta_n x)) + Z_{nk} \sin(\beta_n x) / \sin(\beta_n l),$$

$\beta = w_n / C_p$, и скорость распространения волны C_p в проводах, как правило, для контактного провода.

Этот способ состоит в том, что возбуждение учитывается одновременно через многие точки контакта. При этом необходимо задание частотнозависимой, модальной массы демпфирования ξ . Для слабо демпфированной контактной подвески может приниматься для всех частот постоянное значение, равное 1% демпфирования [29].

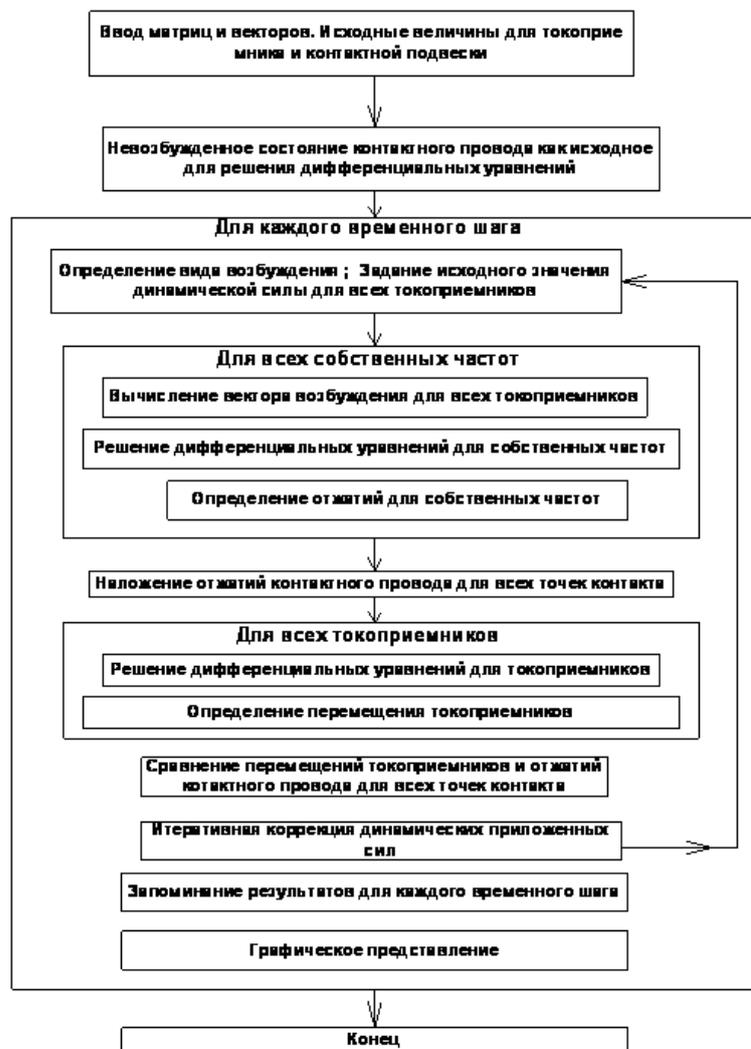


Рис.4.5. Определение сил контакта отжати метод итераций

Исходя из возбуждающих сил F решаются дифференциальные уравнения для всех собственных частот; путем наложения результатов для отдельных частот определяется итоговая реакция цепной подвески. Процесс движения для любой точки определяется из уравнения. Благодаря временным зависимостям системных матриц в частотной области получается важный результат вычислений отдельных моделируемых

константных сил, и эти вычисления для определенной конфигурации цепной контактной подвески необходимо выполнить только один раз.

На рис. 4.5. приведен алгоритм расчета контактных сил и отжатию при взаимодействии токоприемника и контактной подвески. В качестве примера результатов численных экспериментов на рассмотренной математической модели [1] на рис. 4.6. изображены графики сил нажатия токоприемника и отжатию контактного провода (y) при скорости движения 200 км/ч. Полученные результаты подтверждают достаточное приближение модели к реальной системе токоприемник – контактная подвеска, что позволяет использовать математическое моделирование как эффективное средство исследования скоростных контактных подвесок [15].

