

И. С. МОРГУНОВ



НТБ
ДНУЖТ

ТРАНСЖЕЛДОРИЗДАТ

1934

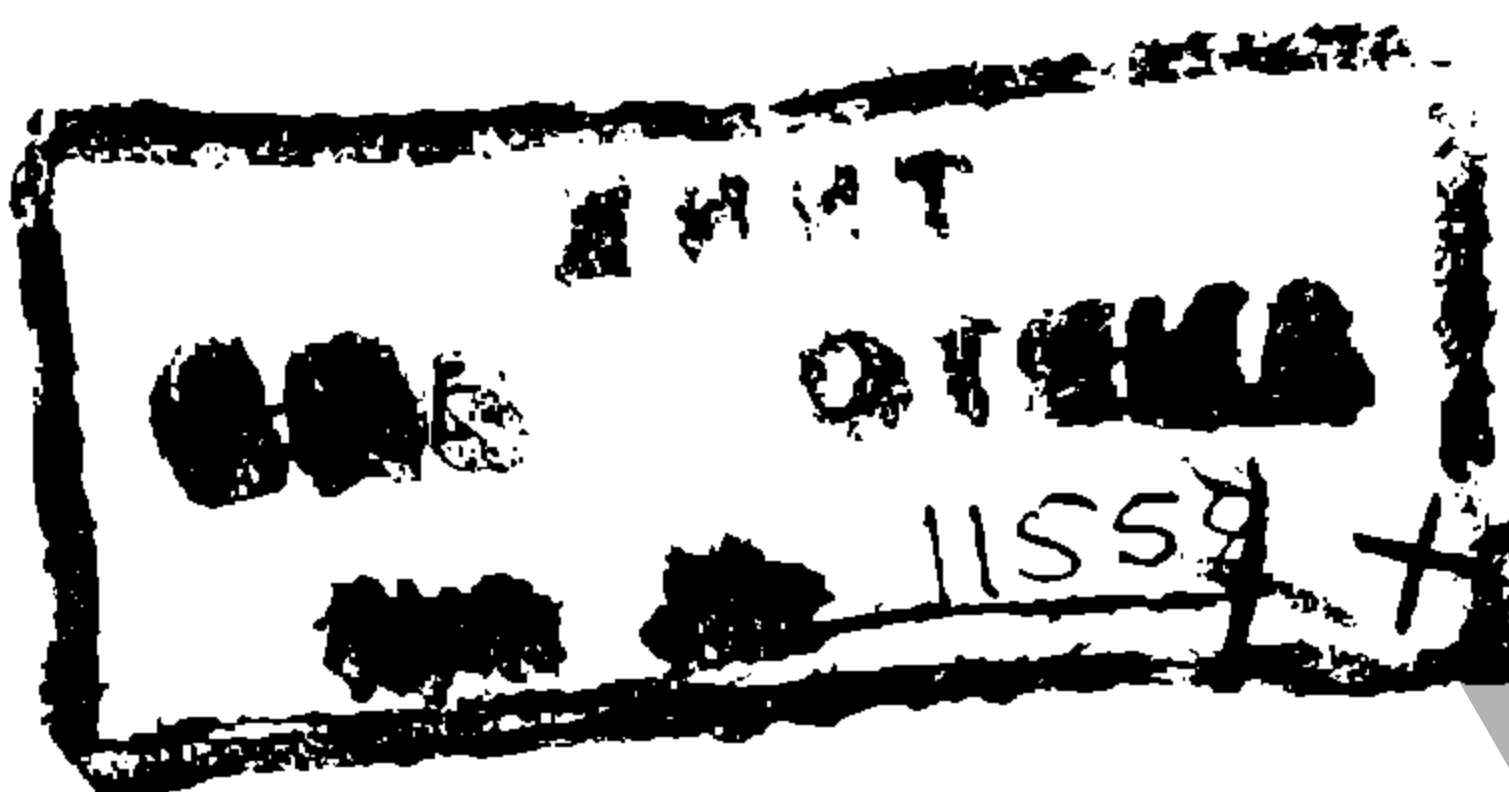
И. С. МОРГУНОВ

62133
1479

КУРС ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Одобрено Цопкадром НКПС
в качестве учебника для
втузов жел.-дор. транспорта

ПРОВЕРЕНО 1958



ГОСУДАРСТВЕННОЕ
ТРАНСПОРТНОЕ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКВА ★ ТРАНСЖЕЛДОРИЗДАТ ★

1934

Книга составлена применительно к учебной программе для путейско-строительной специальности в транспортных вузах, но она может служить также руководством в изучении элементов оборудования электрических жел. дорог на эксплуатационной и экономической специальностях. В книгу вошли, помимо устройства электрических жел. дорог, расчеты мощности тяговых подстанций, контактной сети, тяговые расчеты, расчеты электровозного парка и электроснабжения электрических жел. дор.

Рецензенты: проф. А. Б. Лебедев и инж. А. М. Кудряшев

Редактор А. Н. Фомин

Техн. редактор и корректор В. В. Антонов

Уполн. Главлита В—93793

ЖДИЗ 1305

Ж 1-а

Тираж 6160

Разм. бум. 62 × 94 ¹/₁₆

19¹/₂ п. л., в 1 п. л. 49920 тип. зн.

Зак. 16353

Сдано в набор 21/IX 1934 г

Подписано к печати 26/XII 1934 г.

1-я типография Трансжелдориздата, Москва, Б. Переяславская, 46

НТБ
ДНУЖТ

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	Стр. 6
Введение	8

Глава I

Общие сведения об элементах полной схемы энергоснабжения и обустройств электрических жел. дор.

Статья 1. Элементы схемы энергоснабжения и обустройств электрических жел. дорог

§ 1. Центральные электрические станции	11
§ 2. Повысительные подстанции	24
§ 3. Линии передачи энергии	28
§ 4. Понижительные подстанции	39
§ 5. Тяговые преобразовательные подстанции	48
§ 6. Контактная сеть	56
§ 7. Электровозы	60
§ 8. Коэффициент полезного действия всей схемы энергоснабжения электрических жел. дорог	70
§ 9. Обеспечение надежности питания электр. жел. дор. энергией	72

Статья 2. Системы тока и величина напряжений на электрических железных дорогах

§ 10. Краткий исторический очерк развития различных систем тока и напряжения	73
§ 11. Распространение различных систем тока и напряжений на электрических жел. дор.	75
§ 12. Перспективы развития систем тока и напряжения	77
§ 13. Технические и экономические характеристики различных систем тока и напряжения	84

Глава II

Электродвигатели, электровоз и тяговые расчеты

Статья 3. Электродвигатели и электровоз

§ 14. Принцип работы тяговых электродвигателей постоянного и переменного тока	90
§ 15. Понятие о конструкции тяговых электродвигателей постоянного тока	98
§ 16. Электромеханические характеристики тяговых электродвигателей серий постоянного тока	100
§ 17. Мощность электродвигателя	105
§ 18. Пуск в ход и регулирование скорости	109

	<i>Стр.</i>
§ 19. Тяговые характеристики электродвигателей	120
§ 20. Перестроение тяговых характеристик электродвигателей постоянного тока	124
§ 21. Универсальные характеристики электродвигателей постоянного тока	126
§ 22. Диаграмма касательных сил тяги электровоза в функции скорости	132
§ 23. Общие сведения об электрооборудовании электровозов постоянного тока	136
§ 24. Общие сведения о моторных вагонах	142

Статья 4. Тяговые расчеты

§ 25. Силы сопротивления движению	145
§ 26. Силы тяги электровоза и мотор-вагона	158
§ 27. Тормозные силы и рекуперация энергии	162
§ 28. Уравнение движения поезда	172
§ 29. Определение веса поезда	175
§ 30. Определение скоростей движения и времени хода поезда	179
§ 31. Определение расхода электрической энергии на движение поезда	191
§ 32. Проверка тяговых электродвигателей на нагревание	196

Глава III

Устройство и расчет контактной сети

Статья 5. Устройство контактной сети

§ 33. Системы подвески контактной сети	208
§ 34. Системы компенсирования контактной сети	212
§ 35. Опорные конструкции и провода контактной сети	216
§ 36. Рельсы, как обратный провод	224
§ 37. Питание и секционирование контактной сети	229
§ 38. Электролиз и защита подземных металлических сооружений	234

Статья 6. Расчет контактной сети

§ 39. Принцип электрического расчета контактной сети	237
§ 40. Токораспределение и определение падения напряжения до токоприемника поезда	240
§ 41. Электрический расчет контактной сети методом сечений графика движения	251
§ 42. Приближенный метод расчета контактной сети	258
§ 43. Проверка сечения проводов контактной сети по токам короткого замыкания	266
§ 44. Общие сведения о расчете механической прочности контактной сети	263

Стр.

Глава IV

Устройство и расчет мощности тяговых подстанций

Статья 7. Устройство тяговых подстанций

§ 45. Тяговые подстанции с ртутными выпрямителями	275
§ 46. Влияние выпрямленного тока на провода связи	284
§ 47. Тяговые подстанции с мотор-генераторами	287
§ 48. Технико-экономическая характеристика тяговых подстанций	289
§ 49. Расположение подстанций по линии жел. дор.	290
§ 50. Подвижные тяговые подстанции	292

Статья 8. Расчет мощности тяговых подстанций

§ 51. Принцип расчета мощности подстанций	295
§ 52. Определение мощности подстанций по графику движения поездов	296
§ 53. Приближенный метод определения мощности подстанций	298
§ 54. Определение нагрузки от электрической жел. дор. на центральную электрическую станцию	300

Глава V

Электровозный парк и деповские устройства

§ 55. Обслуживание электровозов бригадами	301
§ 56. Виды технического осмотра и ремонтов электровоза	302
§ 57. Определение времени оборота электровоза	303
§ 58. Определение эксплуатируемого парка электровозов	305
§ 59. Определение инвентарного парка электровозов	307
§ 60. Определение числа электровозных стойл в депо	308

Литература.

311

НТБ
ДНУЖТ

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящий курс электрических ж. д. составлен применительно к программе путейско-строительной специальности транспортных вузов и может служить руководством в изучении элементов оборудования электрических ж. д. на эксплуатационной и экономической специальностях. Курс является общим, охватывающим не только электрические ж. д. но и общие сведения об электрических станциях, повысительных подстанциях, линиях электропередач и понизительных подстанциях. Изложение этих элементов вызвано отсутствием в учебных планах транспортных вузов не электро-механической специальности предметов, помимо общего небольшого курса электротехники, в которых об этом давались хотя общие сведения.

Однако ознакомление с этими элементами необходимо для выявления условий энергоснабжения при комплексном предварительном проектировании новых ж. д. с электровозной тягой или при электрификации существующих ж. д. В курсе главное внимание уделяется магистральным железным дорогам с электровозной тягой на постоянном токе. Для ознакомления с другими системами тока в отдельной статье курса даны существующие системы тока и напряжения на электрических жел. дор., их технико-экономическая характеристика и освещается также вопрос об установлении стандартной системы тока и напряжения для электрификации жел. дор. СССР.

При изложении электрического расчета контактной сети приведены способы, основанные на законах строительной механики, что для студентов транспортных вузов путейско-строительной специальности является более понятным.

В тяговых расчетах введены те обозначения, которые приняты в книге проф. К. А. Оппенгейма, являющейся руководством по изучению тяговых расчетов с паровозной тягой на путейско-строительной специальности.

Следует отметить большую сложность и трудность в составлении такого общего курса, в котором, помимо устройства электрических жел. дор., входят и расчет мощности подстанции и контактной сети, и тяговые расчеты, и расчеты электровозного парка, и энергоснабжение электрических жел. дор. При составлении курса

были использованы имеющиеся в литературе труды по отдельным специальным вопросам электрических жел. дор. и заимствованы некоторые из приводимых рисунков. Общий курс электрических жел. дорог с таким широким комплексным охватом вопросов появляется в литературе впервые, поэтому автор не исключает возможности наличия некоторых недостатков в курсе и будет благодарен за указания о желательных и необходимых изменениях и дополнениях.

Считаю своим долгом выразить благодарность проф. А. Б. Лебедеву и инж. А. М. Кудряшеву за ценную помощь, выразившуюся в форме критики и советов по курсу в рукописи.

И. Моргунов

Москва

10 VI 1934 года

НТБ
ДНУЖТ

ВВЕДЕНИЕ

Началом практического применения электрической тяги является трамвай, построенный в 1881 году в Gross Licherfeld'e под Берлином, протяжением в 2,45 км.

Насколько характерно развитие электрической тяги в трамвайном движении в последующие годы как в Европе, так и, в особенности, в Америке видно из того, что в 1890 году в Америке протяжение трамвайных линий было равно 2500 км, а к 1897 г. уже составляло 25000 км.

Развитие электрической тяги в трамвайном движении и работа над усовершенствованием конструкций оборудования трамвайных линий наиболее интенсивно проводились в Америке. Первой магистральной электрической жел. дорогой, где впервые был применен электровоз, является жел. дор. Baltimore and Ohio в Америке, где в 1896 году был электрифицирован подход к Балтиморе на протяжении 7,0 км, из которых 2,5 км проходило тоннелем. Электровоз этого первого электрифицированного участка магистральной железной дороги был весом 90 т. При руководящем под'еме 8⁰/₁₀₀, вес товарного поезда был 1700 т и пассажирского — 500 т.

В Европе электровозная тяга была применена впервые в 1901 г. в Италии на линии Milano—Vareso—Porto—Ceresio на протяжении 75 км и в 1902 году на магистральной линии Leco—Colico—Chiavenna с ветвью Colico—Sondrio общим протяжением 106 км. В дальнейшем развитие электровозной тяги на магистральных жел. дор. как Европы, так и Америки шло попутно с развитием конструкций подвижного состава и элементов оборудования.

В дореволюционной России впервые электрическая тяга была применена в 1892 г. на Киевском трамвае.

Несмотря на более позднее применение электрической тяги в трамвайном движении, по сравнению с другими странами Европы, дальнейшее развитие ее в дореволюционной России до 1910 г. шло медленным темпом.

Применение электрической тяги в России до Октябрьской революции ограничивалось исключительно трамвайным движением.

Впервые вопрос о широкой электрификации промышленности, транспорта и сельского хозяйства был поставлен лишь после Октябрьской революции.

По предложению Ленина 7 февраля 1920 года постановлением ВЦИК была создана Государственная комиссия по электрификации России. В результате работ этой комиссии (ГОЭЛРО) был составлен план электрификации всех отраслей народного хозяйства: промышленности, транспорта и сельского хозяйства.

На VIII Всероссийском съезде Советов 22 декабря 1920 года по поводу плана ГОЭЛРО Ленин сказал «На мой взгляд, это — наша

вторая программа партии. . .». Резолюция VIII съезда Советов говорит: «Съезд одобряет работу ВСНХ и в особенности ГОЭЛРО по разработке плана электрификации России. оценивает этот план, как первый шаг великого хозяйственного начинания, поручает ВЦИК завершить разработку этого плана и утвердить его, при том обязательно в кратчайший срок. Поручает принять все меры к самой широкой пропаганде этого плана. Изучение этого плана должно быть введено во всех без изъятия учебных заведениях республики и т. д.» План ГОЭЛРО рассчитывался на выполнение в течении 10—15 лет (основной вариант—на 15 лет, оптимальный—на 10 лет). В отношении создания энергетической базы для электрификации по плану ГОЭЛРО была намечена постройка 30 электростанций общей мощностью 1 500 000 *квт.* Электрификация магистральных железных дорог намечалась в следующем объеме: в первую очередь 2 832 *км.*, и во вторую очередь 1 091 *км.*, всего протяжением 3 923 *км.*

В 1920 году суммарная мощность всех электрических станций составляла 1 149 тыс. *квт.*, а через 10 лет в 1930 году стала уже 2 894 тыс. *квт.*, т. е. план ГОЭЛРО по постройке электрических станций был перевыполнен.

В области электрификации жел. дор. к десятилетию плана ГОЭЛРО (декабрь 1930 года) была электрифицирована пригородная железная дорога Баку—Сабунчи—Сураханы протяжением около 20 *км.* с мотор-вагонной тягой, соединяющая Баку с нефтяными промыслами (открыта с июля 1926 года), и электрифицирован пригородный участок Северных жел. дор. протяжением 52,4 *км.*, из которых Москва—Мытищи протяжением 17,7 *км.* был сдан в полную эксплуатацию 10 октября 1929 года и последующие участки Мытищи—Пушкино—Правда длиной 17,8 *км.* и Мытищи—Болшево—Щелково, длиной 16,8 *км.*, были закончены к 1 ноября 1930 года. Общая длина всех электрифицированных участков к декабрю 1930 г. составляла 72,4 *км.*

Историческим решением в области электрификации жел. дорог СССР, определившим роль электрификации жел. дор. в области реконструкции железнодорожного транспорта, являются постановления июньского пленума ЦК и ЦКК ВКП (б) 1931 года, гласящие; что «ведущим звеном реконструкции железнодорожного транспорта в перспективе его развития является электрификация жел. дор.» и решение XVII партконференции о том, что «важнейшим элементом технической реконструкции народного хозяйства является создание новейшей энергетической базы, основанной на широчайшей электрификации промышленности и транспорта и постепенном внедрении электроэнергии в сельском хозяйстве».

В настоящее время в эксплуатации находятся следующие электрифицированные участки жел. дор.

а) магистральные:

1. Сталини-Зестафони (Сурамский перевал) Закавказск. жел. дор. протяжением 63 *км.*

2. Чусовая—Кизел (Луньевская ветка) Пермской жел. дор. протяжением 112 км.

б) пригородные:

1. Баку—Сабунчи—Сураханы протяжением 20 км.

2. Москва—Загорск и Мытищи—Щелково, Северной жел. дор. протяжением 89 км.

3. Москва—Обираловка, Моск.-Курской жел. дор.—24 км.

4. Москва—Люберцы, Моск.-Казанской жел. дор.—21 км.

5. Ленинград—Петергоф, Октябрьской ж. д.—40 км.

Протяжение всех электрифицированных линий, находящихся в настоящее время в эксплуатации, составляет таким образом 369 км.

Большие работы по электрификации жел. дор. подлежат выполнению во второй пятилетке.

По плану второй пятилетки, принятому XVII съездом ВКП(б), должно быть электрифицировано 5000 км жел. дор., для чего потребуется иметь к 1938 году 410 электровозов, вместо 42, имеющих в настоящее время. Для выполнения этого грандиозного плана электрификации жел. дор., который является реальным и выполнимым, необходима мобилизация вокруг вопросов электрификации жел. дор. всей общественности, необходима напряженная об'единенная работа промышленности и транспорта, необходима подготовка высококвалифицированных кадров железнодорожного транспорта.

НТБ
ДНУЖТ

ГЛАВА I

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕМЕНТАХ ПОЛНОЙ СХЕМЫ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ И ОБУСТРОЙСТВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЖЕЛ. ДОР.

Статья 1. ЭЛЕМЕНТЫ ПОЛНОЙ СХЕМЫ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ И ОБУСТРОЙСТВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

§ 1. Центральные электрические станции

Питание электрических железных дорог энергией производится от центральных электрических станций: тепловых или гидроэлектрических или от комплексного их объединения (кольцевания). Передача энергии от центральных электрических станций к пунктам питания, находящимся вдоль линии железной дороги, так называемым тяговым железнодорожным подстанциям, осуществляется при помощи линии передачи энергии. При наличии в районе электрифицируемой жел. дороги районной понизительной подстанции, снабжение дороги электроэнергией может быть осуществлено через районную понизительную подстанцию.

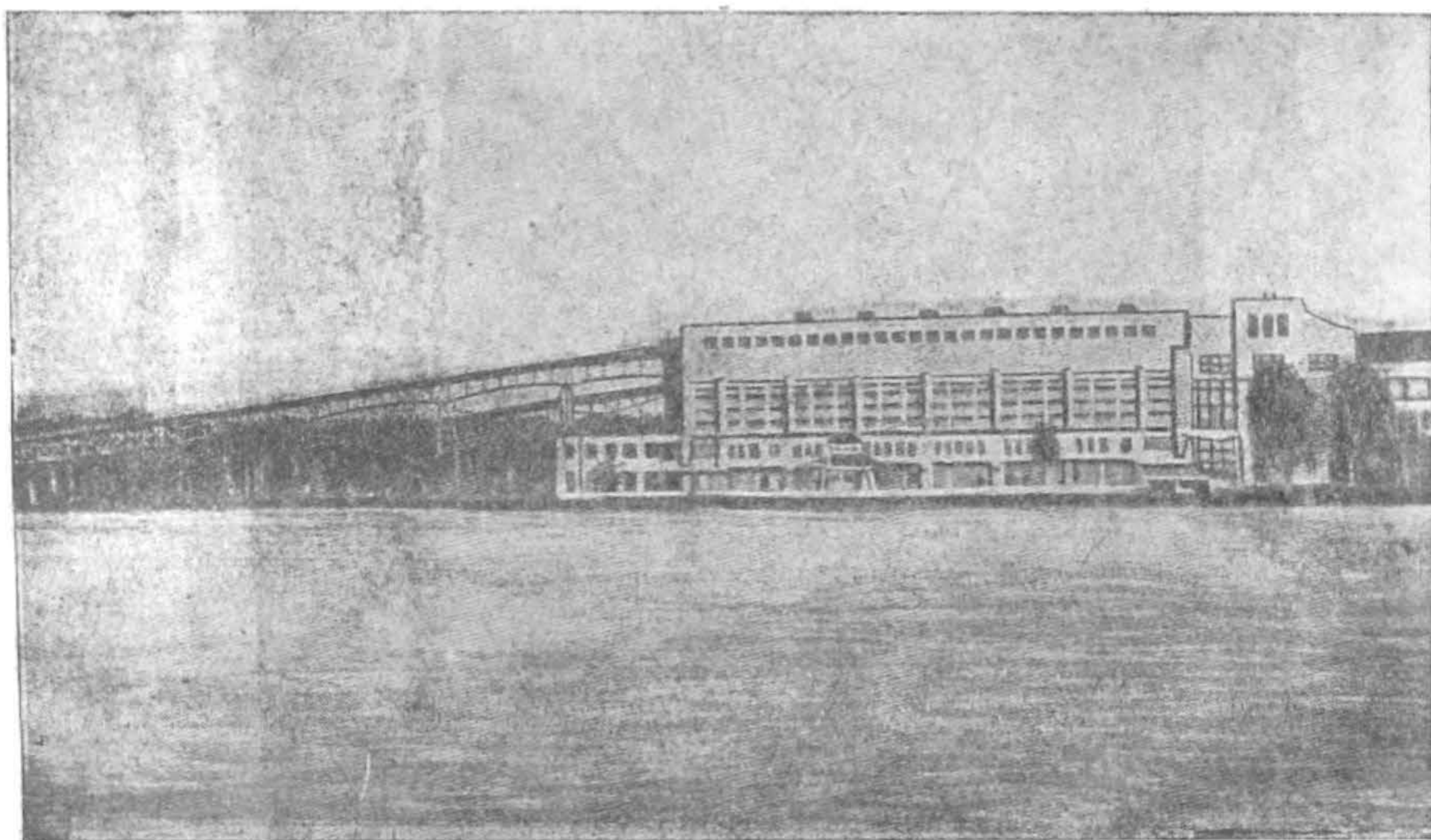


Рис. 1. Общий вид Шатурской электростанции имени Ленина.

На тепловых электрических станциях топливо, сжигаемое в топках паровых котлов, образует пар высокого давления, который от котлов по паропроводам поступает в паровые турбины, где и создает механическую энергию. На одной оси с паровой турбиной находится генератор электрической энергии, который при своем

вращении преобразовывает механическую энергию в электрическую. Паровая турбина и генератор носят общее название—турбогенератор. В качестве топлива, сжигаемого в топках котлов, чаще всего служат: каменный уголь (преимущественно низкой калорийности), сланцы и торф.

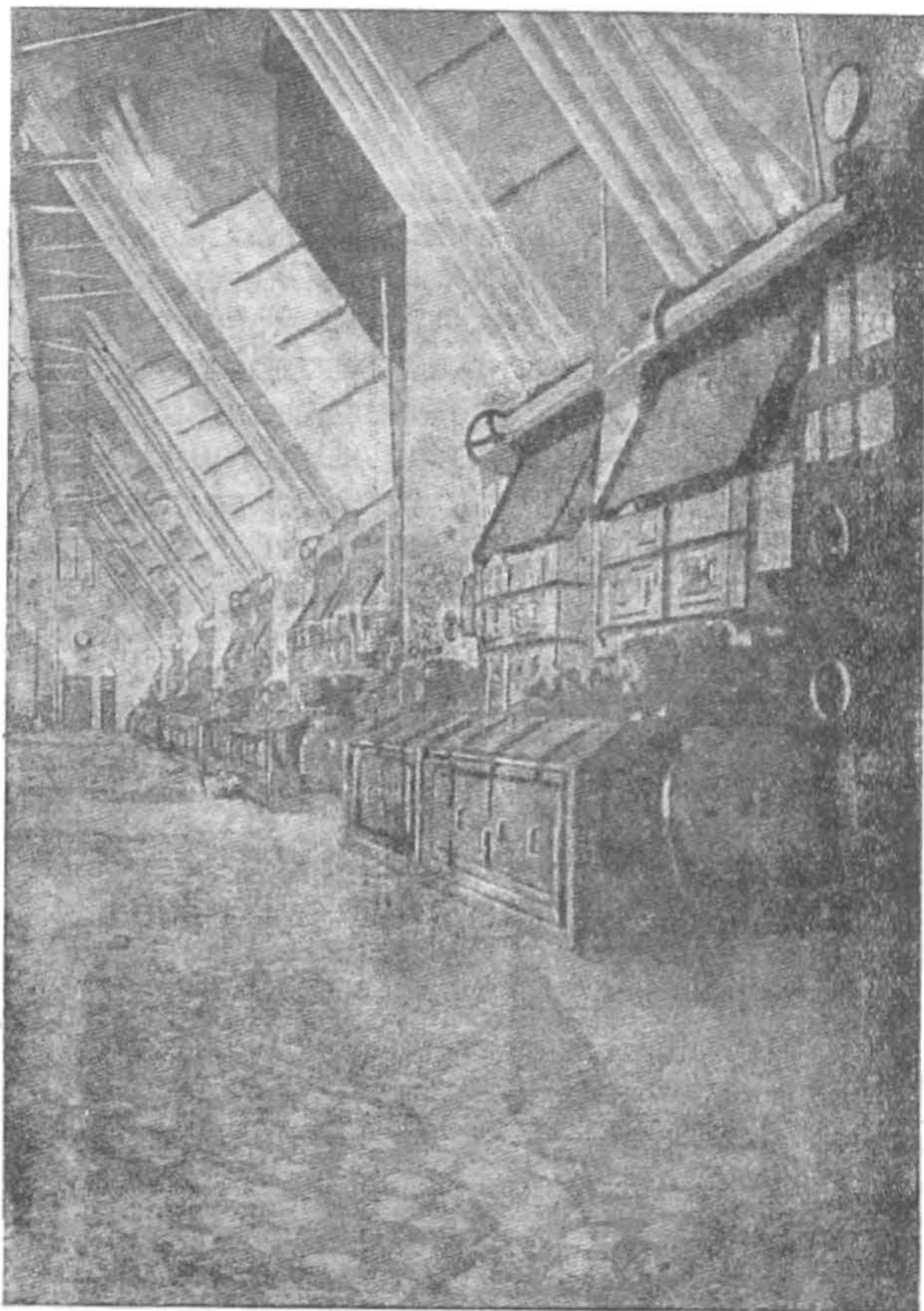


Рис. 2. Котельная Шатурской электростанции.

Помимо топлива, для тепловых электрических станций необходимо наличие достаточной мощности водного источника для снабжения водой котлов и охлаждения конденсаторов. Следовательно, наилучшее месторасположение тепловых электрических станций определяется наличием двух факторов: больших запасов местного топлива и водного источника.

Общий вид Шатурской районной электростанции имени Ленина расположенной на берегу Черного озера, изображен на рис. 1.

Шатурская электростанция работает на торфяном топливе. С левой стороны электростанции видна эстакада, по которой в вагонетках подвозится торф для засыпки в бункера.

На рис. 2 показана котельная электростанции.

Вверху рис. видны рукава от бункеров, по которым торф сваливается в шахты топок. Ниже рукавов—наклонные плиты с зубчатыми заслонками, преграждающие движение торфа. Движение этих

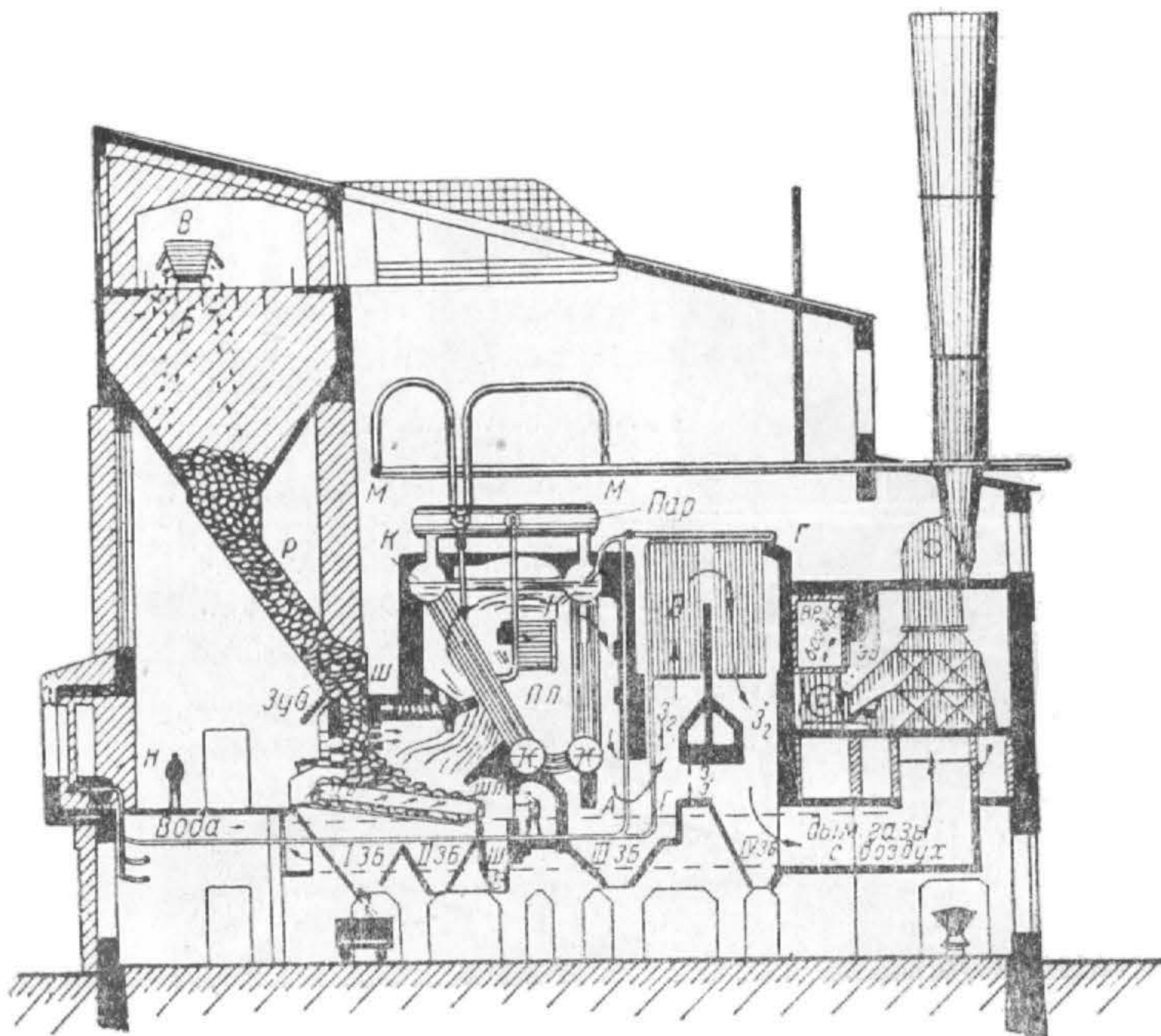


Рис. 3. Разрез через котельную Шатурской электростанции.

В—вагонетка с торфом, Б—бункер, Р—рукав, Зуб—плита с зубчаткой, открывающая или преграждающая движение торфа; Ш—шахта; ЦР—цепная решетка; ШЛ—шлакосниматель; ШБ—шлаковый бункер; I, II, III, IV, ЗБ—золевые бункера; З₁, З₂—поворотные заслонки, открывающие или преграждающие прямой путь газам; Э—экономайзер; З₃, З₄—поворотные заслонки, открывающие или преграждающие путь раскаленным газам через экономайзер; ВР—воздушный резервуар; ЭВ—электрический вентилятор; Н—электрический водяной насос; АГ—трубы, по которым вода поступает в котлы или прямо, или через экономайзер; К—котел; Пар—паросборник; ПП—перегреватель пара; М—магистраль, по которым пар поступает к турбинам.

заслонок, регулирующих открытие и закрытие рукава бункера, производится при помощи моторов. Внизу видны дверцы топок.

Рис. 3 показывает разрез котельной электростанции.

В настоящее время для трех турбогенераторов на Шатурской электростанции установлено 11 котлов. Площадь нагрева каждого котла 750 м². Пар из котлов поступает в паросборники, а из паросборников для перегрева—в пароперегреватели. От пароперегрева-

телей по паропроводам перегретый пар при температуре 350°C . и давлении 16 атм поступает к паровым турбинам.

Общий вид турбогенератора изображен на рис. 4.

Впереди паровая турбина с ее паропроводами, дальше генератор электрической энергии. Мощность турбогенератора—16 000 квт. При трех турбогенераторах, работающих в настоящее время, общая мощность Шатурской электростанции — 48 000 квт. В дальнейшем развитии мощности электростанции предполагается установка еще

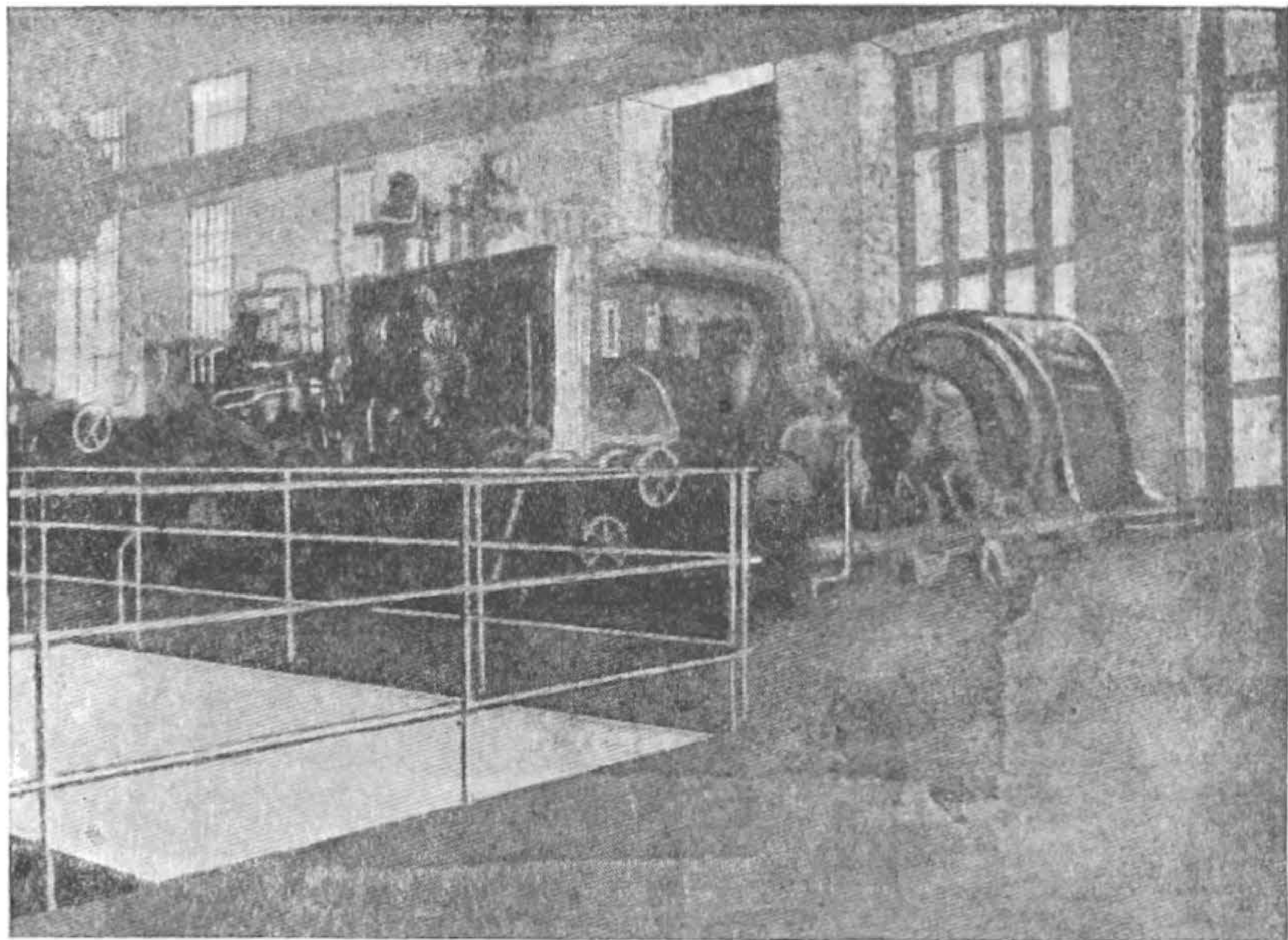


Рис. 4. Общий вид турбогенератора Шатурской электростанции.

двух турбогенераторов, мощностью 44 000 квт каждый. Полная проектная мощность Шатурской электростанции — 136 000 квт.

Тепловые электрические станции разделяются на конденсационные и теплофикационные. Шатурская электростанция является конденсационной станцией, так как отработавший в паровых турбинах пар поступает в конденсатор для охлаждения, но не используется для отопительных и других целей, что имеет место в теплофикационных электрических станциях.

Одними из основных технических характеристик тепловых электростанций являются: рабочее давление пара (в атм) и температура его (в $^{\circ}\text{C}$) в вентиле турбины. В СССР Стандартным бюро Главэнерго ВСНХ ранее был принят¹ для конденсационных

¹Лаговской «Тепловые установки центральных электростанций», стр. 48.

тепловых электрических станций следующий стандарт давлений и температуры пара (в *атм* и $^{\circ}\text{C}$ у вентиля турбины):

давление в <i>атм</i> .	16	20	29	55
температура в $^{\circ}\text{C}$	350	375	400	450

В настоящее время в СССР стандарт величин давления пара и температуры его у вентиля турбины не являются окончательно установленными.

Инж. Горянов считает, что для конденсационных тепловых электрических станций применение давления 55—60 *атм*, т. е. верхнего предела ранее установленного стандарта нецелесообразно, и что от низких давлений до 40 *атм* в дальнейшем, без промежуточной ступени 55—60 *атм*, целесообразнее переходить непосредственно к высоким давлениям, т. е. 100 *атм* и выше.¹

Выбор между низким и высоким давлением производится на основании технико-экономических подсчетов. Для теплофикационных электрических станций, комбинированно вырабатывающих электрическую и тепловую энергию, наиболее целесообразно применение высокого давления, т. е. 100 *атм* и выше.

Следует отметить, что давление порядка 50—60 *атм* по сравнению с давлением порядка 100 *атм*, как указывает Горянов, оказывается для теплофикационных станций еще более нецелесообразным, чем для чисто конденсационных электростанций.

Теплофикационные электрические станции, имеющие значительное технико-экономическое преимущество по сравнению с конденсационными, получают все большее и большее развитие.

На II Всемирной энергетической конференции, происходившей летом 1930 г. в Берлине, инж. Шерешевский (Франция) в докладе по вопросу о комбинированной выработке тепловой и электрической энергии, т. е. проблеме теплофикации, охарактеризовал главные преимущества теплофикации, которые, по его мнению, заключаются в том, что:

1) создается возможность упразднения многочисленных изолированных котельных при домах;

2) отпадает необходимость снабжения жилищ топливом;

3) теплоцентральный может питаться низкими сортами топлива, тогда как изолированные котельные требуют дорогих сортов топлива;

4) при теплофикации зданий посредством распределительной отопительной сети чрезвычайно облегчается регулирование отопления (простым поворотом крана); такая гибкость системы дает значительную экономию расходов;

5) теплоотдача теплоцентралей выше топок изолированных котельных;

¹ «Типизация паровых турбин и тепловой схемы больших электростанций». Часть 1, стр. 202.

6) система теплофикации дает возможность выработки дешевой электроэнергии.

Коэффициент полезного действия теплофикационной электрической станции, вследствие лучшего использования тепла, чем в конденсационных электрических станциях, значительно выше.

Коэффициент полезного действия конденсационных электрических станций, в зависимости от типа оборудования и мощности, исчисляется в пределах от 18—26% и в настоящее время как максимум в лучших установках достигает 30%.

Коэффициент же полезного действия теплофикационной электрической станции, комбинированно вырабатывающей электрическую и тепловую энергию, достигает величины 50—60%, т. е. в два раза выше, чем в конденсационных электрических станциях.

Так как передача тепловой энергии на значительное расстояние затруднительна в силу больших потерь, месторасположение теплофикационных электрических станций связано с наличием находящихся вблизи потребителей тепловой энергии крупных промышленных комбинатов и городов. Мощность отдельных тепловых электрических станций как конденсационных, так и теплофикационных, существующих в настоящее время, достигает больших величин. К одной из наиболее крупных конденсационных электрических станций следует отнести американскую тепловую электрическую станцию State Line, расположенную на берегу озера Мичиган в гор. Гаммонд штата Индиана, на границе со штатом Иллинойс. При полном развитии мощности электростанция рассчитана на 1 040 000 *квт*. Мощность первой очереди, сданная в эксплуатацию в октябре 1930 года, равна 208 000 *квт*, которая получается от одного трехвального турбогенератора, обслуживаемого шестью паровыми котлами. Давление пара — 46,0 *атм* и температура — 399° Ц. Дальнейшее развитие предусматривает установку 4 турбогенераторов того же типа мощностью каждый по 208 000 *квт*.

Большое распространение на тепловых электрических станциях получили одновальные турбогенераторы.

Наибольшая мощность одного из них, установленного на одной американской тепловой электрической станции Hudson-Avenue, открытой для эксплуатации в 1932 году, равна 160 000 *квт*. Давление пара — 88,1 *атм*, температура 388° Ц.

Электрическая энергия, получаемая от центральных электрических станций, вследствие небольшого напряжения на клеммах генератора электрической энергии, не может быть, без повышения напряжения, передана на значительное расстояние. В силу этого, при каждой электрической станции должна быть повысительная подстанция, на которой, посредством трансформаторов, повышается напряжение до необходимой величины.

Для защиты от повреждений со стороны линий передачи как генераторов, так и трансформаторов, в повысительной части

электростанции, т. е. в повысительной подстанции, устанавливаются масляные выключатели и аппаратура защиты.

Принципиальная упрощенная схема тепловой электрической станции приведена на рис. 5.

На гидроэлектрических станциях электрическая энергия получается за счет использования мощности падающей воды и зависит от двух величин: расхода воды и величины напора.

Расход воды исчисляется в $\text{м}^3/\text{сек}$, а величина напора, как разность отметок верхнего и нижнего бьефов,—в метрах. В зависимости от величины напора гидроэлектрические станции разделяются на низконапорные, средненапорные и высоконапорные. К низконапорным относятся те, высота напора у которых составляет до 20 метров.

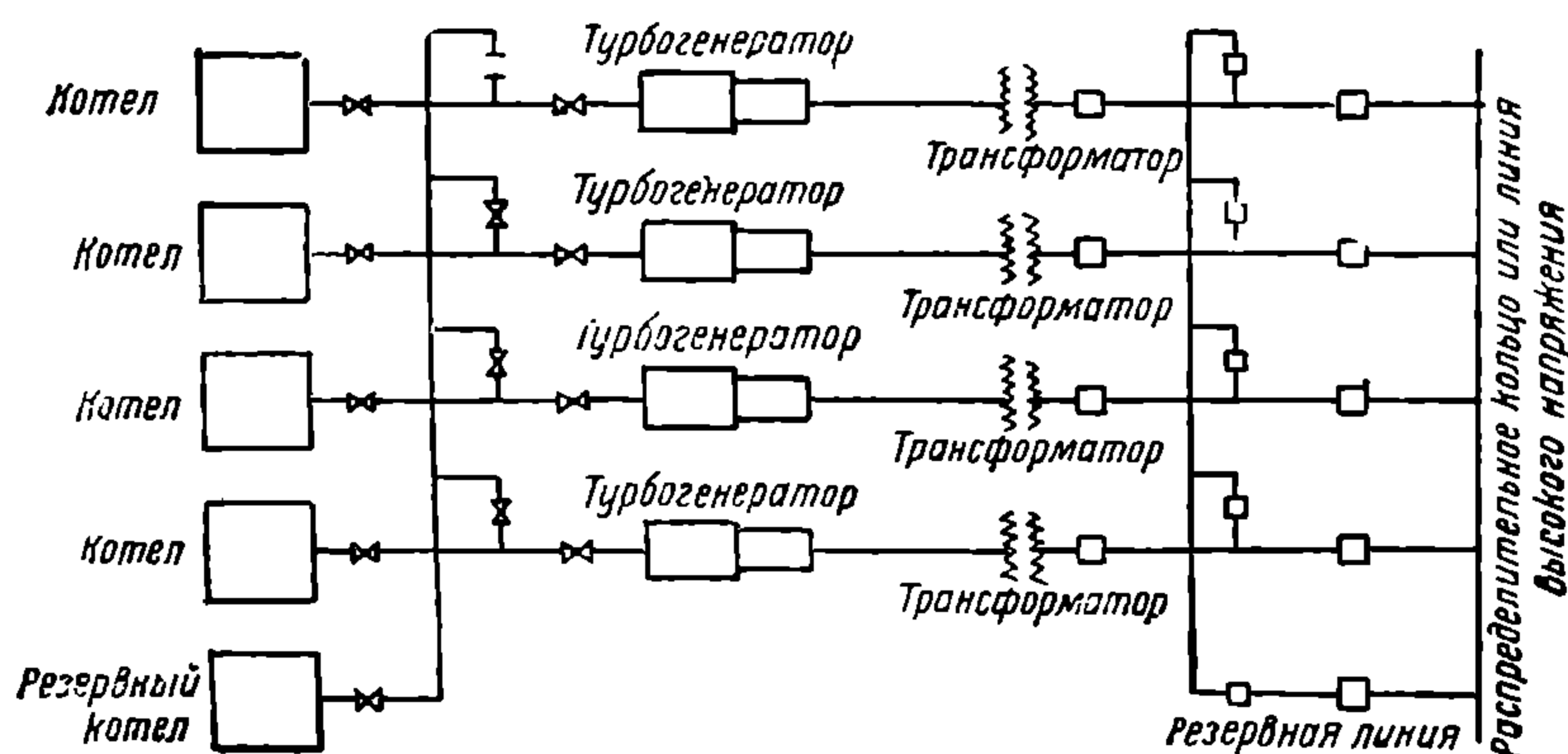


Рис. 5. Принципиальная упрощенная схема тепловой электростанции.

К числу низконапорных гидроэлектрических станций может быть отнесена Волховская гидроэлектрическая станция (высота напора—10,5 м, мощность—56 000 кВт). Средненапорные гидроэлектрические станции имеют высоту напора от 20 до 50 м, к каковым может быть отнесена Днепротэс (полная мощность—558 000 кВт), имеющая высоту напора 37,5 м.

Как в низконапорных, так и в средненапорных гидроэлектрических станциях напор создается исключительно благодаря устройству плотины. Высоконапорными гидроэлектрическими станциями называются те, у которых плотина служит для забора воды и лишь отчасти напора; напор же создается главным образом деривационными сооружениями, т. е. сбросом воды каналами, штольнями и деривационными трубами.

Величина напора в этих случаях достигает 1 000 м. Высоконапорные гидроэлектрические станции строятся на горных реках, имеющих большое падение. При одном и том же расходе воды, чем больше высота напора, тем больше мощность гидроэлектри-

ческой станции и тем меньше размеры гидротехнических сооружений, а следовательно и меньше стоимость устройства гидроэлектрической станции.

Высоконапорные гидроэлектрические станции относятся к числу наиболее эффективных в экономическом отношении, дающих, при одинаковых с низконапорными и с средненапорными установленными мощностями, наименьшую стоимость *квт* часа электрической энергии.

Мощность брутто какого-либо водного источника при создании напора определяется из выражения

$$N_{бр} = Q \cdot H \frac{1000 \cdot 0,736}{75} \text{ квт},$$

где Q — расход воды в м^3 в секунду,

H — высота напора в м .

Для использования мощности источника необходимо воду при помощи искусственных сооружений подвести к гидротурбинам. При подводе воды к гидротурбинам, в зависимости от стеснения живого сечения реки подводящими сооружениями, происходит потеря энергии. Чем меньше стеснение живого источника реки, тем меньше потеря энергии в подводящих сооружениях, но тем больше должен быть размер подводящих сооружений. В установках значительной мощности потеря энергии в подводящих сооружениях не превышает 5%, т. е. коэффициент полезного действия их 0,95.

Подведенная к гидротурбинам гидравлическая энергия превращается в механическую. Это превращение энергии связано с потерями на трение при вращении турбины и некоторой потерей мощности в силу того, что отходящая от турбины вода имеет еще скорость движения, а следовательно обладает мощностью, величина которой может быть определена из выражения:

$$\frac{v^2 \cdot Q \cdot 1000 \cdot 0,736}{2g \cdot 75} \text{ квт},$$

где v — скорость в м/сек ,

g — ускорение силы тяжести $9,81 \text{ м/сек}^2$.

Величина потерь в турбинах зависит также от режима работы их, т. е. от величины нагрузки. В турбинах, при полной нагрузке их, сумма всех потерь составляет от 8 до 14%. Так как гидротурбины не все время работают с полной нагрузкой, то эти потери в среднем при предварительных подсчетах могут быть приняты с некоторым запасом, равным 20% (коэффициент полезного действия равен 0,80).

Для превращения механической энергии, получаемой от гидротурбины, в электрическую, на одном валу с гидротурбиной находится электрический генератор, создающий электрическую энергию.

Потери энергии при превращении механической энергии, получаемой на валу турбины, в электрическую, зависят от мощности генератора и степени использования этой мощности и составляют от 2 до 8%. В среднем, в предварительных подсчетах, коэффициент полезного действия генератора может быть принят равным 0,95.

Полный коэффициент полезного действия от использования водного источника до клемм генератора электрической энергии равен $0,95 \cdot 0,80 \cdot 0,95 = 0,72$ и величина мощности гидроэлектрической установки, которая может быть получена от водного источника, определится из выражения

$$N_{ген} = 0,72 N_{бр} = 0,72 \frac{Q \cdot H \cdot 1000 \cdot 0,736}{75} \text{ кВт.}$$

Расход воды в реке не является постоянным в течение года. Для большинства рек СССР наибольший расход воды наблюдается в весеннее время и наименьший — в летнее. Для горных рек, питающихся от ледников, наибольший расход воды имеет место в летние месяцы, во время сильного таяния снегов в горах. Вследствие этого при определении мощности водного источника необходимо принимать расчетный расход воды и соответствующий ему напор. Установление величины расчетного расхода и напора производится на основании детального изучения режима реки, графика колебания расходов в течение года по наблюдениям за ряд лет.

Несмотря на устраиваемые регулиционные сооружения и водохранилища, использовать равномерно в течение года полную мощность гидроэлектрической установки практически не представляется возможным. Сравнительно большой коэффициент пользования установленной мощности для среднего гидрологического года, равный 0,60¹, имеет Днепрогэс.

Днепровская гидроэлектрическая станция является самой мощной гидростанцией в Европе, а по мощности каждого гидротурбинного агрегата, равного 62 000 *квт*, превосходит самые мощные американские гидроэлектростанции.

Помимо плотины и собственно гидроэлектрической станции в состав гидротехнических сооружений Днепрогэса входят шлюз и гавань в верхнем бьефе.

На Днепровской гидростанции установлено 9 вертикальных одноколесных турбин, системы Френсиса, мощностью каждая по 90 000 *лош. сил* при напоре 37,5 *м* и степени открытия направляющего аппарата 0,85. При полном открытии направляющего аппарата и том же напоре мощность каждой гидротурбины — 103 000 *лош. сил*. Коэффициент полезного действия при степени открытия 0,85 равен 92,1 % (наивысший). Расход воды $Q = 200 \text{ м}^3/\text{сек.}$ Каждая гидротурбина весит около 802 *т*. Непосредственно на одном валу каждой гидротурбины вертикально насажен электри-

¹ Ковалевский И. «Днепровская гидроэлектрическая станция».

ческий генератор трехфазного тока 50 *пер/сек.* Мощность каждого генератора — 77 500 *квв* или при $\cos \varphi = 0,8$ — 62 000 *квт.* Полный вес генератора — 780 *т.* Напряжение на клеммах генератора — 13 800 *в.*

Коэффициент полезного действия при:

$\cos \varphi = 0,8$ и полной нагрузке равен	97,8%
$\cos \varphi = 0,75$	97,5%
$\cos \varphi = 1,00$	98,4%

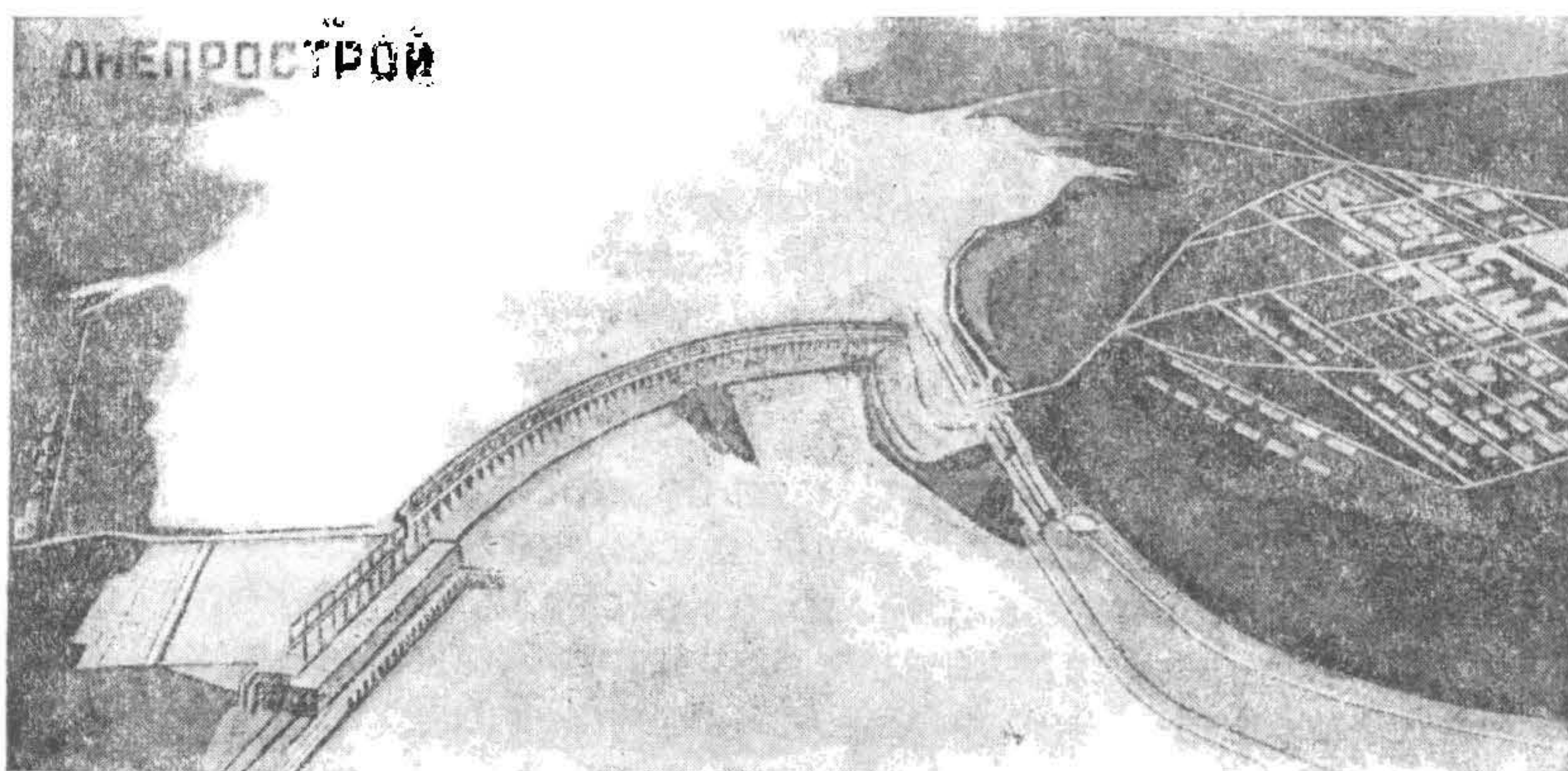


Рис. 6. Общий вид сооружений у Днепрогэса.