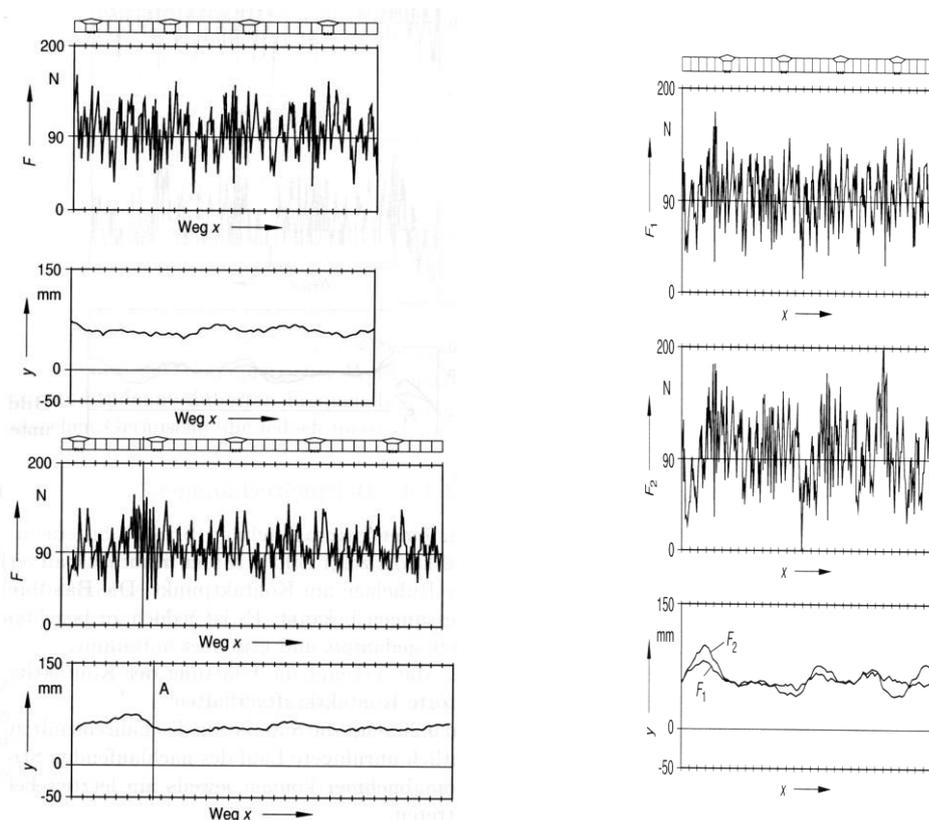


Рис. 4.6 Контактная сила (F) и отжатие (y), полученные моделированием (20) для контактной подвески Re250 и токоприемника SBS81 при скорости движения 200 км/ч: а) для одного токоприемника; б) то же, случай а), но при наличии секционного изолятора в точке А; в) для

двух токоприемников (F_1 – движущийся впереди, F_2 – движущийся позади).

4.4 Математическое моделирование электродуговых процессов при различных режимах нарушения токосъема

Здесь приведем описание аналитического и статистического расчетных методов, позволяющих произвести количественную оценку электромагнитных излучений, возникающих при различных режимах дугового нарушения токосъема.

На основании проведенного анализа результатов основных аналитических описаний дугового разряда, опубликованных в зарубежной литературе, осуществлен выбор наиболее оптимального варианта математической модели с учетом особенностей дугового токосъема на железной дороге и поставленных задач исследований. В основе главы диссертационной работы лежит общая термодинамическая модель электрической дуги:

$$\frac{dG'}{dt} = A_1 \cdot G'^{(1+n\gamma)} + A_2 \cdot G'^{n(\gamma-1)} \cdot i^2,$$

где G' – удельная проводимость дуги; i – ток дуги; n, γ – термодинамические параметры, зависящие от температуры (для электрической дуги с температурой до 12000 К принимаем $n = 0,32$; $\gamma = 0,67$); A_1, A_2 – коэффициенты, зависящие от линейной функции распределения удельного теплового потока $\eta(r)$ для характерного поперечного сечения плазменного канала дуги.

Определена эквивалентная схема замещения участка электрифицированной железнодорожной линии при дуговом нарушении токосъема (рис.4.7).