Полная мощность гидростанции при девяти генераторах составит 558 000 *квт.*

Годовая отдача энергии в зависимости от степени многоводности года равна от 2 500 000 000 до 4 000 000 000 *квт/ч.*, тоже в средний гидрологический год 3 000 000 000 *квт/ч.* Стоимость *квт/ч* электроэнергии, получаемой от Днепрогэса, исходя из среднего гидрологического года и полного совпадения графика нагрузки с графиком мощности рек, определилась в 0,56 коп. При использовании 80% мощности реки средняя стоимость 1 *квт/ч* энергии составляет 0,70 коп.

Установленная мощность гидроэлектрических станций, в силу колебания расходов воды в течение года не может быть постоянно полностью использована, несмотря на устраиваемые регулирующие сооружения и водохранилища, и не может дать равномерно в течение года полную мощность. Следовательно, всегда целесообразно комбинировать работу гидроэлектрической станции с работой тепловой электрической станции. Это дает возможность в периоды использования неполной мощности гидростанции обеспечить отдачу потребной мощности. В периоды же наибольшего расхода и полного использования мощности гидроустановок

нагрузка тепловой станции уменьшается при отдаче той же общей мощности и получается значительная экономия в расходе топлива. Тепловая электрическая станция в некоторой части установленной мощности является как бы резервом для гидроэлектростанции.

Генераторы электрической энергии, устанавливаемые в соединении с паровыми и гидравлическими турбинами на тепловых и

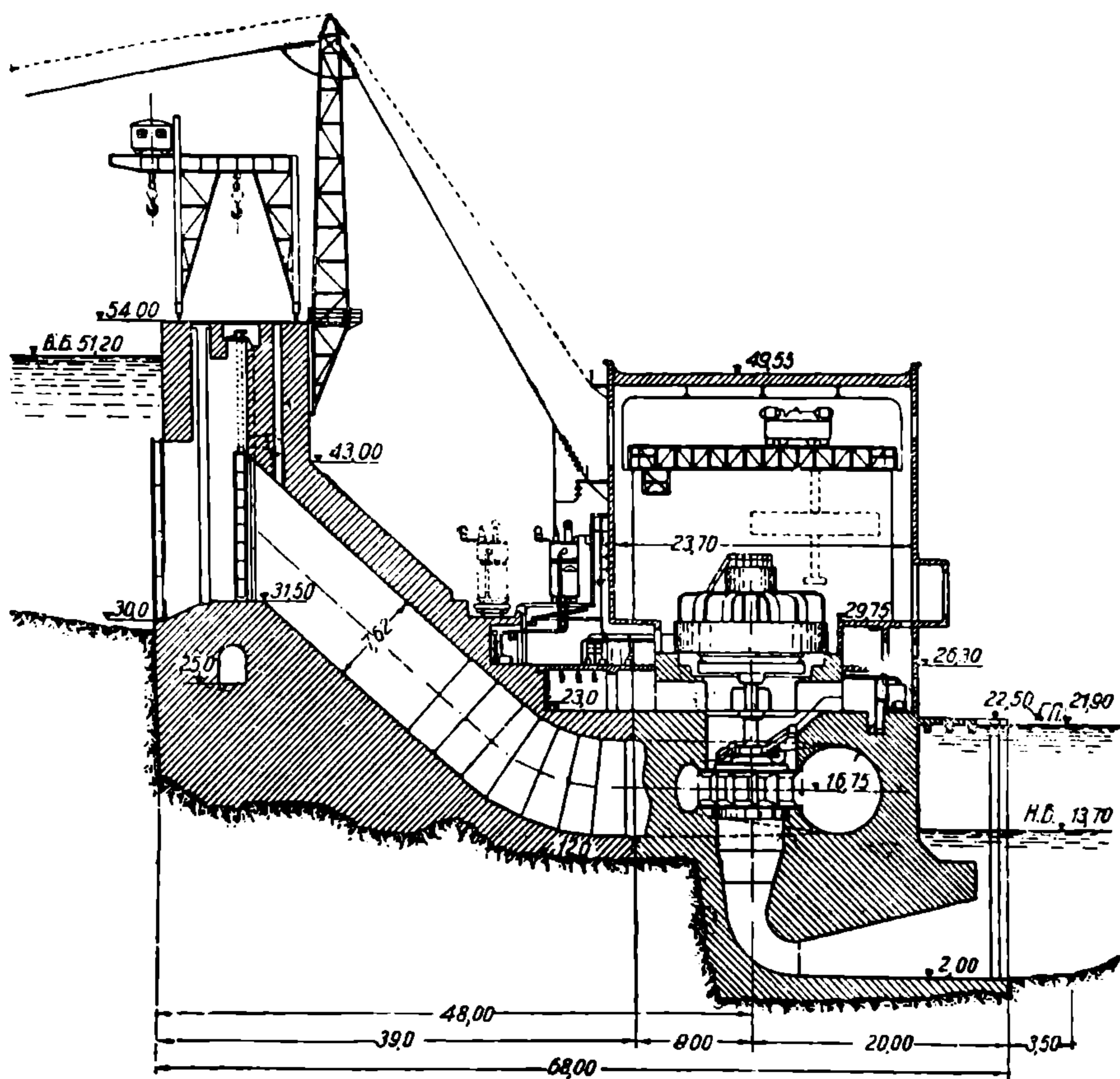


Рис. 7. Днепровская гидростанция. Поперечный разрез.

гидроэлектрических станциях, превращающие механическую энергию в электрическую, могут быть как однофазного, так и трехфазного тока.

Преимущественное, а в условиях об'единенного энергоснабжения промышленности и транспорта, исключительное распространение получили генераторы системы трехфазного тока той частоты, которая принята как стандарт в промышленных установках.

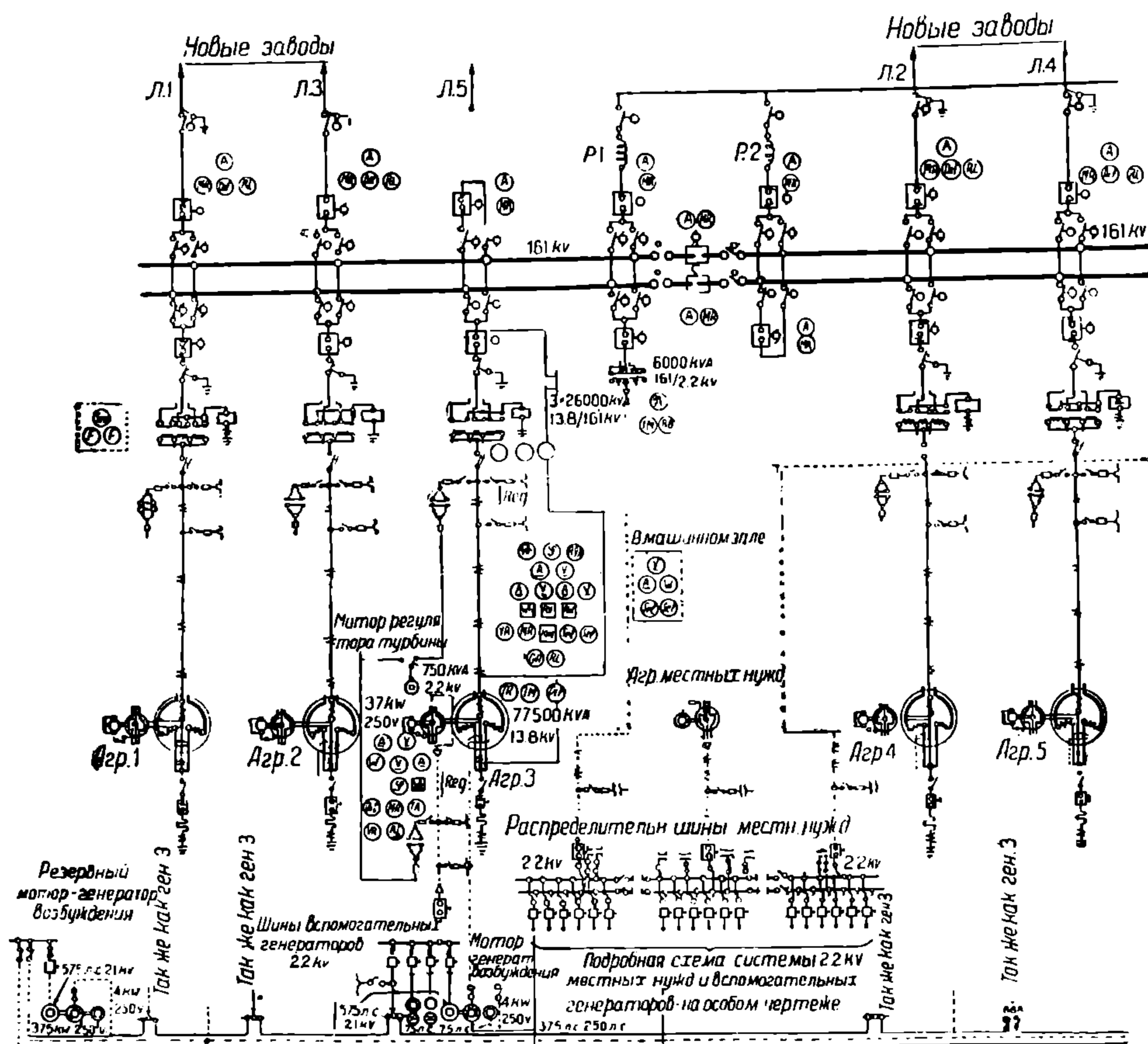
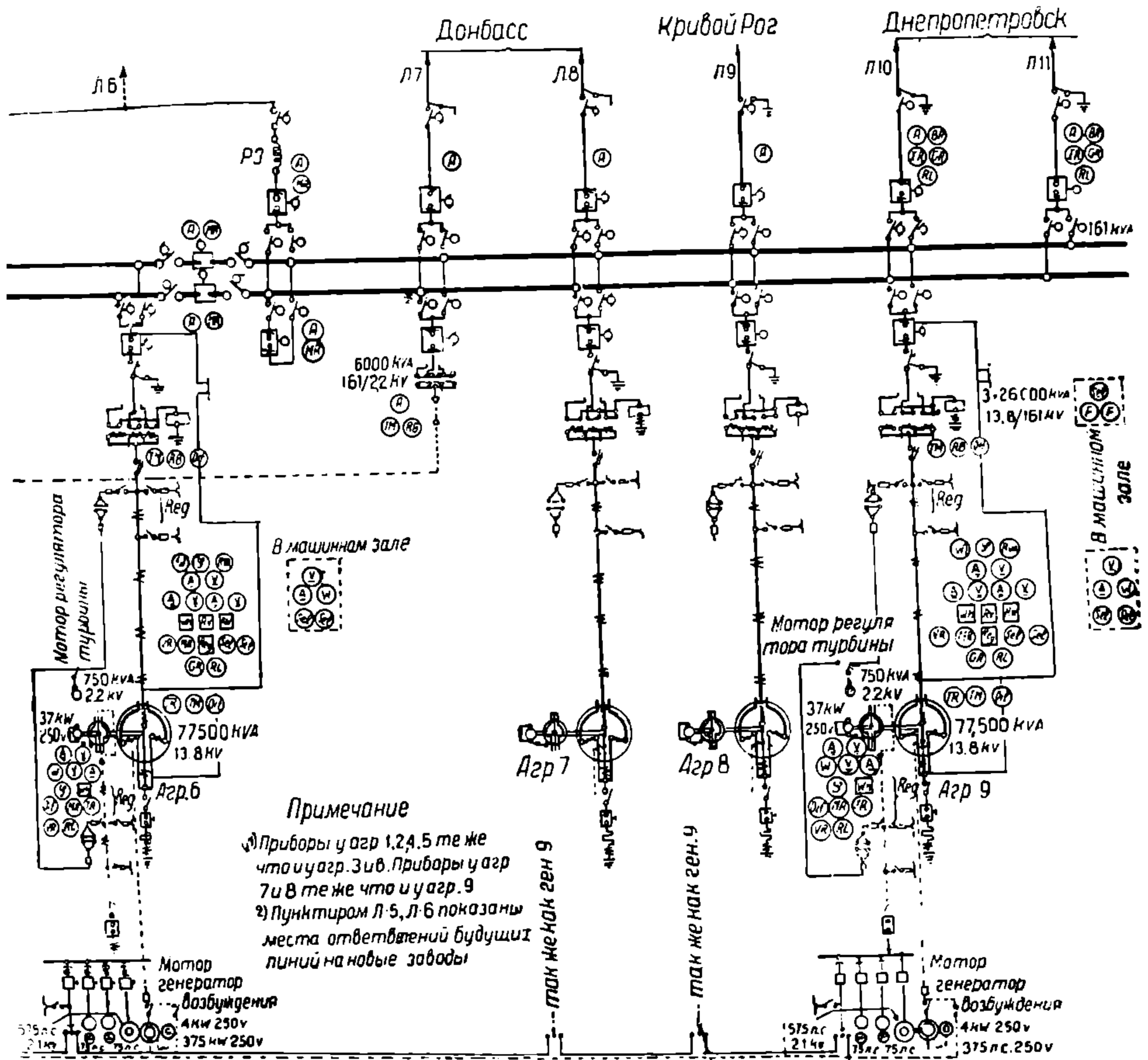


Рис. 8. Принципиальная схема электрических

На всех районных как тепловых так и гидроэлектрических станциях СССР установлены генераторы трехфазного тока 50 пер/сек, так как эти станции являются источниками объединенного планового энергоснабжения промышленности, транспорта и сельского хозяйства. В капиталистических условиях объединение энергоснабжения затруднительно, вследствие чего возникает необходимость в постройке специальной электрической станции для нужд железной дороги. В этом случае на электрической станции устанавливаются генераторы той системы тока, которая принята на электрических жел. дор. Так, например, в Германии некоторые электрические станции построены специально для нужд жел. дороги. Так как на германских магистральных железных дорогах



соединений Днепровской гидроэлектростанции.

принята система однофазного тока с числом периодов $16\frac{2}{3}$, то на электрических станциях, снабжающих энергией только железную дорогу, установлены генераторы однофазного тока с тем же числом периодов.

Коэффициент полезного действия генераторов однофазного тока меньше, чем трехфазного. Стоимость электрооборудования электрической станции на 1 установленный кВт мощности при генераторах однофазного тока на 15—20 % дороже, чем при генераторах трехфазного тока. Как при трехфазных, так и однофазных генераторах вырабатываемая ими электрическая энергия получается при величине напряжения от 6—11 000 в и наибольшая, как Днепрогэс, —13 800 в.

§ 2. Повысительные подстанции

Передать на дальнее расстояние получаемую при таких напряжениях электроэнергию от центральной электрической станции технически и экономически не целесообразно, так как при этом, во-первых, потребуется большое сечение проводов линий передач электроэнергии, а во-вторых, будут большие потери энергии.

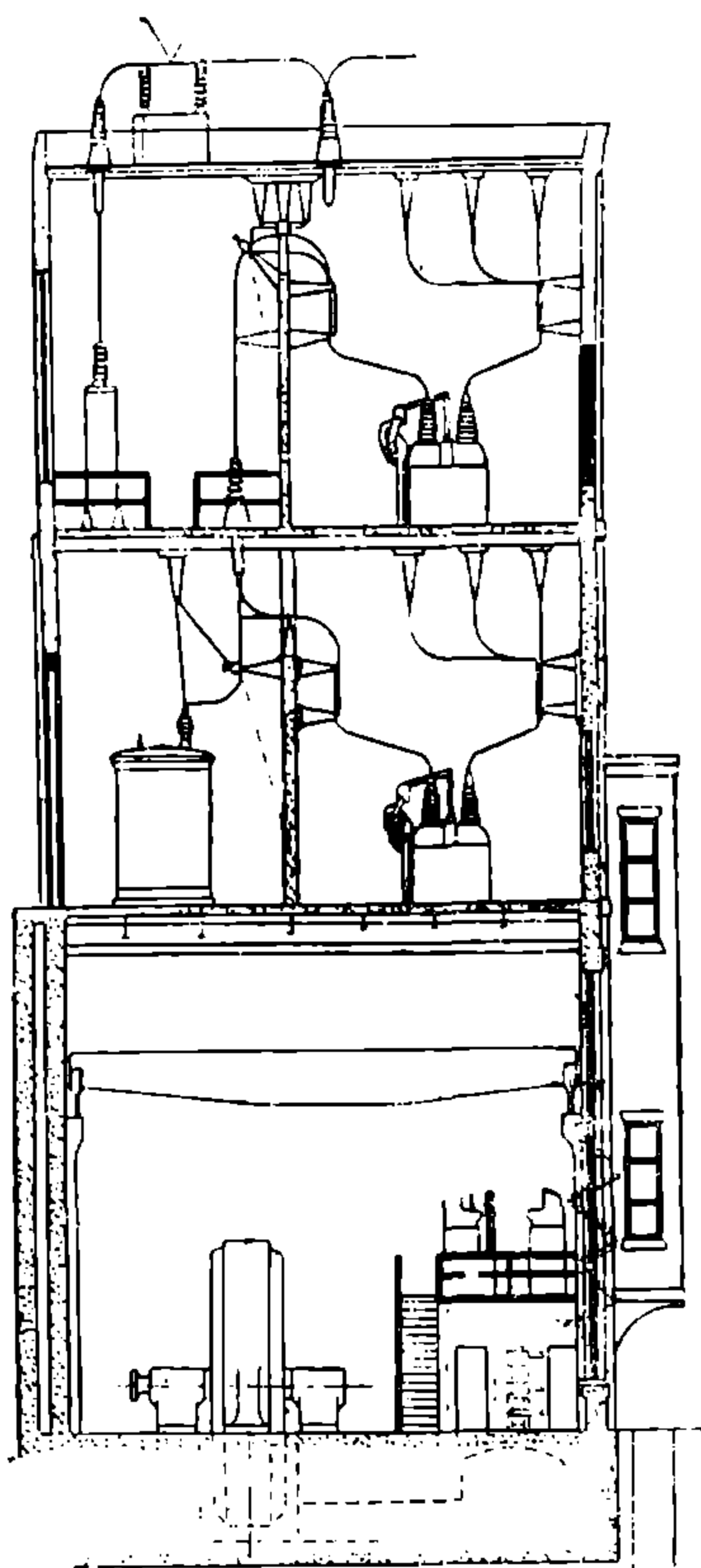


Рис. 9. Разрез по зданию электрической станции и повысительной подстанции $5/110$ кв.

возможных повреждений и неисправной работы оборудования повысительной подстанции.

Как видно из рисунка, в первом этаже помещаются генераторы и защитная аппаратура, во втором — трансформаторы и масляные выключатели, в третьем — шины высокого напряжения, от которых дан вывод к высоковольтным линиям передачи энергии. Вне зависимости от типа повысительной подстанции, совмещенной ли с центральной электрической станцией или вне ее, закрытой

В целях уменьшения стоимости сооружения линий передачи и понижения больших потерь энергии устраиваются повысительные подстанции, на которых напряжение через трансформаторы повышается до величины, необходимой в линиях передачи. Повысительные трансформаторные подстанции, принципиальные схемы которых приведены ранее на рис. 5 и 8, в соединении со схемами расположения агрегатов тепловой и гидроэлектрической станции, помещаются или в одном здании с центральной электрической станцией или вне ее, в зависимости от технико-экономических соображений и местных условий.

При устройстве повысительной трансформаторной подстанции в общем здании с центральной электрической станцией, аппаратура электрического оборудования подстанции (трансформаторы, масляные выключатели, раз'единители, шины высокого напряжения) помещается во втором и третьем этажах здания станции. В первом же этаже с генераторами электрической энергии помещается аппаратура защиты генераторов от воз-

или открытой, на каждый агрегат генератор, установленный на электростанции, на стороне повысительной части напряжения устанавливается трансформатор и масляный выключатель. Повысительные трансформаторные подстанции, располагаемые вблизи станции отдельно, устраиваются как закрытого типа в специальном здании, так и открытого типа с расположением всего оборудования на открытом воздухе в плоскости земли. При открытой повысительной трансформаторной подстанции получается несколько большая стоимость электрической части аппаратуры оборудования, вследствие необходимости лучшей изоляции, но с другой стороны отпадают расходы по постройке специального здания.

Кроме того, расположение оборудования в плоскости земли на открытом воздухе (с точки зрения безопасности при возможных авариях) находится в лучших условиях и, вследствие более свободного размещения оборудования, более удобны в эксплуатации. Чем выше напряжение, тем экономически выгоднее открытые подстанции. В германских условиях, по данным Schrottke, уменьшение стоимости открытых подстанций по сравнению с закрытыми в процентах может быть выражено следующей зависимостью, изображенной на рис. 10.

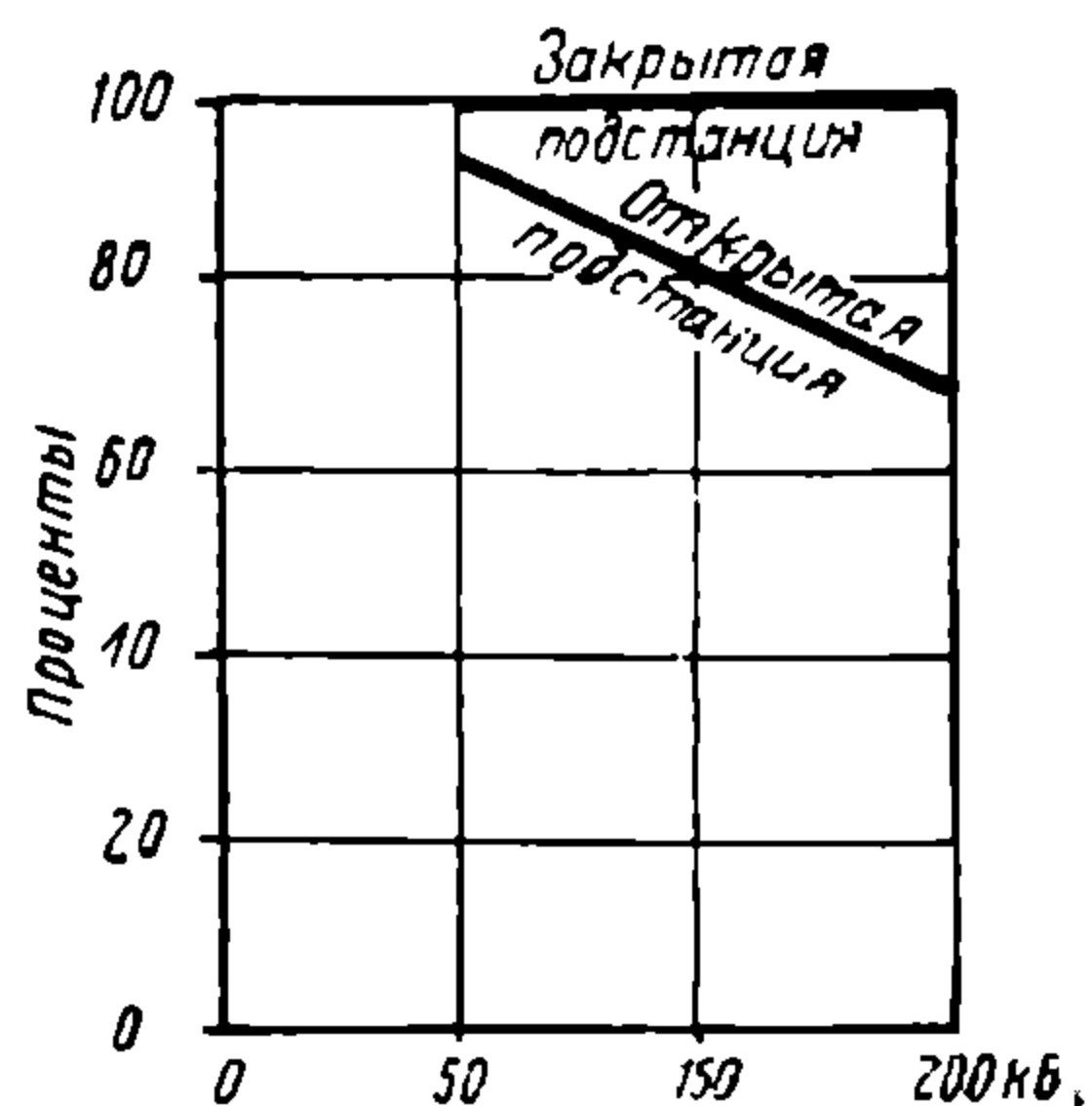


Рис. 10.

Наименьшее напряжение, при котором еще выгодны открытые повысительные подстанции в разных странах, различно. Для германских, французских и швейцарских установок оно считается не ниже 35 кВ.

Для СССР Элштейн полагает, что эту величину можно считать 22 кВ. В Америке допустимое напряжение для открытой подстанции доведено до 13 200 в (13.2 кВ). На величину напряжения, при котором выгодно устраивать открытые повысительные подстанции, влияют климатические условия местонахождения повысительной подстанции, качество и стоимость изоляции аппаратуры электрооборудования, наличие свободной территории участка для расположение открытой повысительной подстанции.

На рис. 11 приведена открытая трансформаторная подстанция Мариендорф (Märkish El. W) мощностью 20 000 кВА, работающая при напряжении 50 кВ.

Около здания (рис. 11) расположены трехфазные трансформаторы, к которым электрическая энергия подводится при низком напряжении. От трансформаторов уже при высоком напряжении она идет по проводам через раз'единители (называемые часто в литературе по немецки trennschalter) через масляные выключате-

ли и присоединяется к системе сборительных шин, являющихся в данном случае гибкими проводами. От сборительных шин провода через однофазные масляные выключатели и от последних через раз'единители выводятся к высоковольтной линии электро-

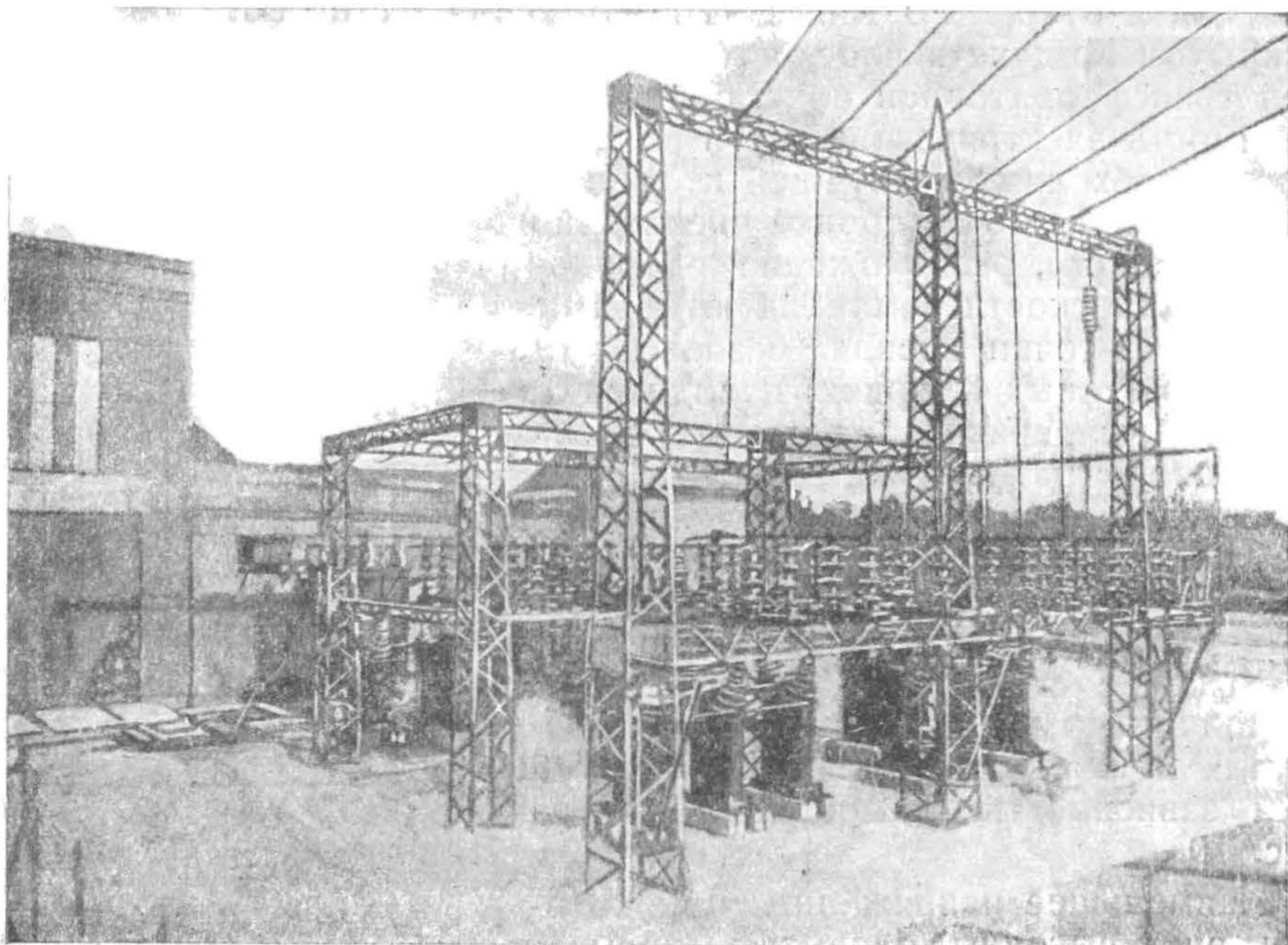


Рис. 11. Открытая трансформаторная подстанция Марендорф.
Мощность 20 000 ква, напряжение—50 кв.