Зависимость тока дуги $i_a(t)$ от времени на основании результатов обратного преобразования Фурье:

$$i_a(t) = j(t) - \int_0^t y_N(t - \tau) \left[\left(\frac{l_a(\tau)}{G_a(\tau)} + R_t \right) i_a(\tau) + L_t \frac{di_a}{dt} \Big|_{t=\tau} \right] d\tau.$$

где R_t и L_t – эквивалентные сопротивление и индуктивность электровоза;

$l_a(\tau)$ – величина воздушного промежутка между токосъемной накладкой пантографа и контактным проводом.

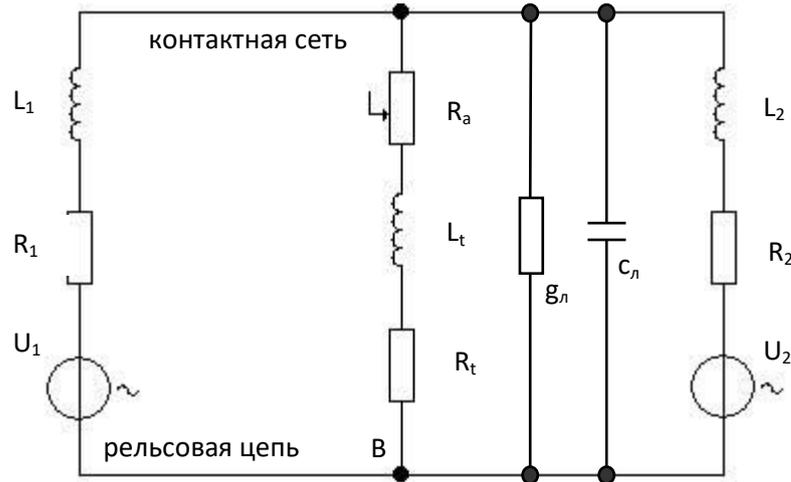


Рис. 4.7 Эквивалентная схема замещения участка тяговой сети при дуговом токосъеме

В данном случае величина мешающего тока $j(t)$ определяется как:

$$j(t) = i_{sc}(t) - \int_{-\infty}^0 y_N(t - \tau) u(\tau) d\tau,$$

где $u(\tau)$ – напряжение между контактным проводом и рельсовой цепью перед возникновением дуги.

Вышеприведенное уравнение составляют интегрально-дифференциальную систему – основу рассматриваемой аналитической модели. Для численного решения исходных уравнений использован метод Рунге – Кутты при заданных начальных условий для параметров i_a , G_a и di_a/dt . Расчет аналогичен рассмотренному ранее при моделировании нормального токосъема на участке. В качестве примера на рис.4.8

представлена амплитудно-частотная диаграмма напряженности магнитного поля при различной ширине сближения с тяговой сетью.