передачи, провода которой прикреплены посредством изоляторов к металлической ферме.

На приведенной подстанции все оборудование (трансформаторы, масляные выключатели и раз'единители) расположено в плоскости земли и относится к так называемому низкому строительству открытых подстанций. Имеются другие виды расположения аппаратуры, в частности более высокое расположение раз'единителей, сборительных шин, а под ними масляных выключателей, но эти варианты, уменьшая потребную площадь для подстанций, вызывают неудобства с точки зрения эксплуатации. В населенных местностях устройство открытых подстанций помимо большой площади требует строгого соблюдения условий общественной безопасности. При небольшой величине напряжения повысительной трансформаторной подстанции, а в условиях густо населенной местности и при

высоких напряжениях, устраиваются закрытые подстанции. Кубатура здания подстанции увеличивается с увеличением напряжения.

Shrottke дает следующую кривую потребной кубатуры здания подстанции в зависимости от напряжения, приведенную на рис. 12

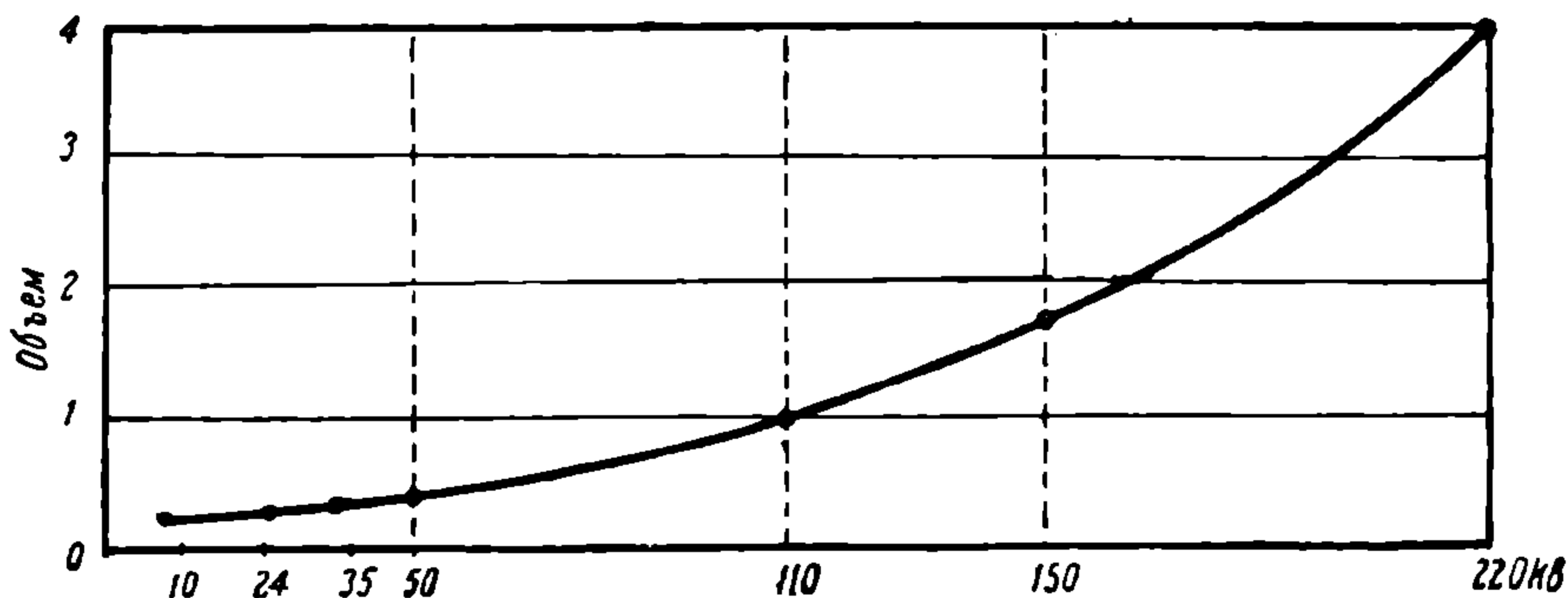


Рис. 12.

Эпштейн по материалам, заимствованным из американской практики, приводит следующие зависимости стоимости в долларах 1 киловольт-ампера в функции от мощности подстанции (рис. 13) и от величины напряжения подстанции (рис. 14).

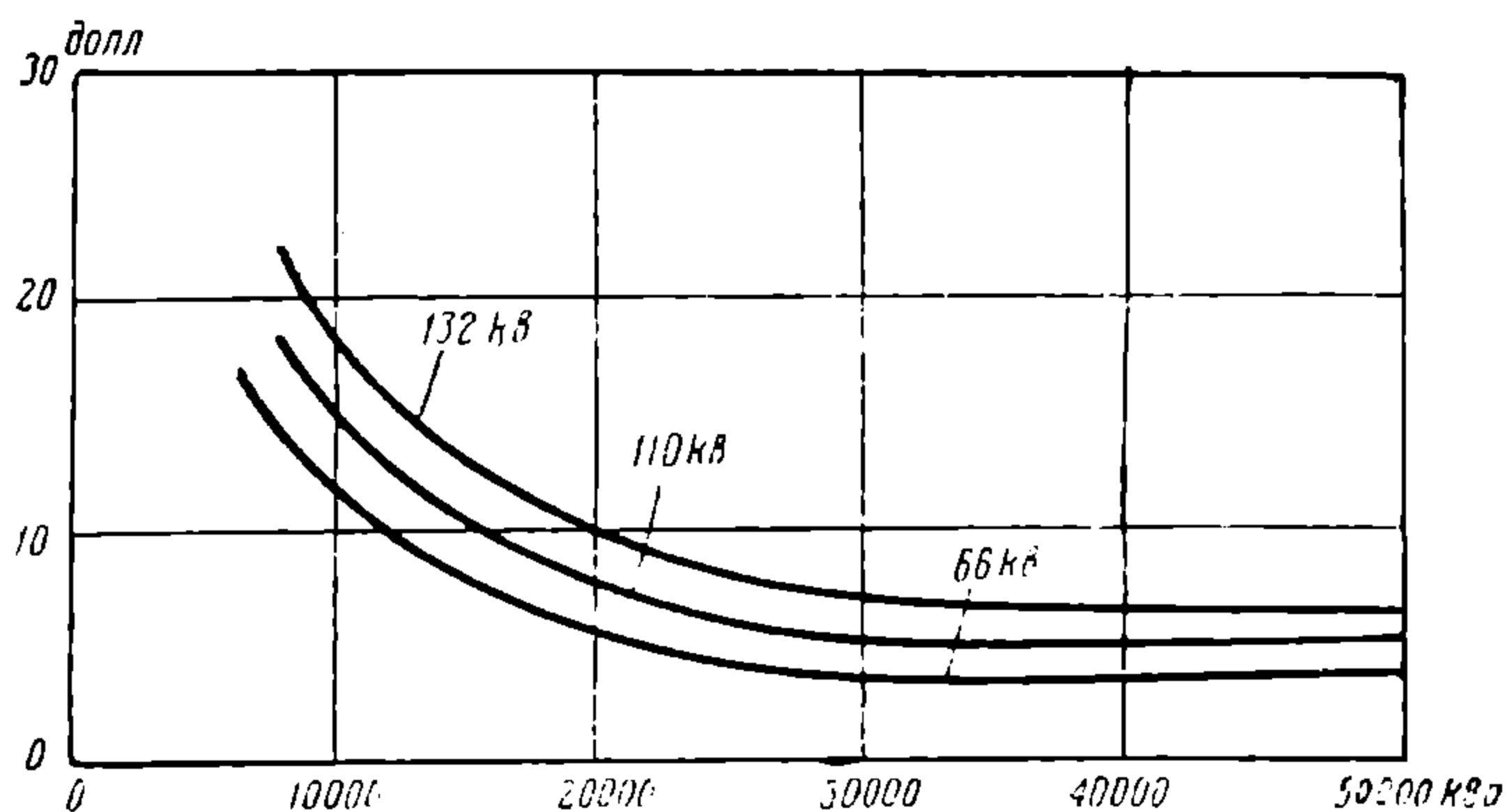


Рис. 13.

Далее (рис. 15) приведен поперечный разрез и план германской повысительной трансформаторной подстанции Лаута закрытого типа мощностью 60 000 кВА с напряжением 100 кВ.

Кроме приведенных выше типов открытых и закрытых повысительных трансформаторных подстанций, в настоящее время существует еще особый вид подстанций, так называемых бронированных, у которых все конструктивные части аппаратуры, находящиеся под напряжением, заключены в бронированную оболочку.

Бронированное оборудование может помещаться как в открытых, так и в закрытых подстанциях. Примером такой подстанции с бронированной аппаратурой является открытая подстанция Денстон (Англия) напряжением 6 600/66 000 в (рис. 16).

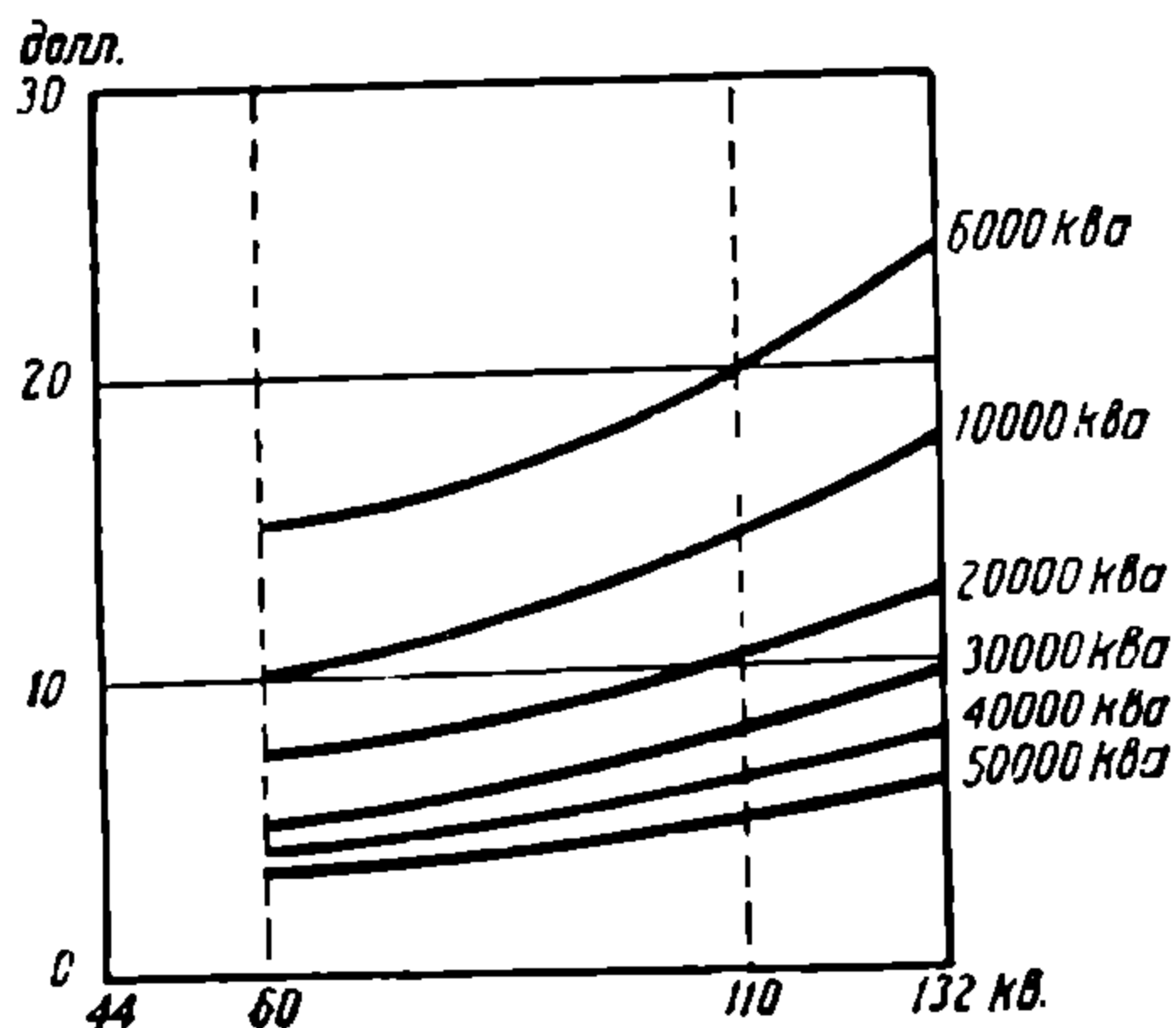


Рис. 14.

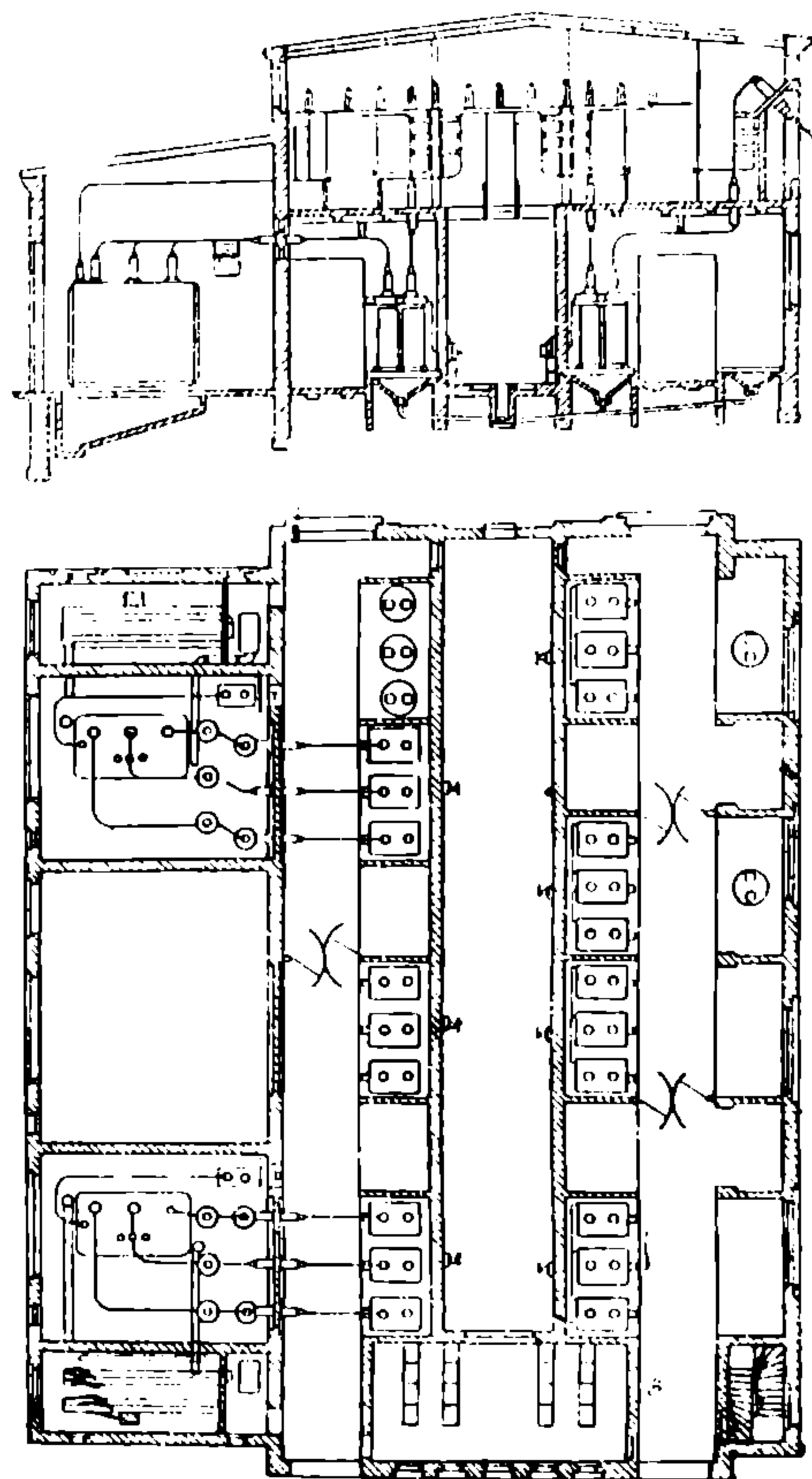


Рис. 15. Разрез и план повысительной подстанции Лаута. Мощность 60 000 кВА, напряжение—100 кВ.

§ 3. Линии передачи энергии

Передача электрической энергии от повысительной трансформаторной подстанции в район потребления энергии производится по линиям передачи энергии. Так как в линии передачи энергии на дальнейшее расстояние применяется высокое напряжение от 35 кВ до 220 кВ, то в районе объединенного потребления энергии промышленностью, сельским хозяйством и транспортом устраивается понизительная трансформаторная подстанция, от которой уже при пониженном напряжении и происходит питание энергией потребителей. Подводка энергии от понизительной подстанции к потребителю в зависимости от технико-экономических условий, производится как голыми проводами, подвешенными на опорах, так и кабелем, уложенным в землю. Таким образом передача электрической энергии от места производства ее до потребителя происходит в следующей последовательности: центральная электрическая станция—повысительная трансформаторная подстанция—высоко-

вольтная линия передачи энергии—понижительная трансформаторная подстанция и подвод к потребителю.

При отсутствии в районе электрифицированной жел. дороги понижительной трансформаторной подстанции питание энергией жел. дороги может быть произведено непосредственно от высоковольтных линий передач энергии.

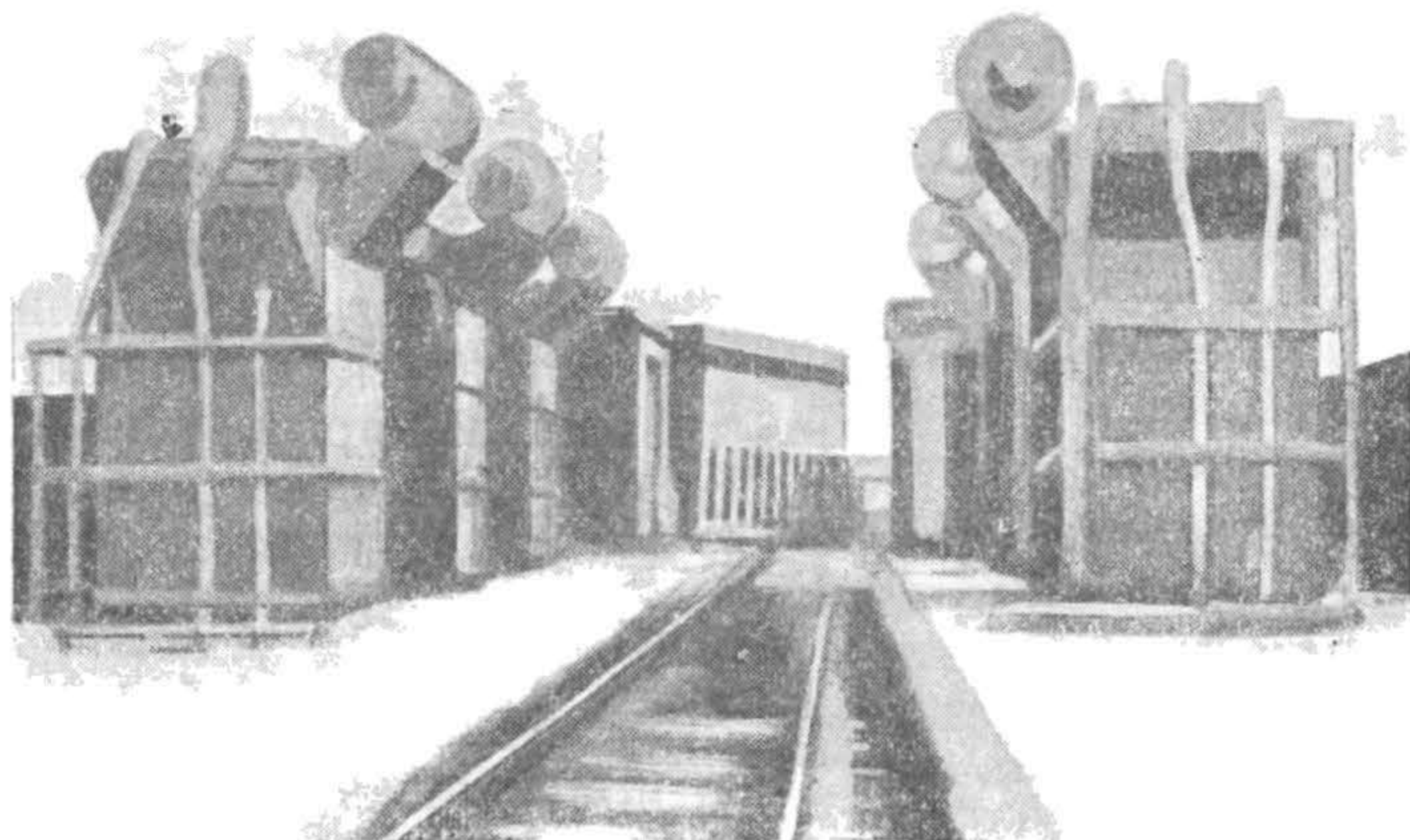


Рис. 16. Общий вид открытой подстанции Денстон с бронированной аппаратурой и трансформаторами 6,6/66 кв.

В этом случае на тяговых железнодорожных подстанциях, расположенных вдоль линии железной дороги, устраиваются понижительные трансформаторные части подстанции для понижения напряжения до величины, необходимой для агрегатов подстанции. Передача энергии может быть осуществлена как однофазным, так и трехфазным током. В Германии, где магистральные железные дороги электрифицированы на однофазном токе с частотой $16\frac{2}{3}$ пер/сек в тех случаях, когда снабжение дороги производится от центральной электрической станции, построенной исключительно для нужд дороги, в линиях передачи энергии принят однофазный ток той же частоты, что и в контактном проводе электрифицируемой жел. дор. В этом случае тяговые железнодорожные подстанции представляют собой простые трансформаторные понижительные подстанции без преобразователей как системы тока, так и числа периодов. Стоимость сооружения линий передачи энергии на однофазном токе с частотой $16\frac{2}{3}$ и 25 пер/сек (по данным немецкого инженера Wechmann'a) на 65 марок или, округленно, можно считать на 40 руб. с 1 квт передаваемой мощности дорожке, чем при системе трехфазного тока нормальной частоты, т. е. 50 пер/сек.

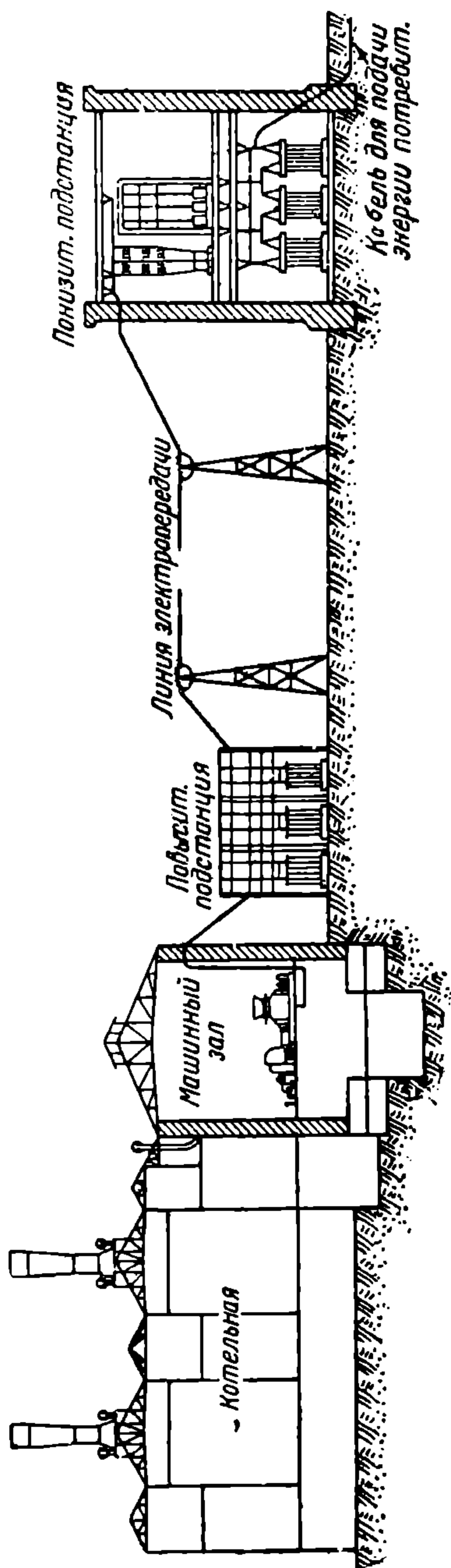


Рис. 17. Схема передачи электрической энергии от тепловой электростанции к потребителю.

Так как передаваемая энергия по системе однофазного тока с частотой $16\frac{2}{3}$ и 25 пер/сек , помимо железной дороги, электрифицируемой на данной системе тока и частоте, не может быть использована для промышленности и другого рода нагрузок без ее преобразования, то передача энергии по системе однофазного тока не получила широкого распространения.

Наиболее распространенной системой тока в линиях передачи энергии от центральных электрических станций к потребителям — промышленности и тяговым железнодорожным подстанциям, — является система трехфазного тока той частоты, которая принята как нормальная в промышленных установках и получившая широкое распространение в энергоснабжении электрифицируемых железных дорог, вне зависимости от системы тока и напряжения, принятого в контактом проводе электрической жел. дороги.

В СССР, в условиях единой плановой системы энергоснабжения всех отраслей народного хозяйства, система трехфазного тока в линиях передачи энергии с частотой 50 пер/сек принята как стандартная система тока.

Линии передачи системы трехфазного тока, в зависимости от величины передаваемой мощности и того расстояния, на которое передается мощность, осуществляются при различных напряжениях.

В СССР установлен следующий стандарт (ОСТ 4760) величин напряжений: 0,5, 3, 6, 10, 35, 110, (154), 220 и (380) *кв*. Напряже-

ние 380 кВ «устанавливает ориентировочно лишь приблизительное значение напряжений дальних сверхмощных передач, которыми должно руководствоваться при научных и исследовательских работах».

Из приведенных величин рекомендуются напряжения: 6, 35, 110 и 220 кВ. Напряжение в начале линии у повысительной подстанции будет несколько больше, а у источников потребления меньше, чем приведенные нормальные междуфазовые напряжения в середине линии электропередачи.

Первая в СССР линия передачи с напряжением 110 кВ, соединяющая Каширскую электростанцию с Москвой, протяжением 120 км, была построена и поступила в эксплуатацию в 1929 году. В настоящее время находится в эксплуатации сеть линий передач энергии от Днепрогэс с напряжением 160 кВ общим протяжением 883 км. Разработаны проекты и построена линия передачи от Свирьской электростанции с напряжением 220 кВ. В Америке в настоящее время имеются несколько линий передач с напряжением 220 кВ, но эти величины напряжения не являются уже пределом. Академик А. А. Чернышев, высказываясь о единой высоковольтной сети линий передач энергии в СССР, говорит о возможности применения напряжения порядка 380—400 кВ. Интересные данные, помещаемые ниже в таблице о влиянии величины напряжения на расстояние и передаваемую мощность, приводит проф. А. Я. Рябков

Таблица 1

Трехфазн. ток напряж. кВ	Передаваемая мощность		Расст. пере- дачи км	Сечение меди мм ²	cos φ	Потери мощно- сти %	Падение напряж. %
	На одну цепь кВт	На две цепи кВт					
60	19 000	38 000	100	3 · 95	1	10	10
110	40 500	81 000	200	3 · 120	1	10	10,15
220	110 000	220 000	400	Полый витой про- вод диам. 25 мм 3 · 160	1	10	10,2
380	550 000	1 100 000	600	Полый витой про- вод диам. 42 мм 3 · 400	1	10	10,5
380	500 000	1 000 000	1 000	Полый витой про- вод диам. 42 мм 3 · 400	1	15	15,7

Приведенные в таблице 1 данные представляют возможные пределы при условии регулирования напряжения и поддержания cos φ равным единице.

Техника высокого напряжения в линиях передачи за последнее время получила широкое развитие. Немецкий инженер Оливен

предложил проект объединенной высоковольтной линии передачи энергии для централизованного энергоснабжения всей Западной Европы, но капиталистические противоречия являются тормозом в развитии и осуществлении данного проекта.

Помимо проектов высоковольтных линий передач при системе трехфазного тока, в настоящее время разрабатывается вопрос применения в линиях передачи постоянного тока напряжением 400 кВ, что при его осуществлении даст значительный эффект в экономии меди в линиях передачи. При разрешении вопроса энергоснабжения электрифицируемой жел. дороги величина напряжения, необходимая в линиях электропередачи по системе трехфазного тока для передачи потребной мощности на данное расстояние, оказывает влияние не только на стоимость сооружения, линии передачи, но и на стоимость сооружения понизительной трансформаторной части тяговых железнодорожных подстанций. Установление величины напряжения в линии передачи и сечения проводов производится на основании технико-экономических расчетов. На основании практики постройки американских электропередач при трехфазном токе Стилл вывел следующую формулу для приближенного определения необходимой величины напряжения в линии передачи

$$E = 5,5 \sqrt{\frac{L}{1,609} + \frac{N}{100}}$$

или

$$E = 4,34 \sqrt{L + 0,016 N},$$

где E — междуфазовое номинальное напряжение в кВ,

L — расстояние в км,

N — передаваемая мощность в кВт в конце электропередачи.

Эта формула выведена для условий передачи энергии из одного пункта в другой, не учитывая распределения энергии по участкам и дает несколько преувеличенное значение при разветвленной сети. При ориентировочных подсчетах этой формулой можно пользоваться и при установлении величины напряжения в линиях передачи для питания тяговых железнодорожных подстанций.

Сечение проводов линии передачи при данном напряжении зависит от допустимого падения напряжения, а следовательно и допустимой потери мощности и устанавливается на основании технико-экономических расчетов.

Для определения наивыгоднейшего сечения медных проводов, исходя из минимума годовых расходов, в предварительных расчетах можно пользоваться формулой Кельвина:

$$q_{\text{м}} = J_{\text{ср. кв.}} 0,448 \sqrt{\frac{\beta}{p \cdot b}},$$

где q_m — сечение медных проводов в квадратных мм,

$J_{\text{ср. кв.}}$ — средний квадратичный ток в амперах,

β — стоимость потеряннго в линии $\text{квт} \cdot \text{года}$ ($8\,760 \text{ квт} \cdot \text{ч}$) в рублях,

p — процентные отчисления от стоимости проводов (в %),

b — стоимость 1 кг меди в рублях.

Полученное сечение по этой формуле относится к одной фазе и при установлении сечения округляется до ближайшей величины стандартного сечения.

В качестве проводов линии передачи, кроме медных, могут применяться алюминиевые и стале-алюминиевые провода, обычно обозначаемые через A — алюминиевые и через $A. С.$ — стале-алюминиевые. Наибольшее расстояние, на которое при данном напряжении возможно передать необходимую мощность, определяется из условия допустимого падения напряжения. Не учитывая влияния емкости линии, что при длине линии передачи до 100 км практически не влияет на результаты, величина наибольшего расстояния линии передачи может быть определена формулой:

$$L = \frac{10 (e \%) E^2}{N (R + X \operatorname{tg} \varphi)},$$

где $(e \%)$ — среднее допускаемое падение напряжения в процентах

E — междуфазовое напряжение в кв в конце линий,

N — передаваемая мощность в квт ,

R — омическое сопротивление одной фазы на 1 км, определяемое из выражения

$$R = \frac{\rho}{q} \frac{1000}{},$$

в котором ρ — удельное сопротивление материала проводов,

q — сечение провода для одной фазы в мм.

X — индуктивное сопротивление 1 км одной фазы, определяемое из выражения

$$X = 0,1447 \log \frac{D_{\text{ср}}}{0,78 r} \text{ } \Omega/\text{км} \text{ (для частоты } 50 \text{ пер/сек).}$$

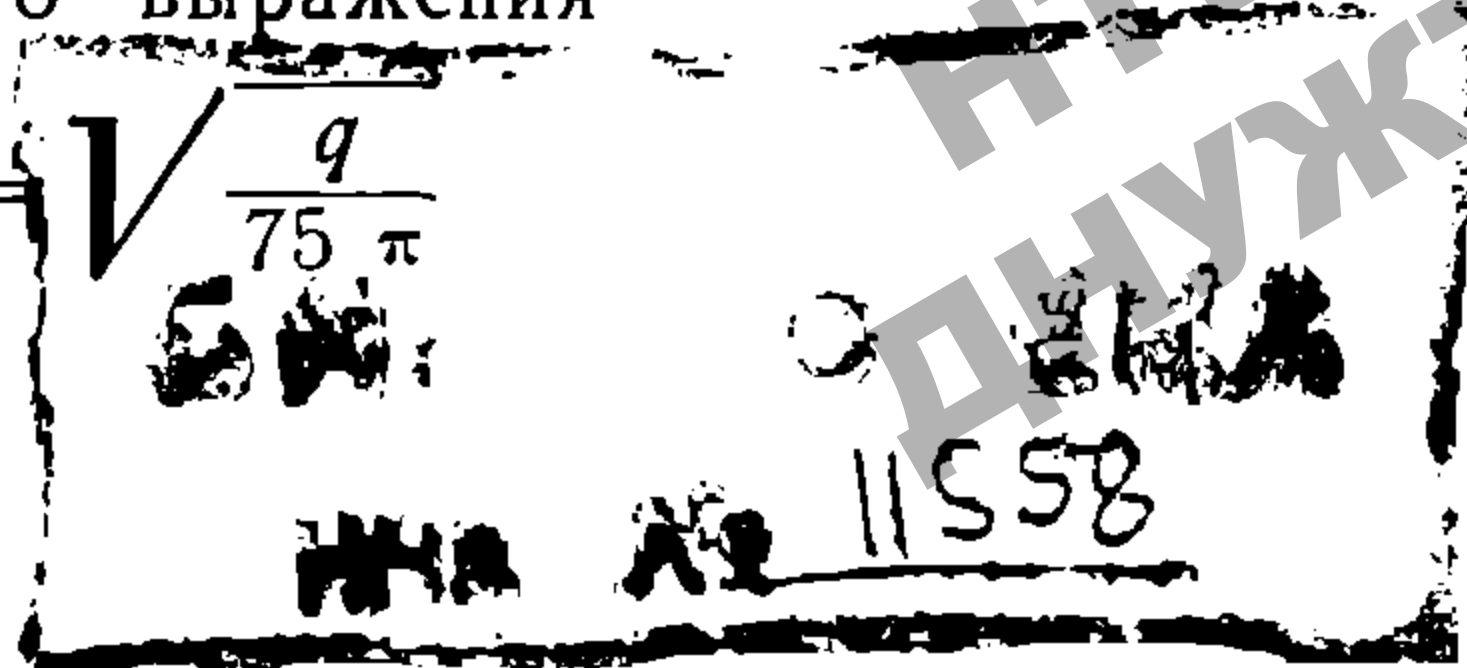
в котором $D_{\text{ср}}$ — приведенное расстояние между проводами, равное

$$D_{\text{ср}} = \sqrt[3]{D_{1-2} D_{2-3} D_{3-1}}$$

$D_{1-2}, D_{2-3}, D_{3-1}$ — соответственно действительные расстояния между проводами на опоре,

r — радиус многожильного провода, определяемый из следующего выражения

$$r = \sqrt{\frac{q}{75 \pi}}$$



q — сечение провода в $мм^2$

$\varphi \arccos \cos \frac{квт}{кВа}$

Величина

$$L \cdot N = \frac{10 (e \%) E^2}{(R + X \operatorname{tg} \varphi)}$$

арактеризует пропускную способность линии электропередачи.

Для стандартных рекомендуемых величин напряжения 6, 35 и 110 кВ в линии передачи и для наиболее часто применяемых стандартных сечений проводов, далее в таблице 2 приводятся величины пропускной способности линии электропередач, исходя из обычно принимаемого в расчетах среднего падения напряжения, равного 10%.

Значения пропускной способности выражены в мегаватт-килоэтрах (1000 кВт·км) и для двух условий при $\cos \varphi = 0,8$ и при $\cos \varphi = 0,9$.

Таблица 2

Характеристика линии передачи	Константы линии и значения $L \cdot N \cdot 10^{-3}$	Сечение проводов в медном эквиваленте					
		25 мм²	35 мм²	50 мм²	70 мм²	95 мм²	120 мм²
1. Воздушная линия напряжением 6 кВ, алюминиевые или медные симметрично расположенные провода, расстояние между проводами 0,85 м.	R — Ом/км. X — $L \cdot N \cdot 10^{-3}$, $\cos \varphi = 0,8$ $L \cdot N \cdot 10^{-3}$ $\cos \varphi = 0,9$	0,7 0,366 3,8 4,1	0,5 0,356 4,7 5,3	0,35 0,344 5,9 7,0	0,25 0,333 7,2 8,7	0,18 0,324 8,6 10,8	0,146 — — —
2. Кабельная линия напряжением 6 кВ, сеч. пр. 3 · 120	$L \cdot N \cdot 10^{-3}$	—	—	—	—	—	24,6
3. Воздушная линия 35 кВ, стале-алюминиевые провода, горизонтально расположенные, расстояние между проводами 3,0 м.	R — Ом/км X — $L \cdot N \cdot 10^{-3}$, $\cos \varphi = 0,8$ $L \cdot N \cdot 10^{-3}$, $\cos \varphi = 0,9$	— — — —	0,5 0,433 156 182	0,35 0,422 192 234	0,25 0,412 225 282	0,18 0,403 256 330	— — — —
4. Воздушная линия 110 кВ, стале-алюминиевые провода, расположенные горизонтально расстоянию между проводами 4,0 м.	R — Ом/км X — $L \cdot N \cdot 10^{-3}$, $\cos \varphi = 0,8$ $L \cdot N \cdot 10^{-3}$, $\cos \varphi = 0,9$	— — — —	— — — —	0,35 0,442 1 850 2 250	0,25 0,431 2 180 2 720	0,18 0,422 2 460 3 160	— — — —

На основании данных, приведенных в таблице, зная расстояние и величину передаваемой мощности, можно легко установить необходимое напряжение в линии передачи и сечение проводов в медном эквиваленте.

Далее (на стр. 36—37) в таблице 3 приводятся установленные в настоящее время в СССР стандартные (ОСТ 5363) сечения медных и сталеалюминиевых проводов.

Опоры линий электропередачи устраиваются металлические, железобетонные и деревянные. Они могут быть различных конструкций. Вне зависимости от рода материала, из которого сделаны опоры, по своему назначению они разделяются на промежуточные, анкерные, угловые и специальные. Промежуточными опорами называются такие, которые применяются на прямолинейных участках линии электропередачи. На промежуточных опорах не допускается поворота в ту или другую сторону линии передачи. Расстояние между промежуточными опорами зависит от типа конструкции опор и рода материала, величины напряжения в линии передачи и сечения проводов и изменяется в пределах 100—200 м. В целях обеспечения продольной устойчивости линии передачи в случае обрыва проводов в каком-либо пролете с промежуточными опорами, через некоторое число пролетов с промежуточными опорами, устраиваются анкерные опоры, которые в конструктивном отношении более прочны, чем промежуточные. На анкерных опорах подвешиваются провода при пересечении ими железных, шоссейных дорог и нешироких судоходных рек. Анкерные опоры без усиления конструкции допускают поворот линии электропередачи на угол до 5—8°. Расстояние между анкерными опорами, поскольку они устанавливаются через несколько пролетов с промежуточными опорами, зависит от величины пролета между последними и колеблется в пределах от 1000 до 2000 м. Угловые опоры устанавливаются в местах поворота линии электропередачи и представляют собою несколько измененную в конструктивном отношении анкерную опору.

В тех случаях, когда линии электропередачи приходится пересекать высокие железнодорожные насыпи, широкие реки, устраиваются специальные опоры, которые отличаются от анкерных большей высотой.

Кроме приведенных типов опор, для транспозиции (перекрещивания) проводов (что делается в целях улучшения работы линии передачи) устраиваются транспозиционные анкерные опоры.

Транспозиция проводов делается в целях:

- 1) выравнивания индуктивностей и емкостей отдельных фаз,
- 2) устранения взаимного влияния между отдельными соседними параллельными цепями,
- 3) устранения влияния на соседние провода связи.

Для обеспечения большей надежности в работе линии передачи часто применяются две цепи проводов, которые могут подвешив-

Медные провода			Алюминиевые провода				
Попер. сечен. в мм ²	Приблизительный вес кг/км	Разрывное усилие кг	Обозначения	Теоретическая площадь сечения провода в мм ²	Расчетный диаметр провода в мм	Электрическое сопротивление провода Ω/км	Расчетный вес 1 км провода в кг
25	229	962	A— 25	24,48	6,30	1,240	63
35	321	1 330	A— 35	34,36	7,50	0,885	95
50	458	1 900	A— 50	49,48	9,00	0,695	137
70	640	2 660	A— 70	68,90	10,60	0,445	190
95	870	3 640	A— 95	96,53	12,60	0,315	266
120	1100	4 550	A—120	117,00	14,00	0,260	323
135	1235	5 100	A—150	151,85	16,00	0,200	419
150	1372	5 700	A—185	187,00	17,70	0,160	516
			A—240	242,71	20,30	0,125	672
			A—300	295,72	22,40	0,105	817
			A—400	397,82	25,90	0,080	1 098

ваться или на двух самостоятельных опорах, или на одном ряде опор. При устройстве двух цепей линии на одном ряде опор применяется усиленная конструкция последних. Устройство двух цепей линии электропередачи на отдельных опорах создает большую гарантию в бесперебойном энергоснабжении, но вызывает как увеличение строительной стоимости опор, так и увеличение эксплуатационных расходов по содержанию и обслуживанию линий электропередач. Устройство двух цепей линии электропередачи на одной опоре или на отдельных опорах устанавливается в зависимости от назначения линии передачи и технико-экономических условий как по отношению к линии электропередачи, так и по отношению к пунктам снабжения энергией. Линии электропередачи к тяговым железнодорожным подстанциям иногда устраиваются двойными на двух отдельных опорах. Расстояние между промежуточными опорами линии электропередачи зависит от типа опор, сечения проводов, величины напряжения, а также от климатических условий района (наличие гололедов, скорости ветра) и устанавливается на основании расчета из условий механической прочности и экономической целесообразности.

Наибольшее распространение в СССР на линиях электропередач получили деревянные опоры. На рис. 18 приводится одинарная (типовая) промежуточная деревянная опора линии при напряжении 6 кВ, а на рис. 19-а и 19-б П-образные деревянные промежуточные опоры при напряжениях в линии передачи 35 и 110 кВ принятые Главэнерго.

При напряжениях в линии электропередачи 6 кВ, прикрепление проводов к опорам производится при помощи штыревых изолято

Таблица 3

Стале-алюминиевые провода (нормальной прочности)						
Обозначения	Теоретическая площадь всего сечения провода в мм ²	В том числе		Расчетный диаметр в мм	Электрическое сопротивление Ω/км	Расчетный вес 1 км провода в кг
		Сечение алюминия мм ²	Сечение стали мм ²			
АС— 35/4	38,9	34,9	4,0	8,25	0,870	128
АС— 50/7	57,4	50,7	6,7	9,85	0,600	193
АС— 70/9	79,9	70,6	9,3	11,65	0,430	269
АС— 95/18	115,7	97,9	17,8	13,85	0,310	431
АС—120/22	141,4	119,4	22,0	15,30	0,255	504
АС—150/27	175,3	148,7	26,6	17,00	0,210	623
АС—185/34	218,1	183,7	34,4	19,10	0,165	780
АС—240/43	279,7	236,6	43,1	21,50	0,130	995
АС—300/56	357,4	301,1	55,3	24,40	0,110	1 258
АС—400/72	458,3	386,1	72,2	27,80	0,080	1 637

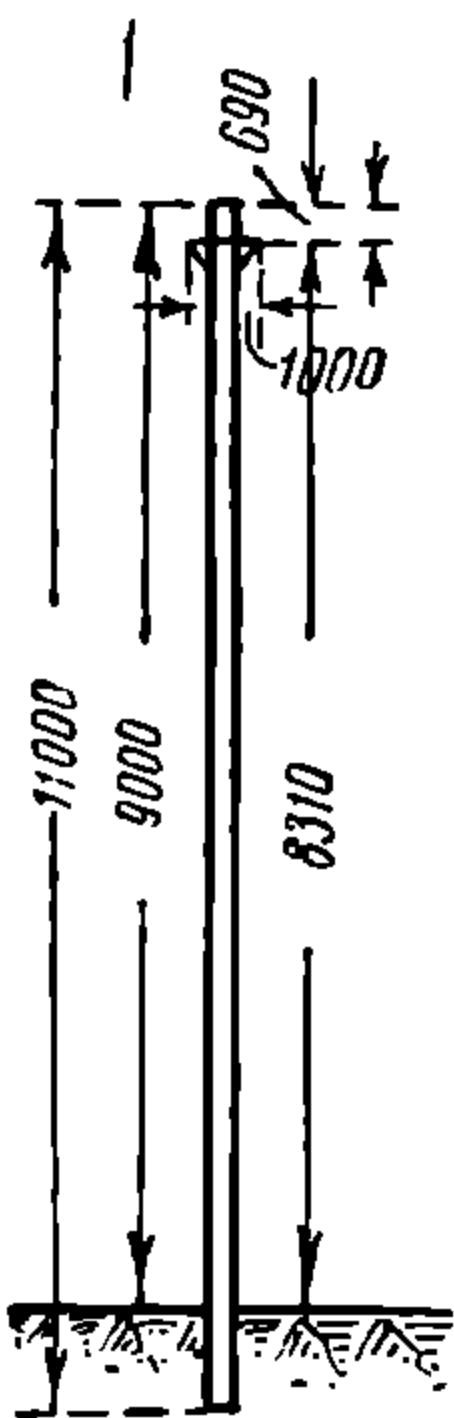


Рис. 18. Деревянная промежуточная опора линий передачи 6 кв.

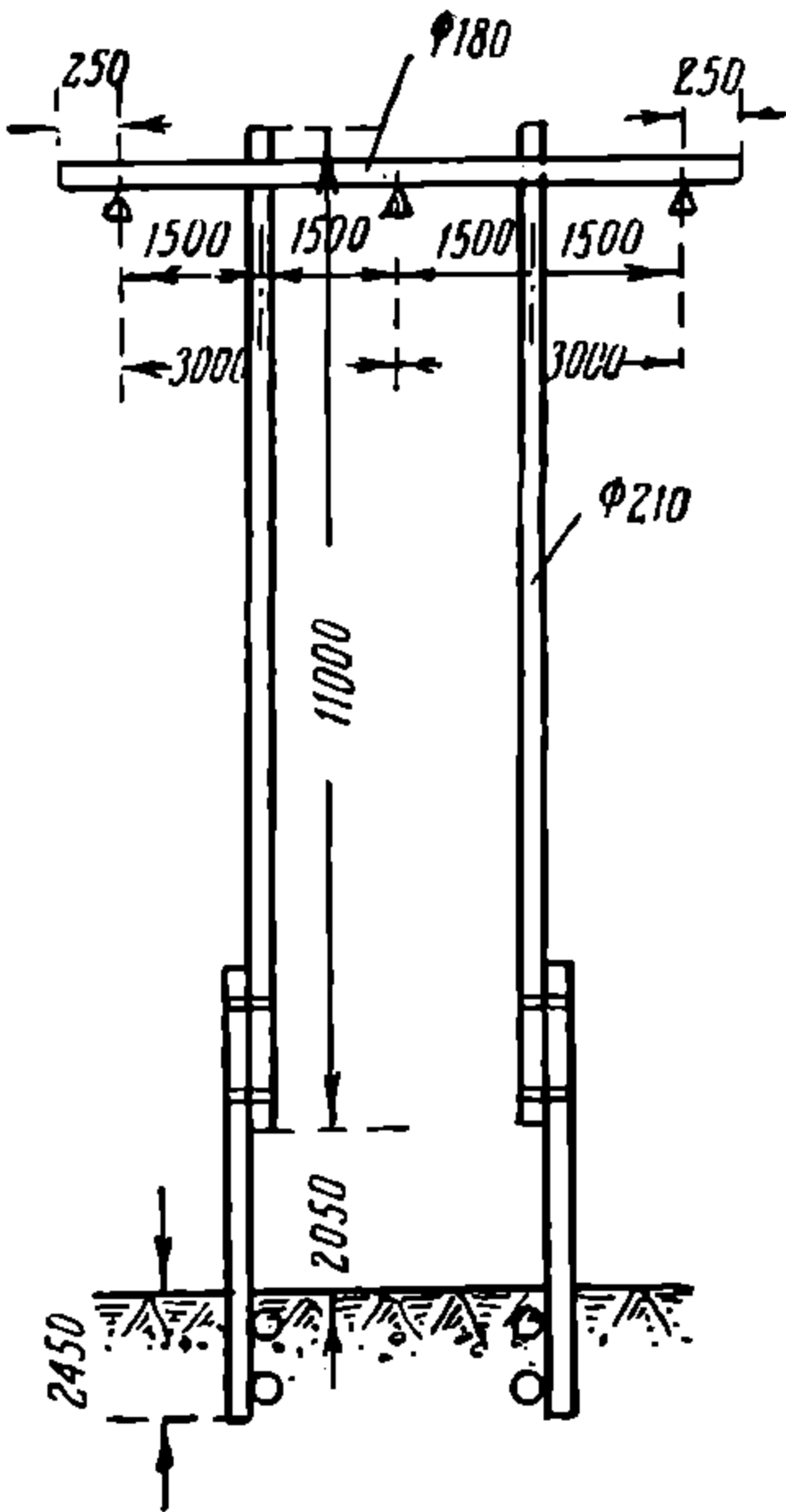


Рис. 19а. Деревянная промежуточная опора линии передачи 35 кв.

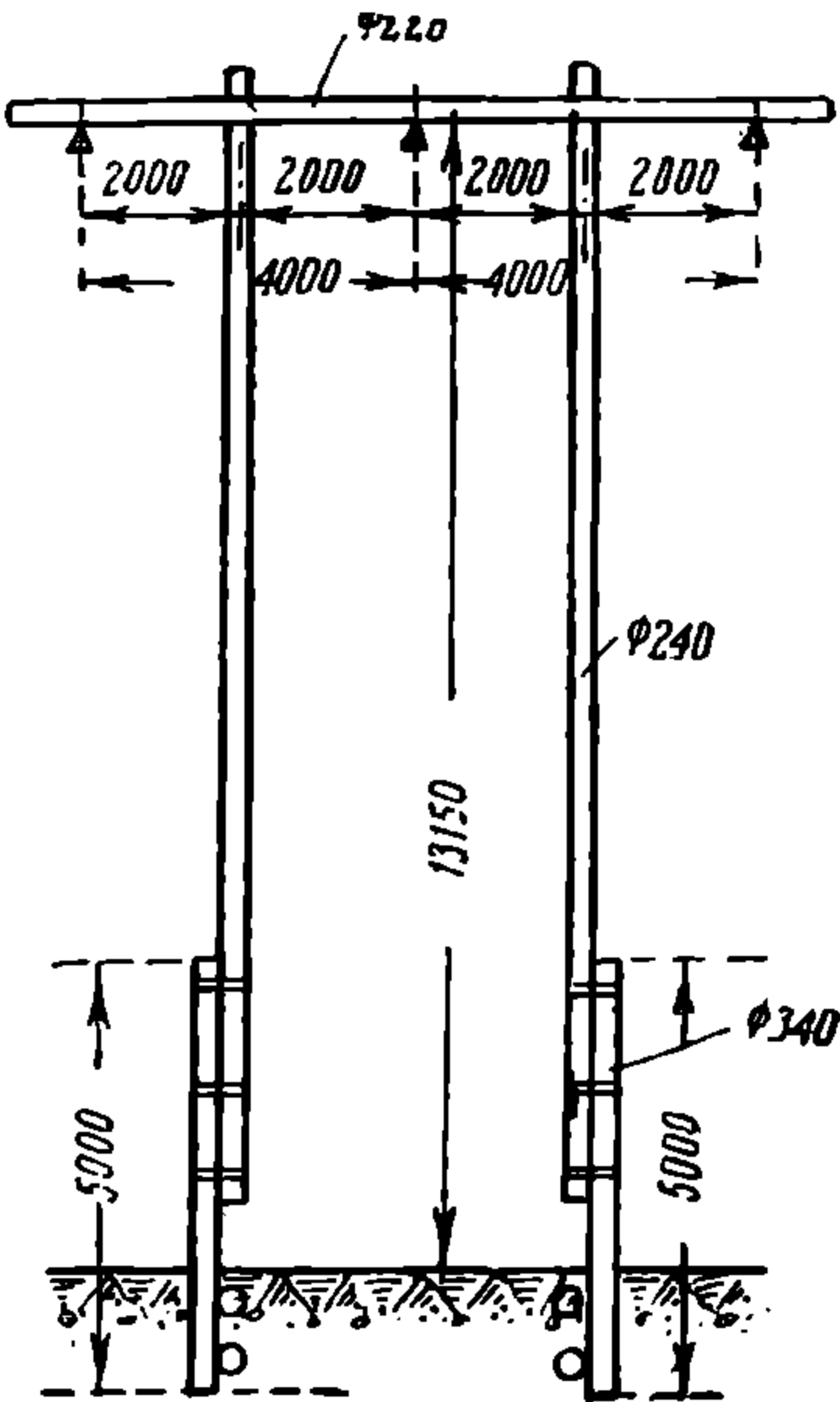


Рис. 19б. Деревянная промежуточная опора линии передачи 110 кв.

ров, а при напряжениях 35 и 110 кв, — при помощи подвесных изоляторов.

В таблице 4 приводятся расстояния между промежуточными опорами для типовых деревянных опор, принятых Главэнерго.

Таблица 4

Тип опор — одинарные				Тип опор — П - образные			
Напряжения в линии передачи 6 кв				Напряжение 35 кв		Напряжение 110 кв	
Медные провода		Алюмин. пров.		Медные или стале-алюм. пров. сечен. в мм ²	Расст. между опорами в м	Медные или стале-алюминиевые провода сечен. в мм ²	Расстоя- ние меж- ду опо- рами в м
Сеч. пров. в мм ²	Расст. ме- жду пром. опорами в м	Сечен. пров. в мм ²	Расст. между пром. опор.				
25	95	A—25	70		—	— —	—
35	110	A—35	80	35, CA— 35	170	— —	—
50	125	A—50	90	50, CA— 50	190	50 CA— 50	190
—	—	—	—	70, CA— 70	200	70 CA— 70	200
—	—	—	—	95, CA— 95	215	95 CA— 95	215
—	—	—	—	120, CA—120	225	120 CA—120	225

Из приведенных в таблице расстояний между промежуточными опорами видно, что чем больше сечение проводов, тем больше расстояние между опорами. Расстояние между опорами при алюминиевых проводах, в силу меньшей механической прочности последних меньше, чем для медных. При П-образных опорах, применяемых при напряжениях 35 и 110 кв, расстояние между опорами значительно больше, чем при одинарных опорах. Более наглядно указанные зависимости видны из приводимых кривых на рис. 20.