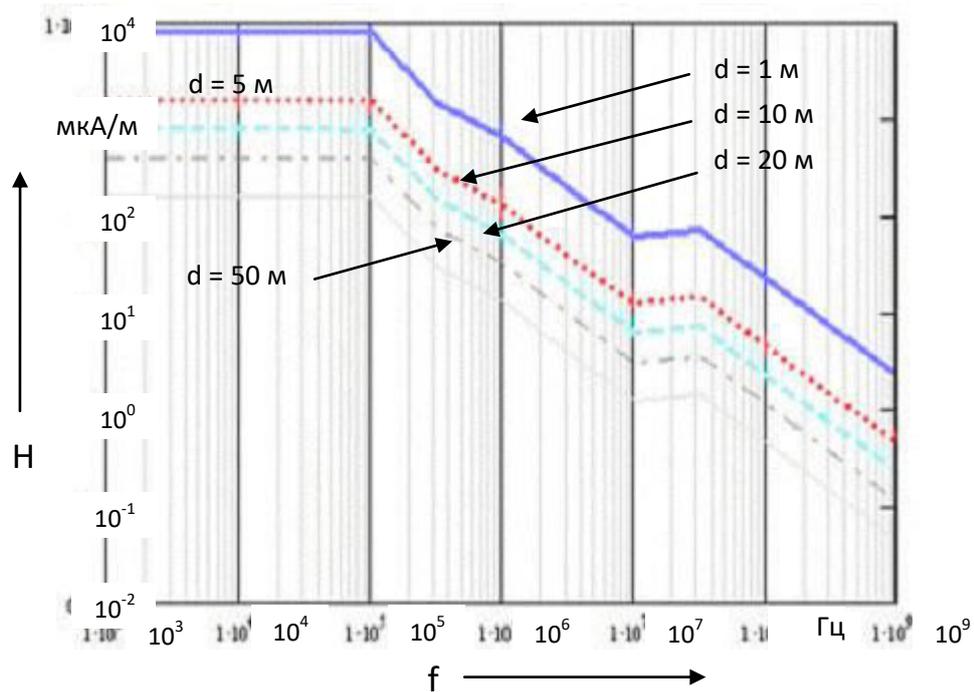


Рис. 4.8 Амплитудно-частотная диаграмма $H(f)$

Анализ результатов моделирования при вариации различных влияющих факторов показывает, что в диапазоне 130-140 кГц, ранее выбранном для работы специализированного радиоприемного устройства, входящего в состав автоматизированной системы диагностики дугового токосъема, для надежной регистрации полезного сигнала рекомендуется определить чувствительность приемника прямого усиления в диапазоне 3-6 мВ/м.

В основе статистической модели лежат аналитические выражения для магнитного и электрического полей с применением метода линейного многоуровневого регрессионного анализа. В качестве зависимых переменных используются величины напряженностей магнитного и электрического полей. Объяснительные переменные характеризуют основные параметры, влияющие на свойства электромагнитного поля при дуговом токосъеме.

На основе проведенного анализа получены следующие математические выражения для определения величин напряженностей Н и Е:

$$H = 10^{\alpha_0} \cdot f^{\alpha_1} \cdot d^{\alpha_2} \cdot \nu^{\alpha_3} \cdot I^{\alpha_4}, \text{ А/м,}$$

$$E = 10^{\beta_0} \cdot f^{\beta_1} \cdot d^{\beta_2} \cdot \nu^{\beta_3} \cdot I^{\beta_4}, \text{ В/м.}$$

Значения коэффициентов $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ ($\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$) определены путем анализа экспериментальных данных измерений. В таблице 1 представлены величины отклонений результатов вычислений с использованием статистической модели от измеренных величин напряженностей магнитного и электрического полей [4].

Таблица 1 – Отклонения между расчетными и измеренными величинами

Поле	Максимальное отклонение, дБ	Минимальное отклонение, дБ	Среднее отклонение, дБ	Дисперсия, дБ
Н	$ \Delta H_{\max} $	$ \Delta H_{\min} $	$ \Delta H $	$\sigma_{\Delta H}$
	21,2	0,4	7,5	9,9
Е	$ \Delta E_{\max} $	$ \Delta E_{\min} $	$ \Delta E $	$\sigma_{\Delta E}$
	9,2	0,07	3,7	4,6

Результаты расчетов в меньшей степени совпадают с экспериментальными данными, чем при использовании аналитической модели, однако максимальная погрешность при расчетах не превышает 21,2 дБ (16 %) при дисперсии 9,9 дБ, что позволяет применять подобный подход для количественной оценки амплитудного уровня радиопомех при различных влияющих факторах, а также в качестве быстрого и наглядного способа проверки и подтверждения результатов, полученных экспериментальным путем [12].

Вывод по четвертой главе

1. Определены задачи, решаемые при моделировании;

2. Составлена схема замещения токоприемника;
3. Моделирование с использованием связанных масс и жесткостей между точками соединения допускает производить учет пружины и массы, что позволяет рассчитывать любую подвеску, состоящую из масс, проводов и пружин;
4. Составлен алгоритм определения сил контакта отжатый метод итераций;
5. Выполнен анализ процессов дугообразования при нормальном токосъеме и его нарушениях, вызванных различными причинами, применительно к специфическим условиям электрифицированной железной дороги.
6. Разработана аналитическая модель нормального токосъема с использованием системы нелинейных уравнений для определения количественных характеристик электромагнитных излучений в данном режиме эксплуатации.
7. Выполнено построение математической модели дугового токосъема средствами специализированного программного обеспечения EWB Multisim на ЭВМ с учетом особенностей электродуговых процессов на линиях переменного тока.

Основные результаты и выводы

Основные результаты представленной диссертационной работы заключаются в следующем:

1. По результатам обзора литератур можно сделать вывод, что контактная подвеска обладает определенной периодически изменяющейся эластичностью.
2. На основании приведенного анализа составляющих контактного нажатия можно заключить, что наиболее целесообразными способами улучшения токосъема при высоких скоростях являются уменьшение приведенной массы токоприемника и выравнивание эластичности контактной подвески в пролетах.
3. Проведенными анализами последствий ухудшенного токосъема установлено, что наиболее рациональным путем решения проблемы увеличения скорости ЭПС до 220 км/ч надо считать усовершенствование токоприемников, а также углубленные исследования процессов токосъема в установившемся и переходном режимах.
4. При скоростях выше 220 км/ч при расчетах использование сосредоточенных параметров нецелесообразно;
5. Моделирование с использованием связанных масс и жесткостей между точками соединения допускает производить учет пружины и массы, что позволяет рассчитывать любую подвеску, состоящую из масс, проводов и пружин;
6. Составлено алгоритм определение сил контакта отжатый метод итераций;
7. Выполнен анализ процессов дугообразования при нормальном токосъеме и его нарушениях, вызванных различными причинами,

применительно к специфическим условиям электрифицированной железной дороги.

8. Разработана аналитическая модель нормального токосъема с использованием системы нелинейных уравнений для определения количественных характеристик электромагнитных излучений в данном режиме эксплуатации.

9. Выполнено построение математической модели дугового токосъема средствами специализированного программного обеспечения EWB Multisim на ЭВМ с учетом особенностей электродуговых процессов на линиях переменного тока.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каримов И.А. Бош мақсадимиз – кенг кўламли ислоҳатлар ва модернизация йўлини қаътият билан давом эттириш. 18 январда Ўзбекистон республикаси Вазирлар Маҳкамасининг 2012 йилда республикани ижтимоий – иқтисодий ривожлантириш якунлари ва 2013 йилги иқтисодий дастурнинг устувор вазифаларига бағишланган мажлисида Ўзбекистон республикаси Президенти И.А. Каримовнинг қилган маърузаси матни. “Халқ сўзи” газетаси, 2013 йил 19 январ, №13(5687).
2. Каримов И.А. Мировой финансово-экономический кризис, пути и меры по его преодолению в условиях Узбекистана. / И.А. Каримов.- Т.: Узбекистан, 2009.- 48 с.
3. Алиев Ш.Н., Беляев И.А. Приведенная масса авторегулируемого токоприемника. — В кн.: «Проблемы подвижного состава и тяги поездов» М., «Транспорт», 1974, с. 99-108. (Труды Московского ин-та инженеров ж.-д. транспорта, вып. 470).
4. Баталов Н. М., Петров Б. П. Тяговые электрические аппараты. М., Госэнергоиздат, 1961, 208 с.
5. Беляев И.А., Алиев Ш.Н. О целесообразности применения подъемных пружин в нижних системах авторегулируемых токоприемников.— «Вестник Всесоюз. науч.-исслед. ин-та ж.-д. транспорта», 1974, № 5, с. 7—11.
6. Беляев И.А., Бердзенишвили Б.Г., Михеев В. П., Шиян В.А. Токоприемники электроподвижного состава. М., «Транспорт», 1970, 192 с.
7. Беляев И. А. Взаимодействие токоприемника и контактной сети при высоких скоростях движения. М., «Транспорт», 1968 160 с.
8. Беляев И.А. Учет пограничного слоя при аэродинамических расчетах токоприемника. — «Вестник Всесоюз. науч.-исслед. ин-та ж.-д. транспорта», 1971, №8, с. 4—6.