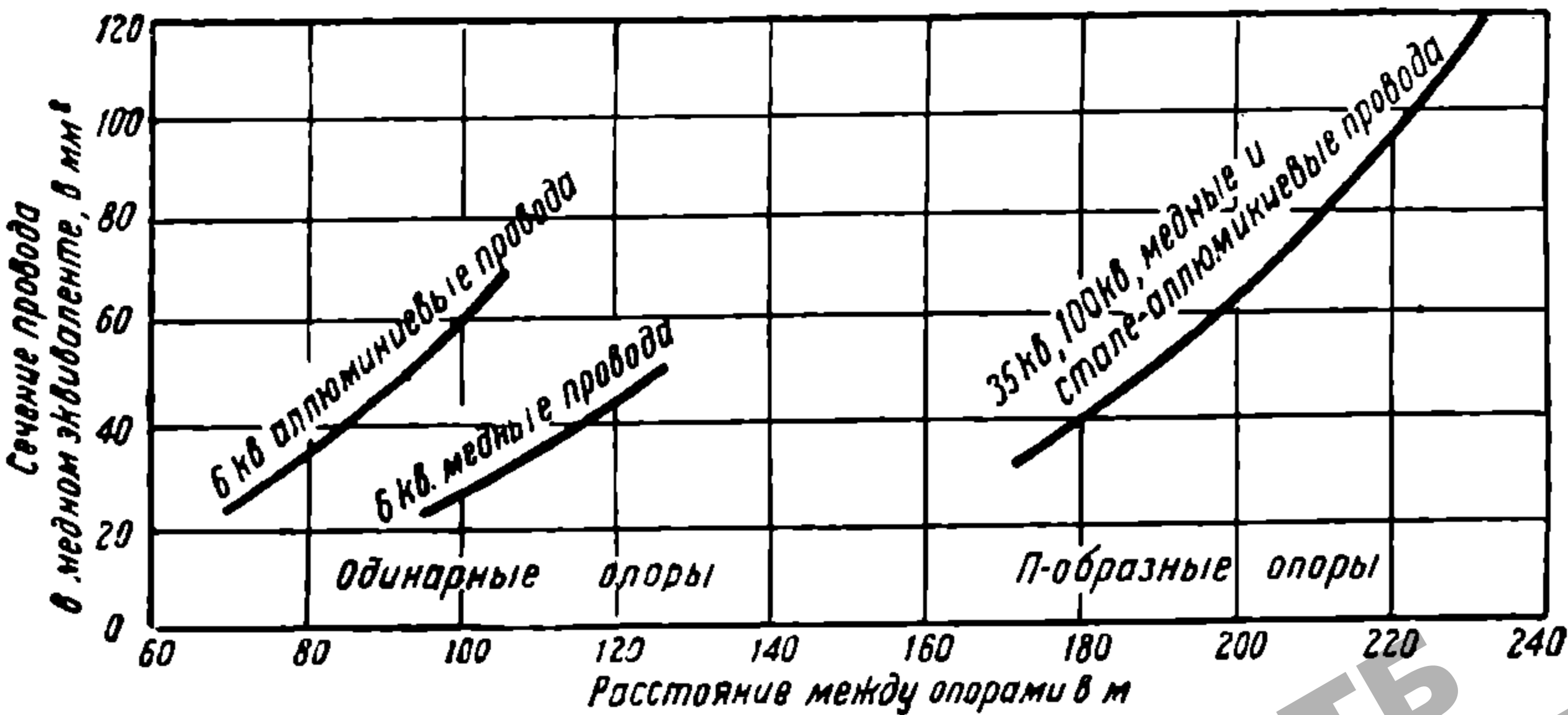


Рис. 20.

Пролеты, смежные с анкерными и угловыми опорами, несколько меньше, чем промежуточные. Высота проводов линии передачи над уровнем земли на опорах колеблется в пределах от 8300 до

13 150 мм и зависит от длины пролета между опорами, типа опор и величины напряжения.

Согласно техническим условиям линий электропередач, высота низшей точки провода при наивысшей температуре или гололеде и отсутствии ветра должна быть:

- а) над головкой рельса при пересечении железных дорог нормальной колеи (с паровой тягой) не менее 7,5 м,
- б) над полотном шоссейной дороги не менее 7,0 м,
- в) над узкоколейной железной дорогой, а также над обыкновенной грунтовой или лесной не менее 6,0 м,
- г) над проводами линии связи (телефон, телеграф), а также над проводами линий высокого напряжения не менее 2,0 м,
- д) при пересечении судоходных рек и каналов до верхней точки мачт проходящих судов не менее 1,0 м.

Следует отметить, что провода линий электропередач оказывают вредное влияние, нарушающее нормальную работу на близ проходящие провода связи. Поэтому линии электропередачи должны находиться по возможности дальше от проводов связи, так как в радиусе 5 км все еще сказывается хотя и небольшое влияние их на провода связи. Согласно техническим условиям линий электропередач, если по условиям местности или соображений экономики это расстояние выдержать невозможно, то расстояние желательно делать не менее 1 000—1 500 м; только в исключительных случаях и при том на коротком протяжении (1—2 км) минимальное расстояние между линиями передачи и проводами связи может быть допущено 25 м. Стоимость 1 км линии электропередачи зависит от типа опор, сечения проводов, величины напряжения и для каждой конкретной линии электропередача должна подсчитываться подробно в соответствии с существующими нормами и положениями¹.

§ 4. Понижительные трансформаторные подстанции

При подходе линий электропередач высокого напряжения к району потребления энергии, для понижения напряжения до величины, при которой происходит распределение энергии между потребителями, устраивается понижительная трансформаторная подстанция. В условиях снабжения электроэнергией какого-либо промышленного района, понижительная трансформаторная подстанция, устраиваемая отдельно для снабжения города, заводов, называется районной подстанцией.

На рис. 21 приведен разрез главной понижительной подстанции Волховской станции 99 000 ква с трансформированием напряжения со 100 кв на 35 кв.

¹ Сметный справочник. Воздушные линии высокого напряжения, Издание Главэнерго НКТП.

По своей принципиальной схеме устройства и оборудования понизительные трансформаторные подстанции мало отличаются от повысительных подстанций, разобранных в § 2, и также, как повысительные подстанции, бывают как закрытого, так и открытого типа. Последние имеют место преимущественно при напряжениях 35 кВ и выше. На районных подстанциях СССР в соответствии с наиболее распространенными у нас величинами напряжения

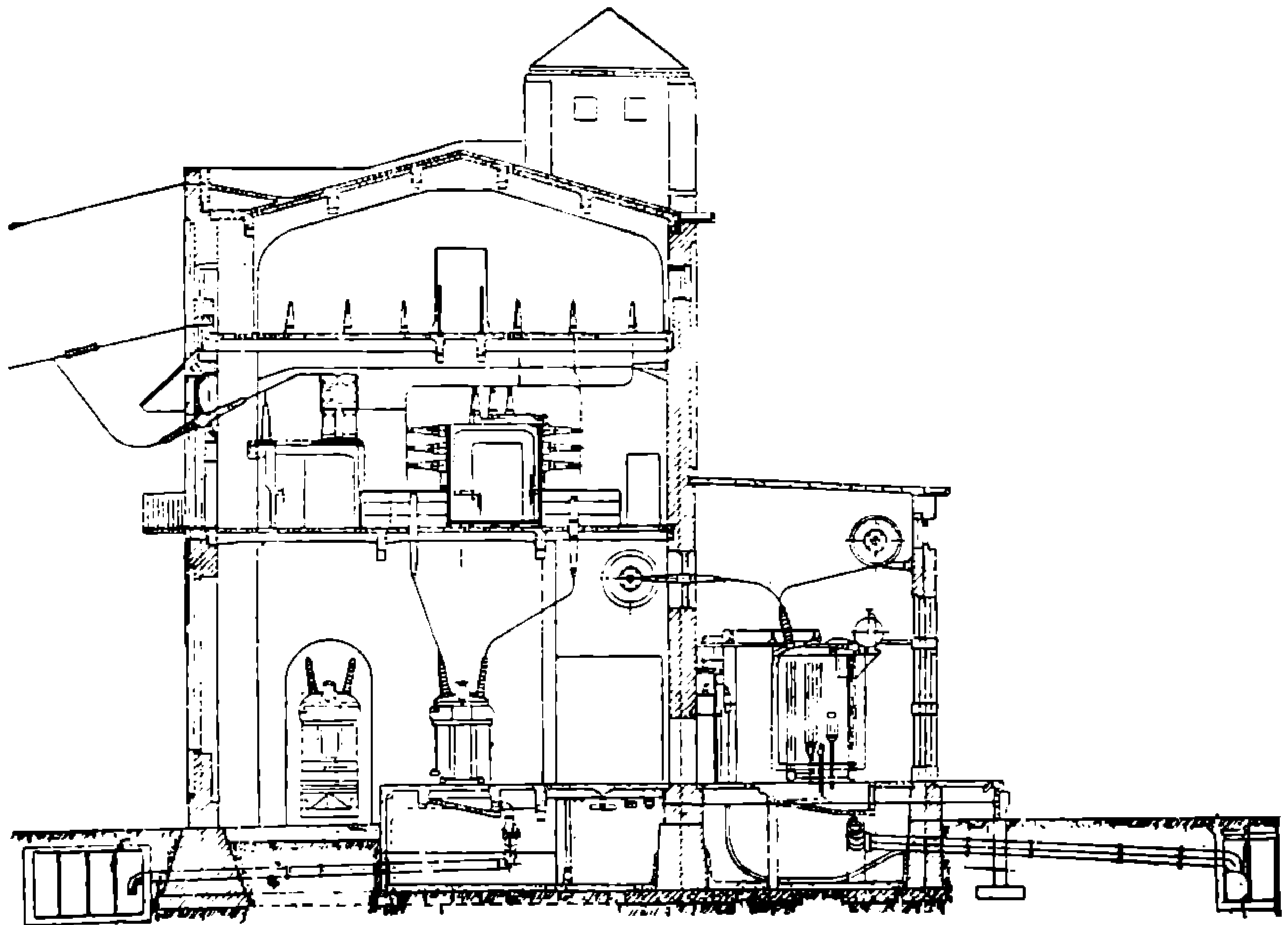


Рис. 21. Главная понизительная подстанция Волховской станции, 99 000 кВа, 100/35 кВ.

в линиях передачи, довольно часто происходит понижение напряжения с 110 кВ на 35 кВ или 6 кВ.

Снабжение электрических железных дорог энергией может осуществляться или непосредственным получением ее от центральных электрических станций по линиям электропередач высокого напряжения или от районных понизительных подстанций. При получении энергии непосредственно от линии электропередачи высокого напряжения, понизительная трансформаторная часть устраивается при тяговых железнодорожных подстанциях. На рис. 22 приведена общая схема энергоснабжения электрической жел. дор. от центральных электрических станций. На тяговых железнодорожных подстанциях на схеме указаны трансформаторы, понижающие напряжение до величины, необходимой для питания подстанционных агрегатов.

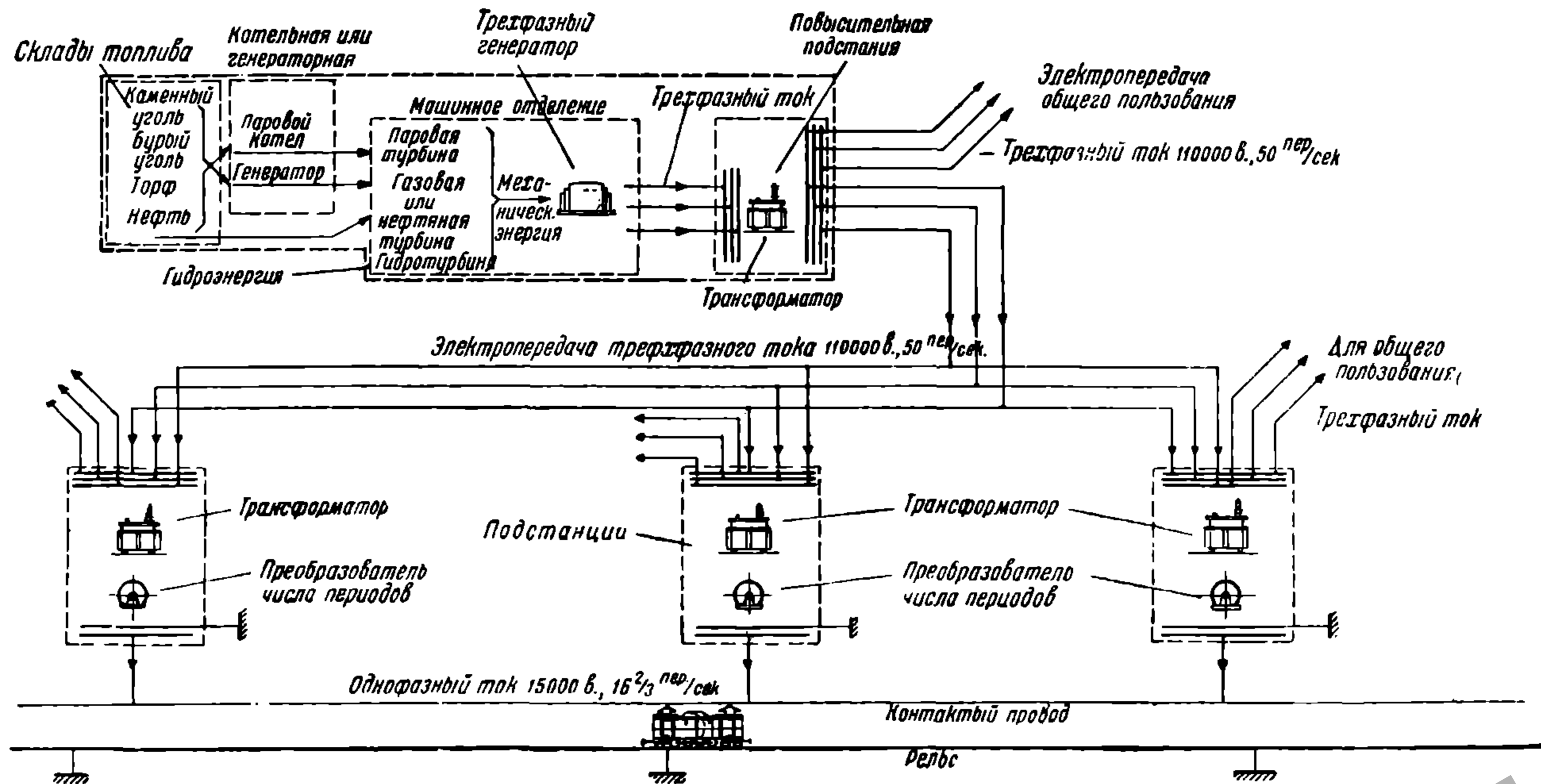


Рис. 22. Общая схема энергоснабжения жел. дор. от центральной электрической станции. Трехфазный ток нормальной частоты (50 пер/сек) в линии передачи и однофазный ток пониженной частоты (16 2/3 пер/сек) в контактном проводе.

При получении энергии от районных подстанций, на тяговых железнодорожных подстанциях понижающая трансформаторная часть устраивается в том случае, когда по условиям дальности

расстояния передачи электроэнергии и величины передаваемой мощности, напряжение в подводящей линии электропередачи от районной подстанции к тяговой железнодорожной подстанции должно быть выше напряжения необходимого для питания агрегатов, установленных на тяговой подстанции.

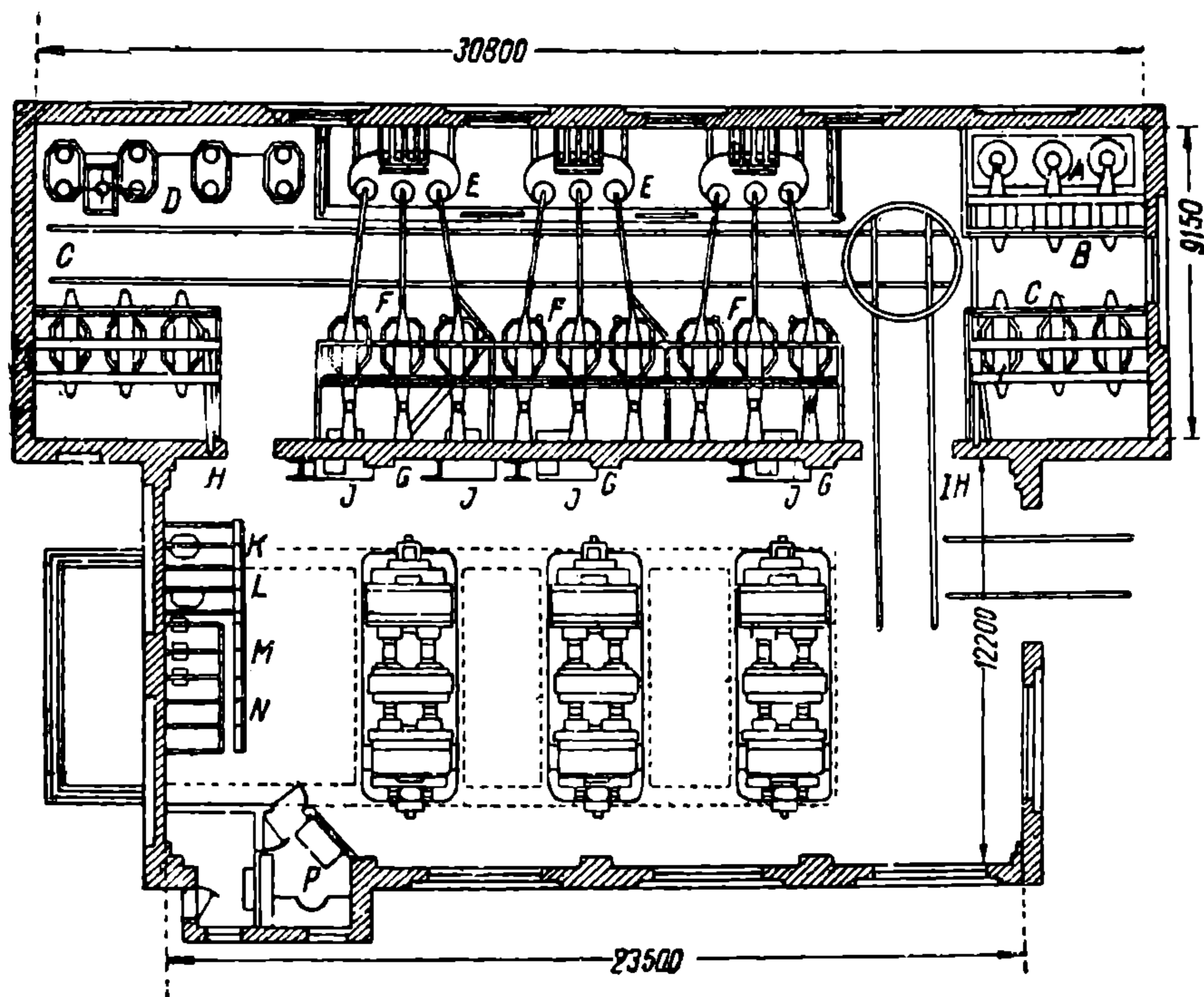


Рис. 23. План подстанции Пайдмонт жел. дор. Чикаго—Мильвоки—С-Поль.

А—трансформаторы тока линии 100 кВ; В—масляные выключатели между этой линией и сборными шинами 100 кВ подстанции; С, С—масляные выключатели между сборными шинами и линиями 100 кВ, отходящими к соседним подстанциям; Д—электролитические разрядники; Е—силовые трансформаторы 110/2,3 кВ; F—масляные выключатели между силовыми трансформаторами и шинами 100 кВ; G—щиты управления масляниками F; H—щиты управления масляниками; I—щиты управления масляниками В; J—щиты управления синхрон. моторами; K—измерительные приборы для линий; L—сеть сигнализации и освещения; M—щиты генераторов 3 000 вольт; N—щиты фидеров 3 000 вольт; P—служебное помещение.

Понизительная трансформаторная часть тяговых железнодорожных подстанций устраивается как закрытого, так и открытого типа. На рис. 23 и 24 приведены план и разрезы понизительной трансформаторной части подстанции закрытого типа, находящейся в общем здании тяговой подстанции Пайдмонт американской жел. дороги Чикаго—Мильвоки—С.-Поль.

Подводимое напряжение к тяговой подстанции в линии электропередачи 100 000 в. Преимущественное распространение при под-

водимых высоких напряжениях 110 кВ, 35 кВ получили понизительные трансформаторные подстанции открытого типа, с установкой масляников и трансформаторов на открытом воздухе. Техническая и экономическая характеристика открытой понизительной трансформаторной части при тяговой подстанции по сравнению с закрытым типом аналогичны закрытым и открытым типам повысительных подстанций, изложенным в § 2.

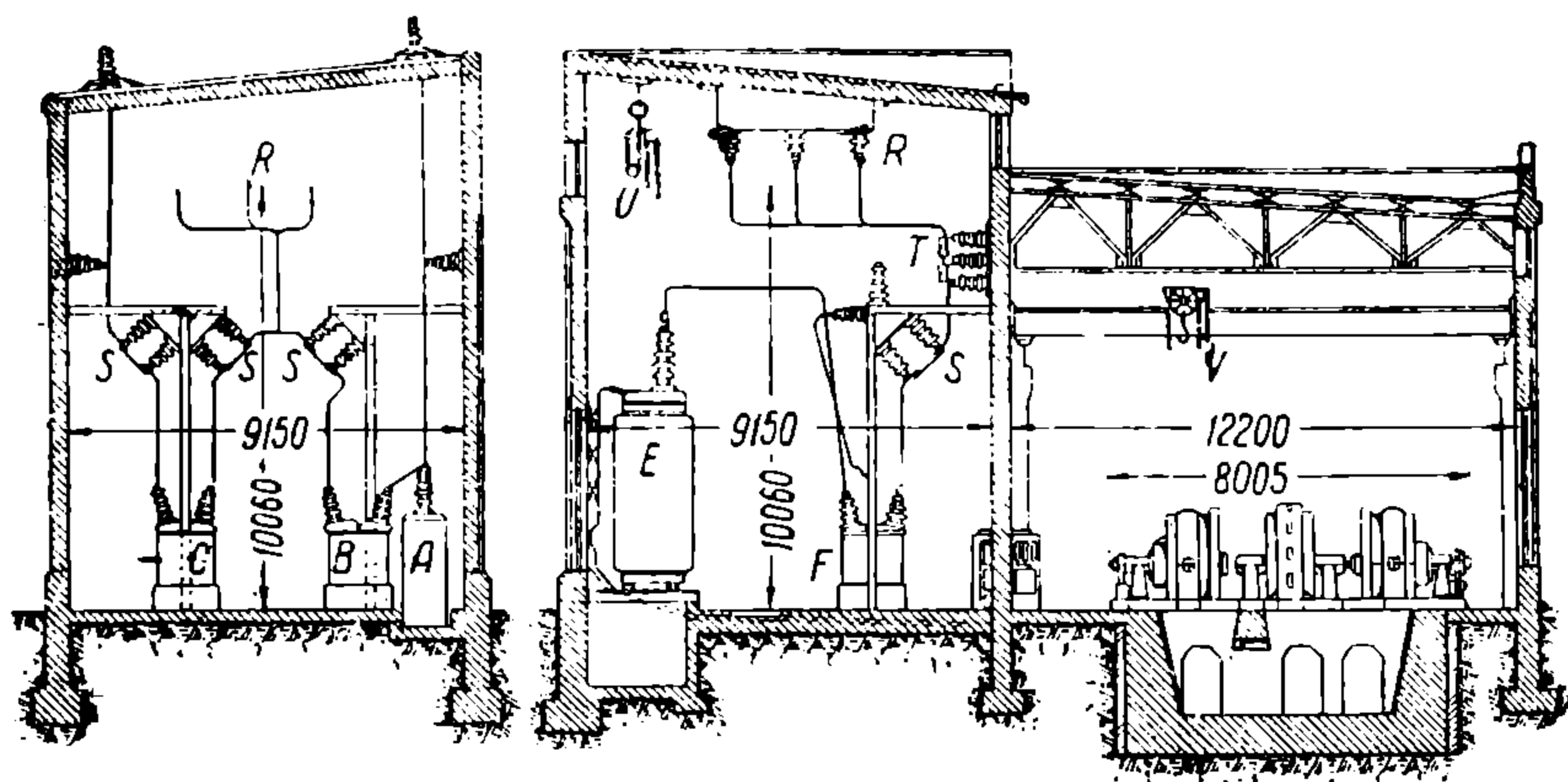


Рис. 24. Разрезы подстанции Пайдмонт, жел. дор. Чикаго—Мильвоки—С.-Поль

А, В, С, Е, F—см. обозначения к рис. 23. R—сборные шины 100 кВ; S—раз'единители; T—дрессельная катушка; U—галь на 4,5 м; V—мостовой кран на 9 т.

На рис. 25 приводится открытая часть подстанции Фельдкирх австрийской жел. дор. линии Иннсбрук—Зальцбург.

С левой стороны рельсового пути расположены масляные выключатели, с правой, у здания подстанции, — трансформаторы.

В СССР понизительная трансформаторная часть тяговых подстанций при подводимом напряжении 110 кВ и 35 кВ устраивается открытого типа, и при 6 кВ — закрытого типа.

На рис. 26 изображена открытая часть тяговой подстанции Сталиниси электрифицированной Закавказской жел. дор.

Спереди видны масляные однофазные выключатели, далее — раз'единители.

Стоимость устройства ввода и электрооборудования открытой понизительной части тяговой железнодорожной подстанции в сильной степени зависит от величины подводимого напряжения в линии электропередачи.

Так как строительная стоимость устройства открытой понизительной части тяговых железнодорожных подстанций при высоком напряжении значительно увеличивается, то в некоторых случаях технически и экономически целесообразнее построить параллельно линии передачи при пониженном напряжении, от которой и про-

изводить питание тяговых железнодорожных подстанций. На некоторых открытых тяговых подстанциях линии передачи высокого и пониженного напряжения соединяются между собою. При проектировании энергоснабжения электрических железных дорог схема питания энергией от центральных электрических станций или от районных подстанций тяговых железнодорожных подстанций устанавливается на основании технико-экономического расчета и сравнения различных схем подвода энергии.

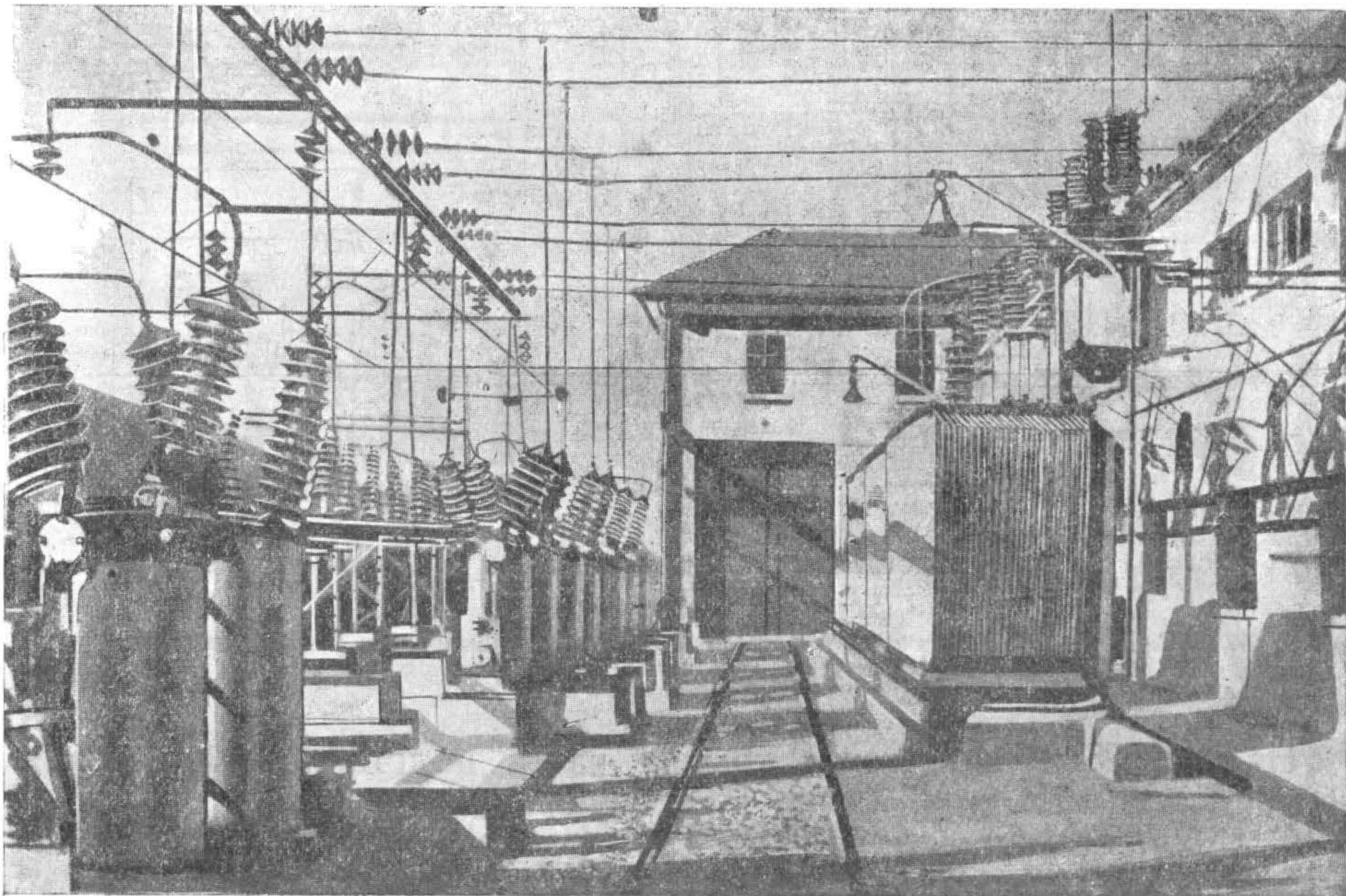


Рис. 25. Подстанция Фельдкирх полуоткрытого типа линии Иннсбрук—Зальцбург. Подводимое напряжение—56 кВ, шины—15 кВ и щит управления находятся в здании подстанции.

В целях освещения технически возможных вариантов подвода энергии к тяговым железнодорожным подстанциям на рис. 27а, б и в (стр. 46) приведены варианты схемы питания тяговых подстанций при наличии центральной электрической станции и двух районных подстанций, расположенных вблизи электрифицируемой жел. дороги.

Во всех трех вариантах схем питания, подстанции 1 и 5 питаются от районных подстанций А и Б при двойной линии передачи при напряжении 6,0 кВ.

Питание тяговых подстанций 2, 3 и 4, как указано на рис. 27а, б и в, может быть произведено по одному из 3 вариантов, при

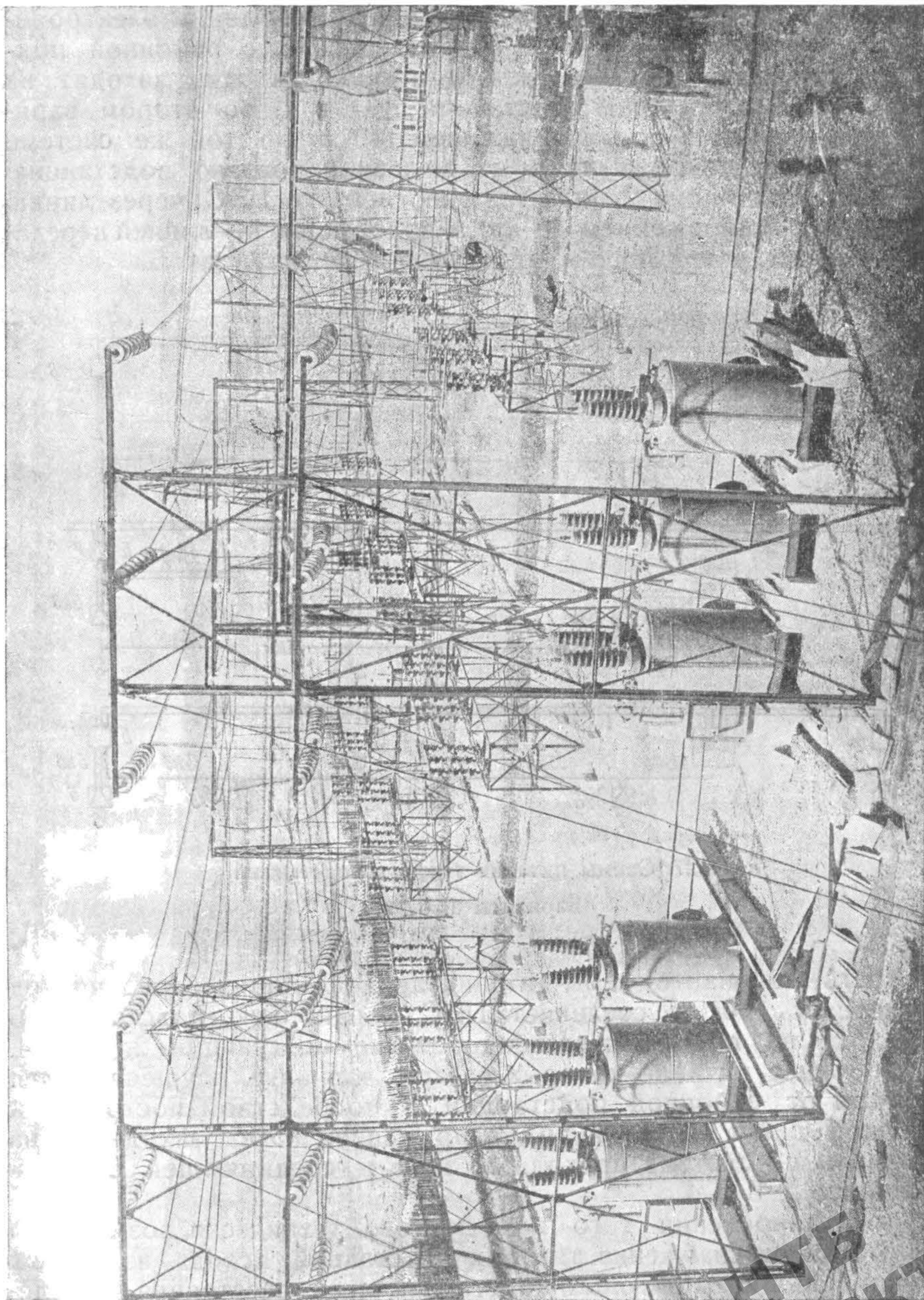


Рис. 26. Часть открытой тяговой подстанции Сталини на электрифицированной Закавказской ж. д.

неизменном положении соединения центральной электрической станции (ЦЭС) с районной подстанцией Б двойной линией передачи, под напряжением 110 кВ.

В первом варианте схемы питания одна цепь линии электропередачи под напряжением 110 кВ соединяет ЦЭС с районной подстанцией Б, вторая цепь по системе проходных шин заходит на тяговые железнодорожные подстанции 2, 3 и 4. Во втором варианте линия передачи под напряжением 110 кВ по той же системе проходных шин заходит лишь на железнодорожную подстанцию 3. Тяговая подстанция 2 питается энергией от ЦЭС через линию передачи под напряжением 35 кВ, а подстанция 4 — линией передачи под тем же напряжением от районной подстанции Б.

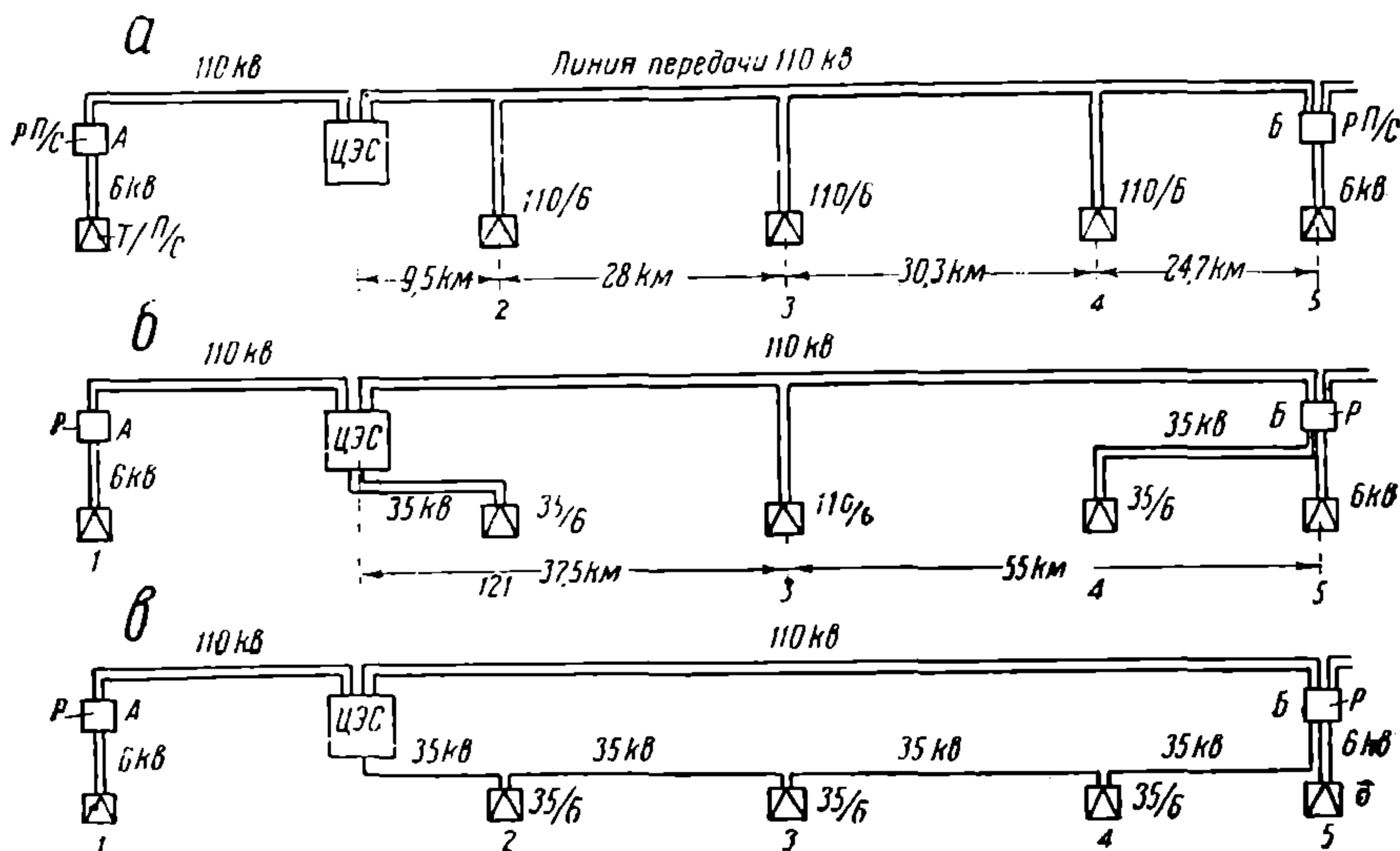


Рис. 27. Схемы питания тяговых подстанций.

Варианты а, б, в.

В третьем варианте схемы питания двойная линия передачи под напряжением 110 кВ соединяет ЦЭС и районную подстанцию Б без захода на тяговые железнодорожные подстанции 2, 3 и 4, двухстороннее питание которых в этом варианте осуществляется от ЦЭС и от районной подстанции Б посредством построенной одиночной линии передачи под напряжением 35 кВ, заходящей на подстанции по системе проходных шин и соединяющей все три подстанции 2, 3 и 4.

При установлении того или другого технически возможного варианта энергоснабжения тяговых подстанций, исходя из данных рабочих мощностей тяговых подстанций и их расстояния, определяется необходимое напряжение в линиях передачи и сечение проводов по условиям пропускной способности линии электропередачи. При электрификации жел. дор. и разрешении вопроса энергоснабжения, помимо приведенного ранее частного случая наличия двух

районных подстанций довольно часто проходит вдоль линии жел. дороги лишь электропередача напряжением 110 кВ. В этом случае, исходя из условия допустимой величины пропускной способности линии электропередачи, определяемой рабочей мощностью подстанций и их расстоянием, энергоснабжение возможно технически осуществить по одной из приведенных на рис. 28а, б и в схем.

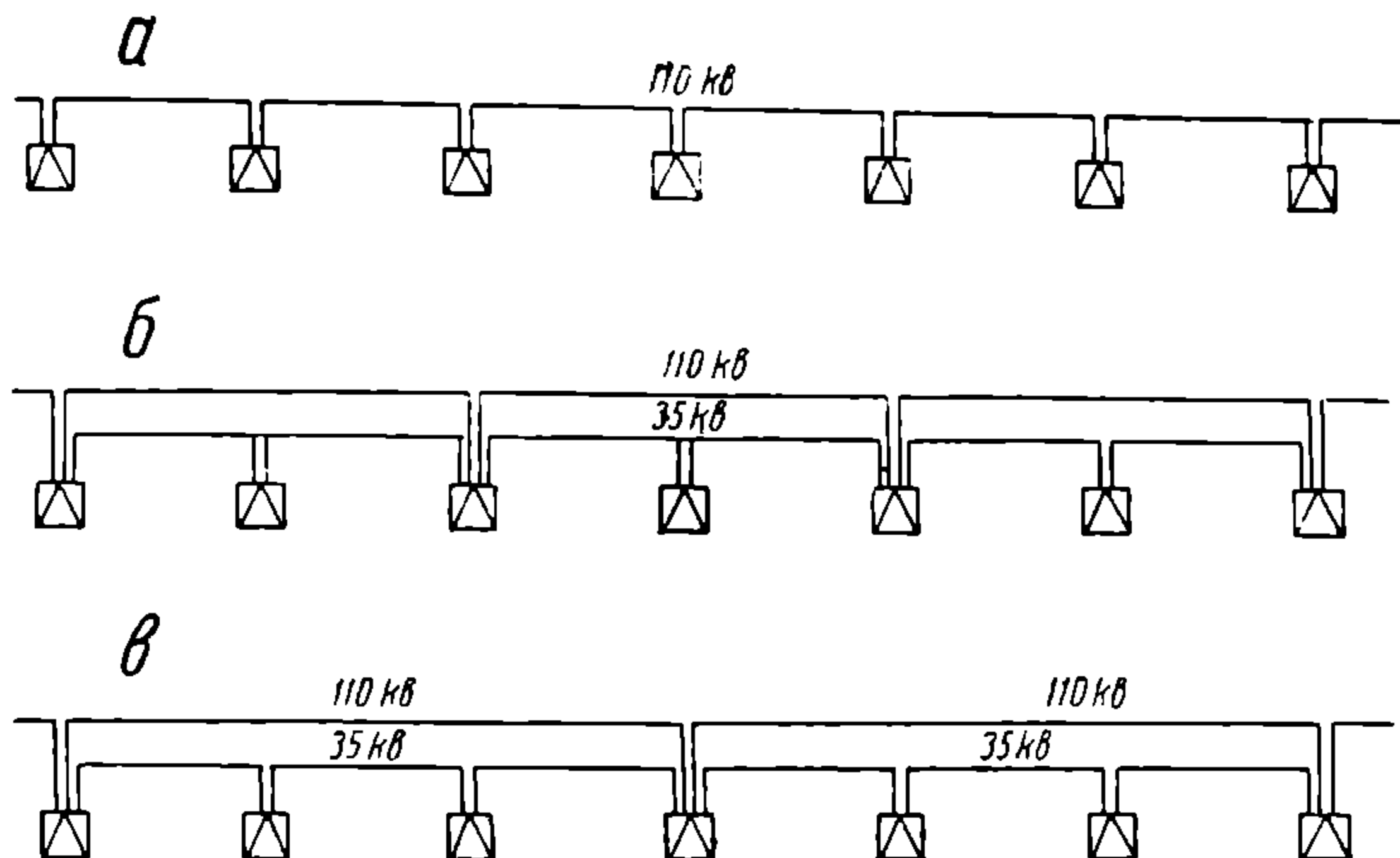


Рис. 28. Схемы питания тяговых подстанций.

Варианты а, б, в.

В первом варианте все тяговые железнодорожные подстанции присоединены к линии передачи 110 кВ. Во втором — тяговые подстанции присоединены к линии электропередачи 110 кВ через одну, а каждая средняя присоединяется к крайним посредством линии передачи напряжением 35 кВ. В третьем варианте тяговые подстанции присоединяются к линии электропередачи 110 кВ через две, а средние соединены линией электропередачи напряжением 35 кВ. При сравнении вариантов необходимо считаться с тем, что тяговые железнодорожные подстанции в СССР должны быть базой для снабжения энергией сельского хозяйства и других потребителей, так как электрифицируемая жел. дорога должна являться стимулом и проводником электрификации района, прилегающего к жел. дор. При напряжении 35 кВ в открытой понизительной части тяговых подстанций более легко осуществляется питание энергией разветвленной сети районных потребителей.

Принятие того или другого варианта схемы питания тяговых подстанций должно производиться с учетом возможного снабжения энергией районных потребителей и на основании технико-экономических подсчетов по вариантам и сравнения их в отношении строительно-эксплуатационных расходов, а также на основании сопоставления их в отношении надежности в бесперебойном снабжении

энергией электрифицируемой жел. дороги. Последнее обстоятельство имеет особо важное значение для непрерывной работы электрической жел. дороги, поэтому питание энергией тяговых подстанций должно быть двухстороннее с тем, чтобы в случае короткого замыкания, или неисправности с одной стороны, работа подстанции могла происходить без перерыва, благодаря питанию с другой стороны и не было бы нарушено нормальное движение поездов.

§ 5. Тяговые преобразовательные подстанции

Тяговые железнодорожные подстанции в том случае, когда система тока в линии электропередачи и в контактном проводе различны, должны иметь агрегаты преобразования рода тока. Так как тяговые железнодорожные подстанции являются опорным передаточным пунктом в снабжении электрических жел. дорог энергией, связывающими линии электропередачи и контактную сеть, то тип агрегатов оборудования тяговых подстанций зависит от рода тока в линии передачи и от рода тока и величины напряжения, принятых в контактной сети электрифицируемой жел. дороги. Тогда, когда род тока и число периодов одинаково как в линии электропередачи, так и рабочей контактной сети электрической жел. дор., но различны только по величине напряжения, тяговые подстанции представляют собой простые понизительные трансформаторные подстанции, о которых было сказано ранее. Такие подстанции существуют на некоторых германских, швейцарских и австрийских жел. дорогах, где принята система однофазного тока в контактном проводе и снабжение жел. дор. энергией производится от электрических станций, на которых установлены генераторы однофазного тока специально для нужд дороги. При одном и том же роде тока в линии электропередачи и в контактном проводе, но при различной частоте (число периодов) вызывается уже необходимость в установке на тяговых подстанциях агрегатов преобразования частоты. В качестве агрегатов преобразования частоты могут служить синхронные мотор-генераторы, примененные на итальянских жел. дор., где и в линиях электропередачи, и в контактной сети принята система трехфазного тока, но в контактной сети число периодов трехфазного тока меньше, чем в линиях электропередачи. В целях уменьшения затрат на преобразователи частоты на тяговых подстанциях, при небольшом протяжении электрифицируемых участков, на итальянских жел. дорогах в этом случае применено устройство одной об'единенной подстанции преобразования частоты тока; тогда тяговые подстанции, расположенные вдоль линии жел. дороги, представляют собой простые трансформаторные понизительные подстанции без установки агрегатов преобразования частоты тока. Схема энергоснабжения при устройстве об'единенной преобразо-

вательной подстанции, применяемая на итальянских жел. дорогах, приведена на рис. 29.

При трехфазном токе в линии электропередачи и однофазном токе в контактном проводе, но с одинаковым числом периодов (частотой) питание электрической жел. дор. энергией может производиться по линиям электропередачи или непосредственно от центральной электрической станции или через трансформаторные подстанции, в зависимости от величины напряжения. Контактная

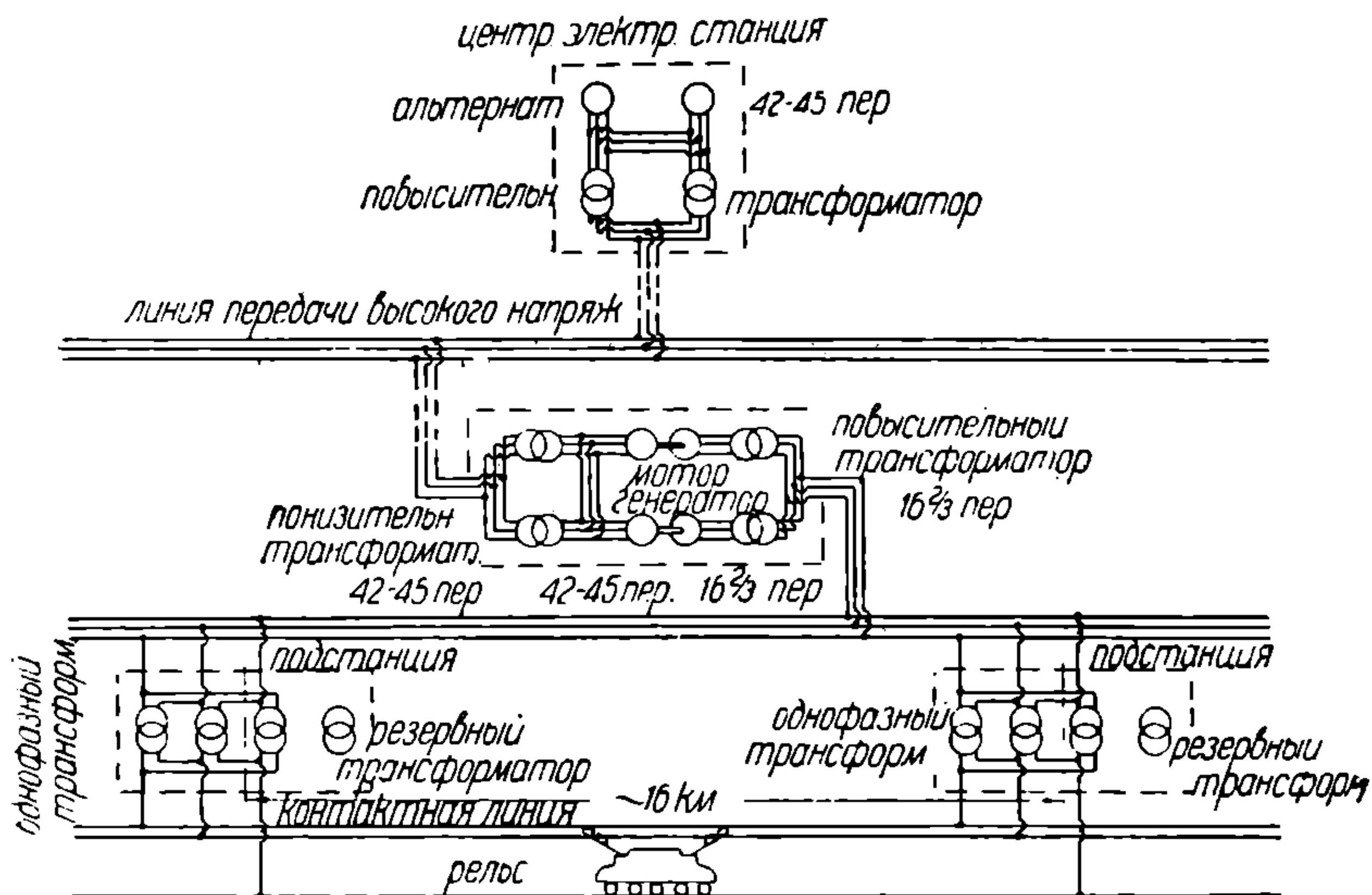


Рис. 29. Схема энергоснабжения при устройстве объединенной подстанции преобразования частоты тока.

сеть электрифицируемой жел. дороги разбивается на участки, питание которых производится от отдельных фаз. Вследствие неравномерной нагрузки фаз могут создаться плохие условия в работе агрегатов, установленных на центральной электрической станции.

Для улучшения условий работы электростанции необходима на станции установка агрегатов, выравнивающих нагрузку отдельных фаз.

Наиболее распространенной системой энергоснабжения электрических жел. дорог является система трехфазного тока промышленной частоты в линии электропередачи и постоянного тока — в контактном проводе. В этом случае на тяговых подстанциях, помимо понижающей трансформаторной части, должны быть агрегаты преобразования трехфазного тока в постоянный. Такими агрега-

тами могут быть: одноякорные преобразователи¹, каскадные преобразователи, мотор-генераторы, ртутные выпрямители.

Одноякорный преобразователь представляет собою агрегат с одним якорем, на котором одна общая обмотка выведена с одной стороны к коллектору, а с другой — к контактным кольцам. Подводя трехфазный ток со стороны контактных колец, со стороны коллектора получается постоянный ток.

Так как одноякорный преобразователь имеет одну общую обмотку на якоре, то соотношение напряжения трехфазного и постоянного тока находится в определенной неизменной зависимости.

Эта зависимость напряжений со стороны переменного и постоянного тока выражается отношением:

$$\frac{E_{пер}}{E_{пост}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sin \frac{\pi}{m} = 0,707 \sin \frac{\pi}{m},$$

где: m — число фаз, на которое обмотка якоря разделена витками, подводщими к контактным кольцам,

$E_{пер}$ — напряжение со стороны переменного тока и
 $E_{пост}$ — " " " " постоянного тока,

Напряжение со стороны переменного тока при значениях m для однофазного тока равно 2, трехфазного — 3 и шестифазного — 6, должно составлять от величины напряжения постоянного тока соответственно:

для однофазного $0,707 E_{пост}$,
 для трехфазного $0,612 E_{пост}$,
 для шестифазного $0,354 E_{пост}$.

Из приведенных данных видно, что напряжение со стороны переменного тока меньше, чем постоянного. Вследствие этого, применение одноякорных преобразователей вызывает необходимость в установке вполне определенных, соответствующих данным преобразователям, трансформаторов понижения напряжения. В силу взаимной зависимости напряжений колебание напряжения со стороны переменного тока вызывает изменение напряжения со стороны постоянного тока. Одноякорные преобразователи получили распространение на подстанциях французских электрических жел. дор. На электрифицированной жел. дор. Париж—Орлеан все одиннадцать подстанций оборудованы одноякорными преобразователями. Мощность одноякорного преобразователя — 1 000 квт, и напряжение со стороны постоянного тока — 750 в. На всех подстанциях одноякорные преобразователи соединены в группу последовательно по 2, что дает мощность группы 2 000 квт и

¹ Этот тип агрегата имеет много названий: в Германии — умформер, в Англии — конвертор, во Франции — коммутатриса, и эти названия сохранились и в русской литературе. Правильнее в нашей литературе применять термин — одноякорный преобразователь.

напряжение 1 500 в, что соответствует напряжению, принятому в контактом проводе. Наибольшее напряжение со стороны постоянного тока, на которое может быть построен одноякорный преобразователь, ограничивается условиями предотвращения образования на коллекторе кругового огня при перегрузках и коротком замыкании. Вследствие этого наивысшее напряжение у одноякорных преобразователей при переменном токе 50 периодов может быть доведено лишь до 1 600 — 1 750 в.

На рис. 30 приводится одноякорный преобразователь на 1 750 в, установленный в 1929 г. на тяговой подстанции электрической узкоколейной железной дороги Бильбао—Сен-Сабастьян в Испании.

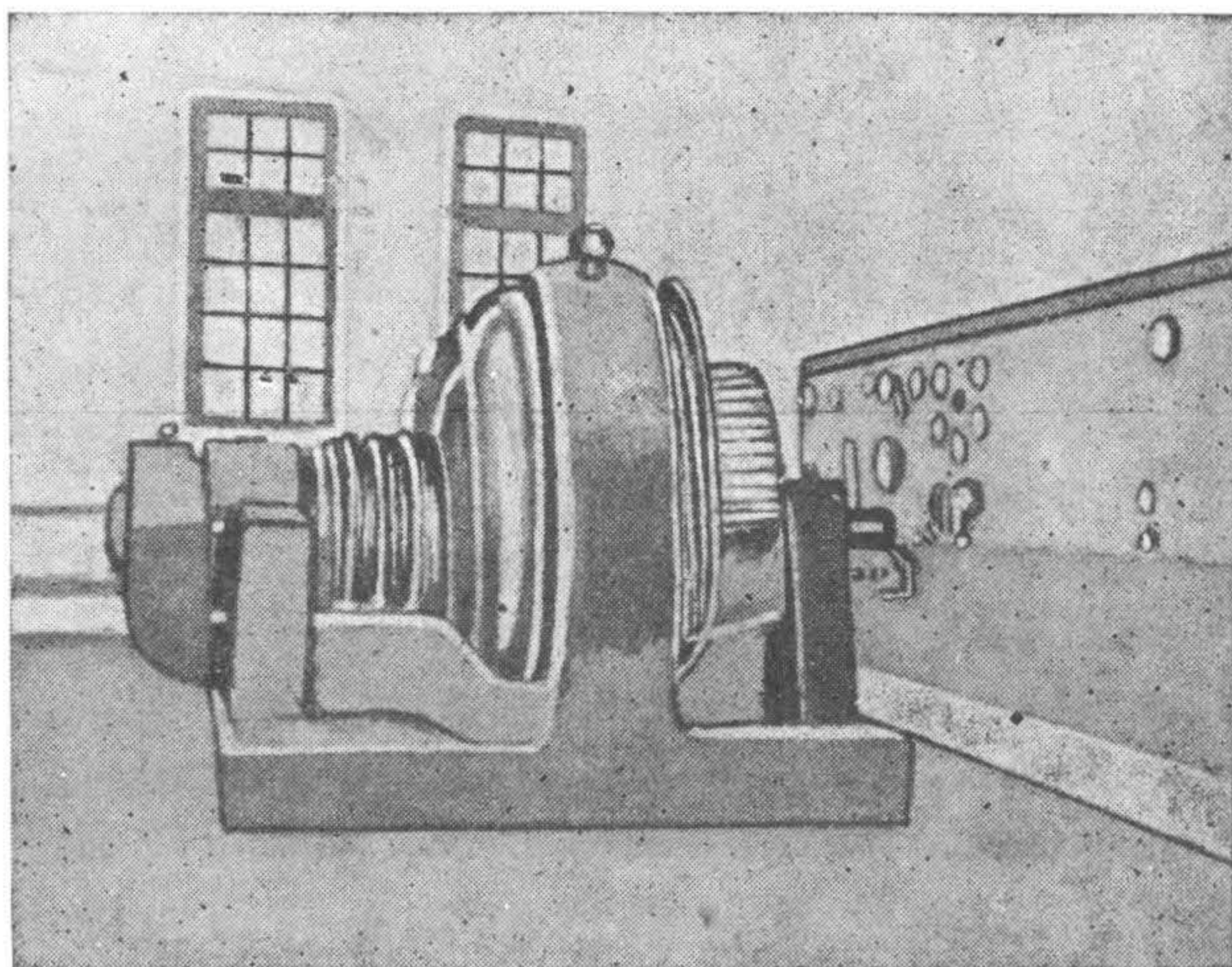


Рис. 30. Общий вид одноякорного преобразователя на 1 750 в.