9. Беляев И.А. Улучшение токосъема совершенствованием токоприемников. — «Железнодорожный транспорт за рубежом», 1974, № 5, с. 3—13.
10. Бердиев У.Т., Хушбоков Б.Х. и др. Технологические процессы технического обслуживания и текущего ремонта электровозов серии «Ўзбекистон-Йуловчи». Т.: Типография ТашИИТа 2012. стр. 108.
11. Бурков А.Т. Теоретические основы взаимодействия контактной подвески и токоприемника. Учебное пособие для студентов – магистрантов по дисциплине "Проблемы совершенствования устройств электроснабжения". Санкт – Петербург. 2002 г.
12. Власов И.И., Марквардт К.Г. Контактная сеть. М., Трансжелдориздат, 1961, 332 с.
13. Горошков Ю.И., Бондарев Н.А. Контактная сеть: Учебник для техникумов. 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1990. – 339 с.
14. Горюнов И.Т., Мозгалев В.С., Дубинский Е.В., Богданов В.А., Карташев И.И., Пономаренко И.С. Основные принципы построения системы контроля, анализа и управления качеством электроэнергии. Электрические станции, 1998, №12.
15. Дьяконов В.П. Энциклопедия Mathcad 2001 и Mathcad 11.- М.: Солон-Пресс, 2004. – 832 с.
16. Жежеленко И.В. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях. М.: Энергоатомиздат, 1986. 168 с.
17. Корн Г. , Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров . М.: Наука , 1978. - с.576 .
18. Макаров Е.Г. Инженерные расчеты в Mathcad. Учебный курс. – СПб.: Питер, 2003.- 448 с.
19. Марквардт К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. –М.: Транспорт, 1982. -528 с.

20. Механическая часть подвижного состава. / Под ред. И.С. Бирюкова, А.Н. Савоськина и др. М.: Транспорт, 1992 . – 440 с.
21. Михеев В.П. Контактные сети и линии электропередачи: Учебник для вузов ж.-д. транспорта. — М.: Маршрут, 2003.— 416 с.
22. Иванов В.С., Соколов В.И. Режимы потребления и качество электроэнергии систем электроснабжения промышленных предприятий. М.: Энергоатомиздат, 1987. 336 с.
23. Правила содержания контактной сети электрифицированных железных дорог. М., «Транспорт», 1972, 96 с.
24. Рустамов С., Улуғмуродов Д. “Ўзбекистон темир йўллари” Модернизациялаш ва изчил ривожланиш самаралари. “Халқ сўзи” газетаси, 2013 йил 31 январ, №21(5695).
25. Правила технической эксплуатации железных дорог Республики Узбекистан. Ташкент 2001.
26. Справочник по электроподвижному составу, тепловозам и дизель – поездам. / Под ред. А.И. Тищенко, Т.1, М.: Транспорт, 1976. – 432 с.
27. Электровоз ВЛ80С. Руководство по эксплуатации/Н.М. Васько, А.С. Девятков, и др. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Транспорт, 1990.-315 с.
28. "Fahrleitungen elektrischer Bahnen: Planung, Berechnung, Ausführung"/ Gukov und a. – Stuttgart: Teubner, 1997. – 718 s.
29. Джураев.А.Х Научный руководитель: к.т.н Б.Х. Хушбоқов. «Ўқув жараёнига виртуал лабораторияларни жорий қилиш афзаллиги тўғрисида». В сборнике VIII межвузовской научно-методической конференции студентов магистратуры, стажеров и соискателей Посвященной 80-летию ТашИИТ «Актуальные проблемы научно-педагогической работы», (25 ноября 2011 года, ТашИИТ).
30. Джураев.А.Х Научный руководитель: к.т.н Б.Х. Хушбоқов. «Ток қабул қилгич ва контакт тармоғи ўзоро таъсири натижасида ҳосил булувчи электр ёйи ҳосил бўлиш жараёнини аналитик моделлаштириш». В

сборнике трудов X Межвузовской научно-практической конференции студентов, бакалавров и магистратуры, стажеров и соискателей «Молодой научный исследователь», (3-4 апреля 2012 года), ТашИИТ.

31. Джураев.А.Х Научный руководитель: к.т.н Б.Х. Хушбоқов. «Научно-практической конференции студентов магистратуры по итогам работы над диссертацией». «Исследование взаимодействия контактного провода с токоприемником» (12 октябрь 2012 года), ТашИИТ.

32. Джураев.А.Х Научный руководитель: к.т.н Б.Х. Хушбоқов. «Ток қабул қилгич ва контакт тармоғи ўзоро таъсири натижасида юзага келувчи электр ёйини математик моделлаштириш».XVII-он научно-практической Конференции «Иновация-2012»,(19-20 октябрь 2012 года),ТГТУ.