Одноякорный преобразователь имеет высокий коэффициент полезного действия и допускает значительные перегрузки. Одноякорные преобразователи, примененные на подстанциях электрических жел. дор. Париж—Орлеан, допускают перегрузку 50% в течение 2 часов и 200% в течение 5 минут. Значение коэффициента полезного действия одноякорного преобразователя в зависимости от используемой мощности, при номинальной, принятой за 100%, приведено в таблице

Мощность в %	50	75	100	125	150
Коэффициент полезного действия в %	93	95	95,8	96,2	96,3

Одноякорный преобразователь обладает свойством обратимости и может получаемую со стороны постоянного тока энергию передавать обратно в линию электропередач, но вследствие сильной чувствительности в колебании напряжения вызывается необходимость в этом случае в установке дополнительного оборудования, регулирующего напряжение.

Каскадный преобразователь представляет собою соединение одноякорного преобразователя с насаженным на одном валу с ним асинхронным двигателем трехфазного тока. Ротор асинхронного

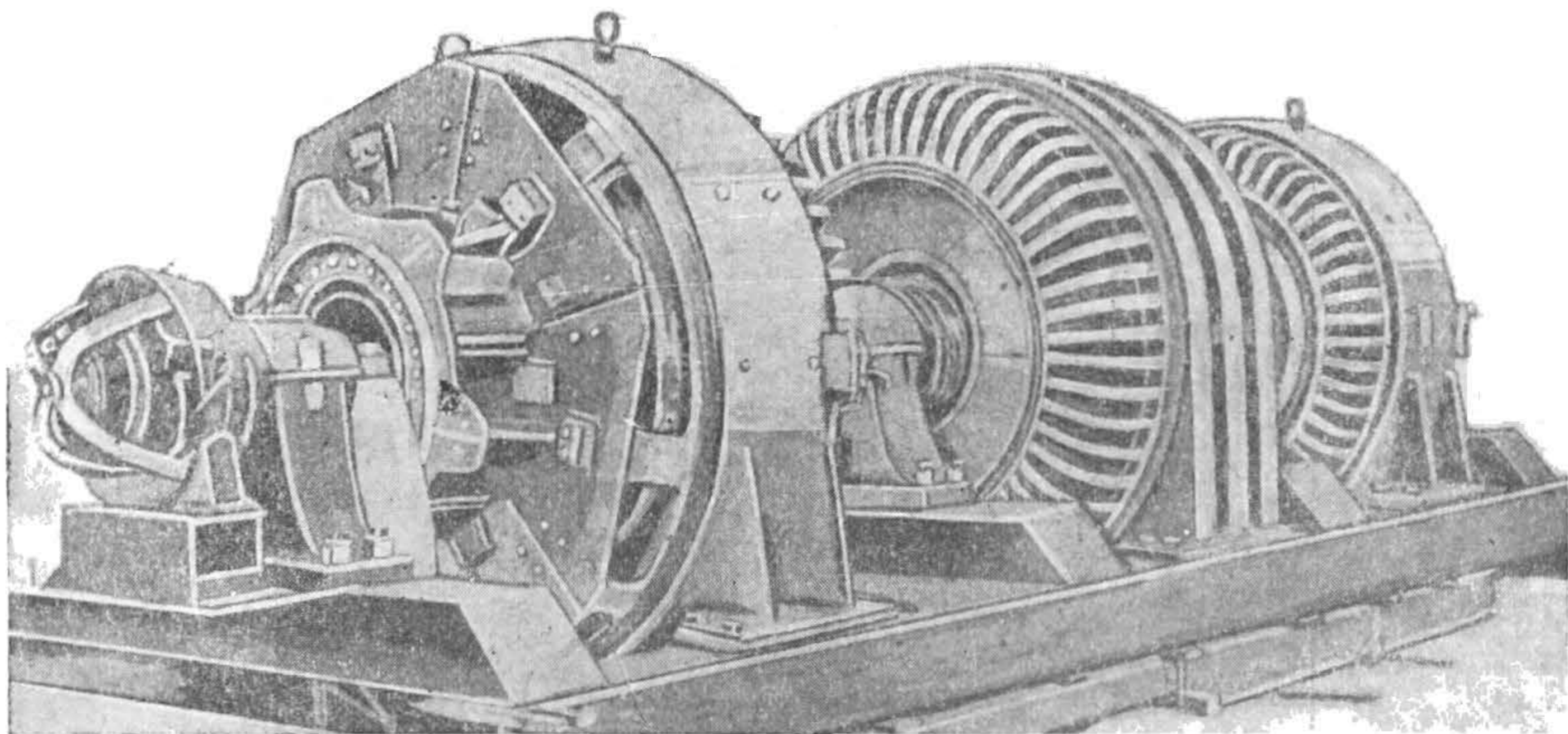


Рис. 31. Общий вид мотор-генератора ХЭМЗ.

двигателя соединен электрически с кольцами якоря преобразователя. Коэффициент полезного действия каскадных преобразователей, благодаря наличию двух электрических машин, меньше, чем одноякорных преобразователей. Стоимость каскадных преобразователей дороже, чем одноякорных. До получения одноякорных преобразователей с высоким напряжением каскадные преобразователи еще имели применение, в настоящее же время с усовершенствованием и развитием одноякорных преобразователей, каскадные распространения не имеют.

Мотор-генератор состоит из двух типов электрических машин, сидящих на одном валу,—индукционного двигателя (синхронного или асинхронного) и генераторов постоянного тока. При мощности 1000 *квт* и более применяется только синхронный двигатель.

На рис. 31 приведен вид мотор-генератора. По обеим сторонам синхронного электродвигателя, к которому подводится трехфазный ток, на одном валу с ним находятся генераторы постоянного тока, соединенные между собой последовательно, которые и преобра-

зовывают переменный трехфазный ток в постоянный. Для питания током обмоток возбуждения полюсов генераторов помещается на том же валу небольшая возбудительная динамо-машина. Кроме этого возбудителя с противоположной крайней стороны на общем же валу помещается второй возбудитель для питания обмоток ротора синхронного электродвигателя. Мощность каждого генератора—1 000 *квт*, при напряжении 1 500—1 650 *в*. Следовательно, два последовательно соединенных генератора имеют общую мощность 2 000 *квт*, и напряжение 3 000—3 300 *в* со стороны постоянного тока. Синхронный электродвигатель и генераторы, находясь на одном валу, электрически не соединены между собой. Вследствие этого напряжение со стороны переменного и постоянного тока независимо, что является большим преимуществом мотор-генератора. К синхронному электродвигателю может быть подведено со стороны переменного тока предельное допустимое для него напряжение 10—12 *кв*. Таким образом при подводе линии передачи с напряжением 6 *кв* отпадает необходимость устройства на тяговой подстанции понизительной трансформаторной части. Коэффициент полезного действия мотор-генераторов, вследствие наличия двух машин, равен произведению коэффициентов полезного действия каждой из них и в общем меньше, чем у одноякорного преобразователя. Среднее место между ними по коэффициенту полезного действия занимает каскадный преобразователь. Благодаря способности мотор-генераторов выдерживать большие перегрузки, независимости от колебаний напряжения в линии передачи, большой устойчивости в работе, простого способа пуска в ход и регулирования в случае необходимости $\cos \varphi$, все это послужило основанием для применения мотор-генераторов на подстанциях электрических жел. дорог. Так как мотор-генератор обладает свойством обратимости, т. е. при получении энергии со стороны постоянного тока способностью превращать ее и передавать на сторону переменного тока, то на горных электрических железных дорогах при применении рекуперации энергии мотор-генераторы получили исключительное распространение.

Расположение агрегатов мотор-генераторов на тяговой подстанции приведено на рис. 23, 24. При отсутствии рекуперативного торможения, в качестве агрегатов, преобразовывающих трехфазный ток в постоянный, на электр. ж. д. получили широкое применение ртутные выпрямители. На рис. 32 приведен ртутный выпрямитель фирмы Броун-Бовери, 12-анодный на номинальную мощность 3 000 *квт* при 600 *в*.

Ртутные выпрямители относятся к агрегатам без вращающихся частей, вследствие чего они имеют высокий коэффициент полезного действия, мало изменяющийся при колебании нагрузки. Коэффициент полезного действия ртутного выпрямителя выше, чем мотор-генератора и одноякорного преобразователя. Напряжение постоянного тока, получаемое от ртутного выпрямителя, зависит от

величины подводимого напряжения со стороны переменного тока. Следовательно, для получения постоянного тока определенного напряжения при ртутном выпрямителе должен быть трансформатор, изменяющий напряжение переменного тока до нужной величины. На рис. 33 приведены кривые коэффициентов полезного действия одноякорного преобразователя мотор-генератора и ртутного выпря-

мителя при различных коэффициентах нагрузки по отношению к номинальной, принятой за 100%.

Ртутные выпрямители, служащие для преобразования переменного тока в постоянный, за последнее время усовершенствованы, что еще больше увеличивает их преимущество по сравнению с другими преобразователями. В 1930 г. на подстанциях ж. д. Delaware Lackawanna Western Ry установлены ртутные выпрямители на 3000 в мощностью 3000 квт, снабженные сетками, расположенными перед анодами. Эти сетки служат защитой ртутных выпрямителей от обратных зажигания. Явления обратных зажигания и коротких замыканий в ртутных

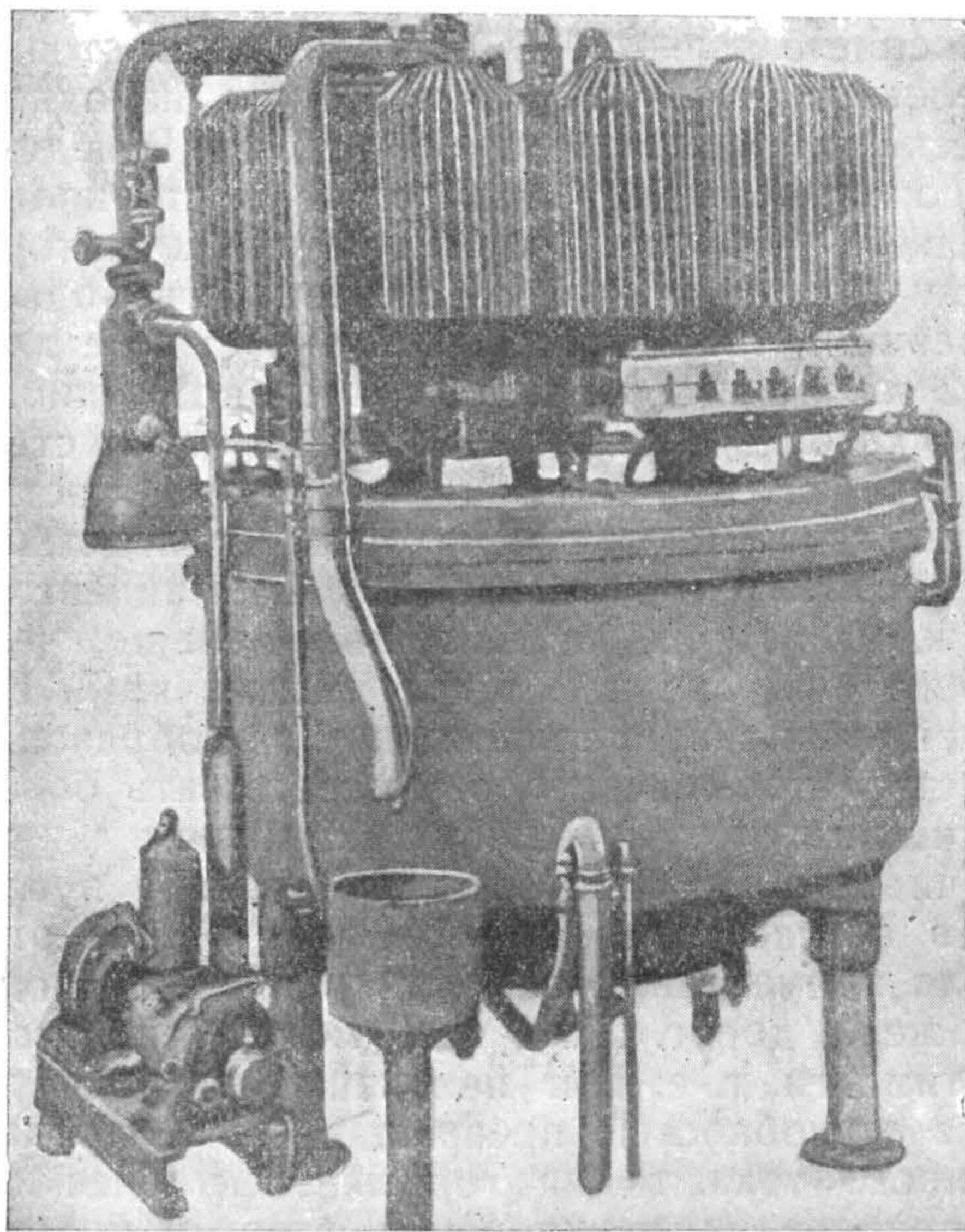


Рис. 32. Общий вид 12-анодного ртутного выпрямителя на номинальную мощность 3000 квт при 600 в (Броун-Бовери).

выпрямителях объясняются тем обстоятельством, что в них увеличение тока сопровождается увеличением ионов, попадающих на катоды. Увеличение испарения ртути вызывает увеличение давления. Если давление превышает определенную величину, то происходит обратное зажигание или короткое замыкание между анодами выпрямителя,

Кроме указанных ртутных выпрямителей с сетками, служащими лишь для защиты от обратных зажигания или коротких замыканий, имеются еще ртутные выпрямители с сеточным управлением, появившиеся сравнительно в недавнее время и находящиеся еще

в стадии усовершенствования и испытаний. Применение их открывает новые возможности в развитии электрификации жел. дор. По данным инж. С. W. Olliver'a, приводимым в журнале Colliery Engineering (1932 г.), результаты испытаний показали следующие возможности ртутных преобразователей с сеточным управлением:

1) регулировка в широких пределах напряжения выпрямленного тока на преобразовательных подстанциях без применения ступенчатых трансформаторов или индукционных регуляторов;

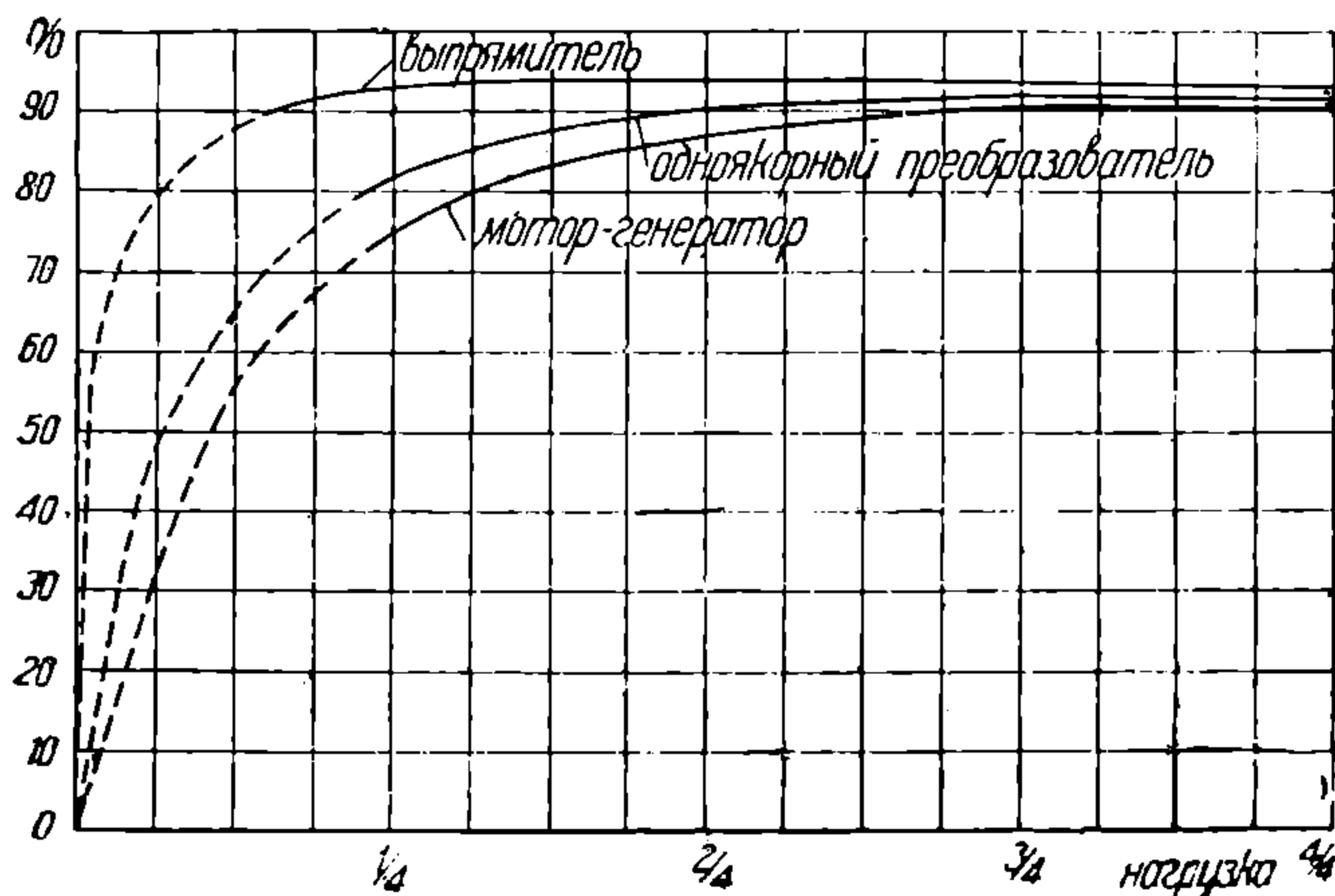


Рис. 33. Сравнение к. п. д. ртутного выпрямителя, однофазного преобразователя и мотор-генератора.

2) гашение обратных зажигания и ликвидация коротких замыканий в сети постоянного тока. Процесс протекает настолько быстро, что включенный последовательно быстродействующий выключатель ни разу не успевал подействовать;

3) преобразование частоты: преобразование трехфазного тока 50 периодов в однофазный $16\frac{2}{3}$ периодов или трехфазный любой другой частоты при помощи одних только ртутных преобразователей без каких-бы то ни было вращающихся машин;

4) преобразование постоянного тока в переменный, что открывает возможности рекуперации;

5) применение бесколлекторных тяговых двигателей при однофазной системе, частота которой может быть выбрана произвольно, так что контактная сеть может питаться непосредственно от сети промышленной частоты 50 периодов.

В СССР ведутся работы по созданию ртутных выпрямителей с сеточным управлением заводом Электросила и ВЭИ. Ртутные выпрямители с сеточным управлением и без сеток относятся к типу преобразователей с жидким катодом, в качестве которого является ртуть. В СССР, в Электрофизическом институте в Ленинграде

начиная с 1922 г. инж. Ситниковым М. М. ведутся конструирование и исследования так называемых ионных преобразователей: преобразователей с накаливаемым катодом и преобразователей с холодным катодом. Принцип действия ионных преобразователей основан на использовании электрических разрядов в газах. Работа по созданию ионных преобразователей большой мощности находится в стадии разработки. Ионные преобразователи, обладая всеми формами трансформации энергии, как и ртутные выпрямители

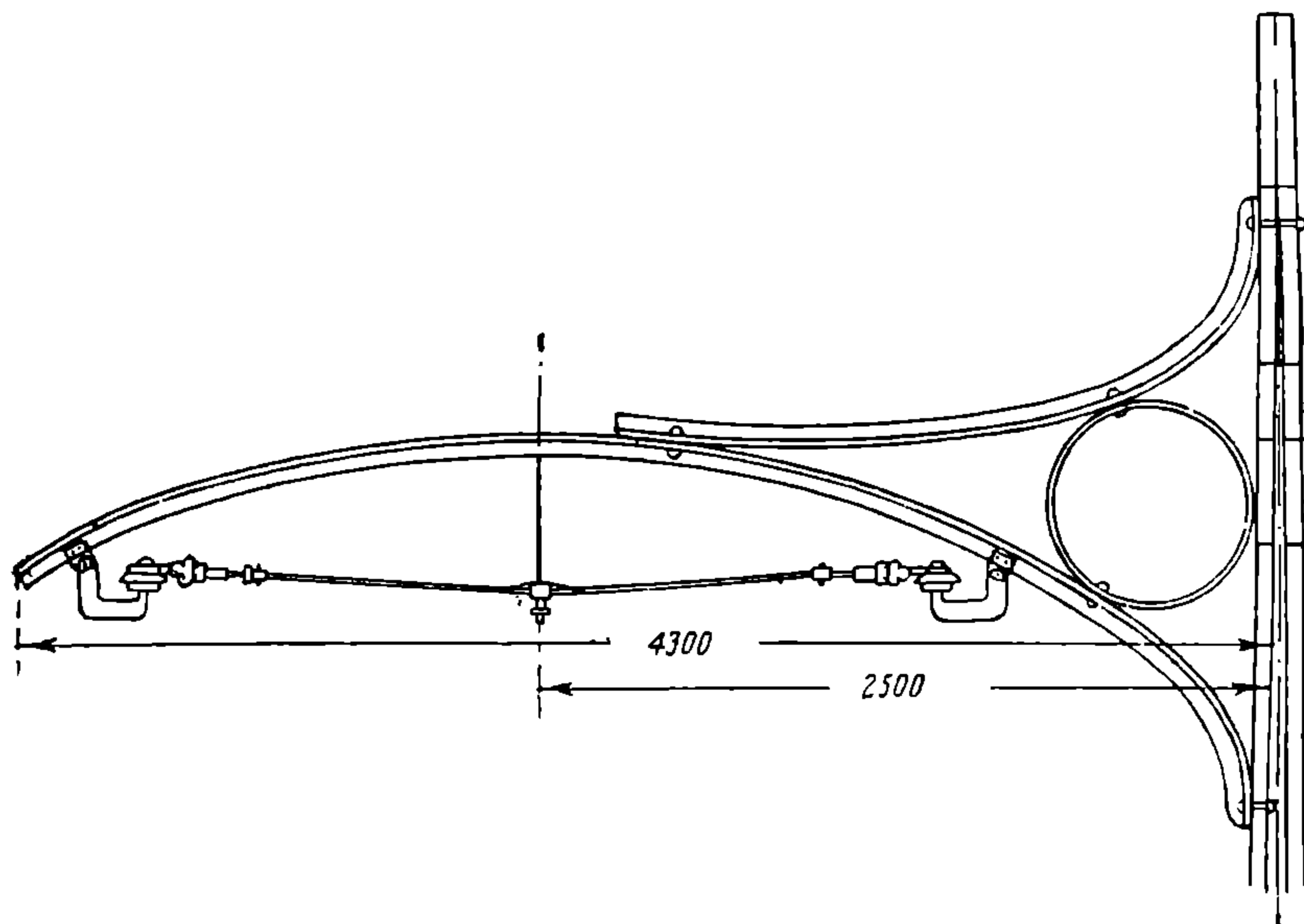


Рис. 34. Устройство консоли на опорах трамвайных линий.

с сеточным управлением, в конструктивном отношении и в отношении коэффициента полезного действия предполагают быть выше ртутных выпрямителей с сеточным управлением, могут быть выполнены на значительно большую мощность и иметь более широкую сферу их применения. Ионные преобразователи, при техническом разрешении и оформлении конструкции их по данным инж. М. М. Ситникова, могут работать на любое напряжение и любой ток при хорошем коэффициенте полезного действия». В Америке Нил'ем (компания G. E. C) в настоящее время разработаны ионные преобразователи с накаливаемым катодом на напряжение до 10 000 в и током порядка 250 ампер.

§ 6. Контактная сеть электрической жел. дор.

Рабочая сеть электрических жел. дорог, служащая для передачи электрической энергии электровозу, называется контактной сетью. В зависимости от системы тока и величины напряжения

контактная сеть электрических жел. дорог в конструктивном отношении осуществляется различно.

Как указывалось ранее, на электрических железных дорогах в контактной сети существуют следующие системы тока: постоян-

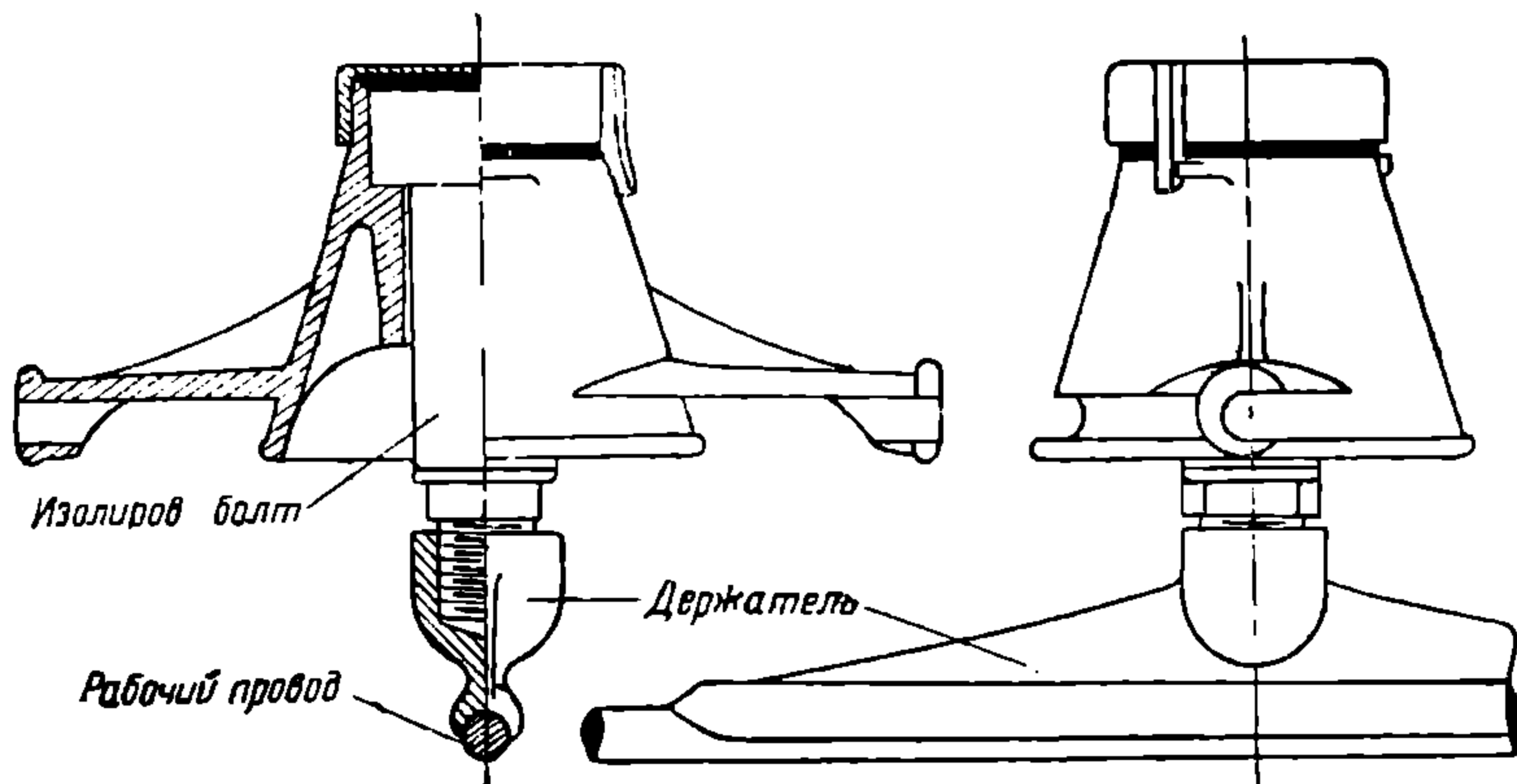


Рис. 35. Подвеска рабочего контактного провода при помощи изолированного болта.

ный, однофазный и трехфазный. При системе постоянного тока в контактном проводе, величина напряжения его, в зависимости

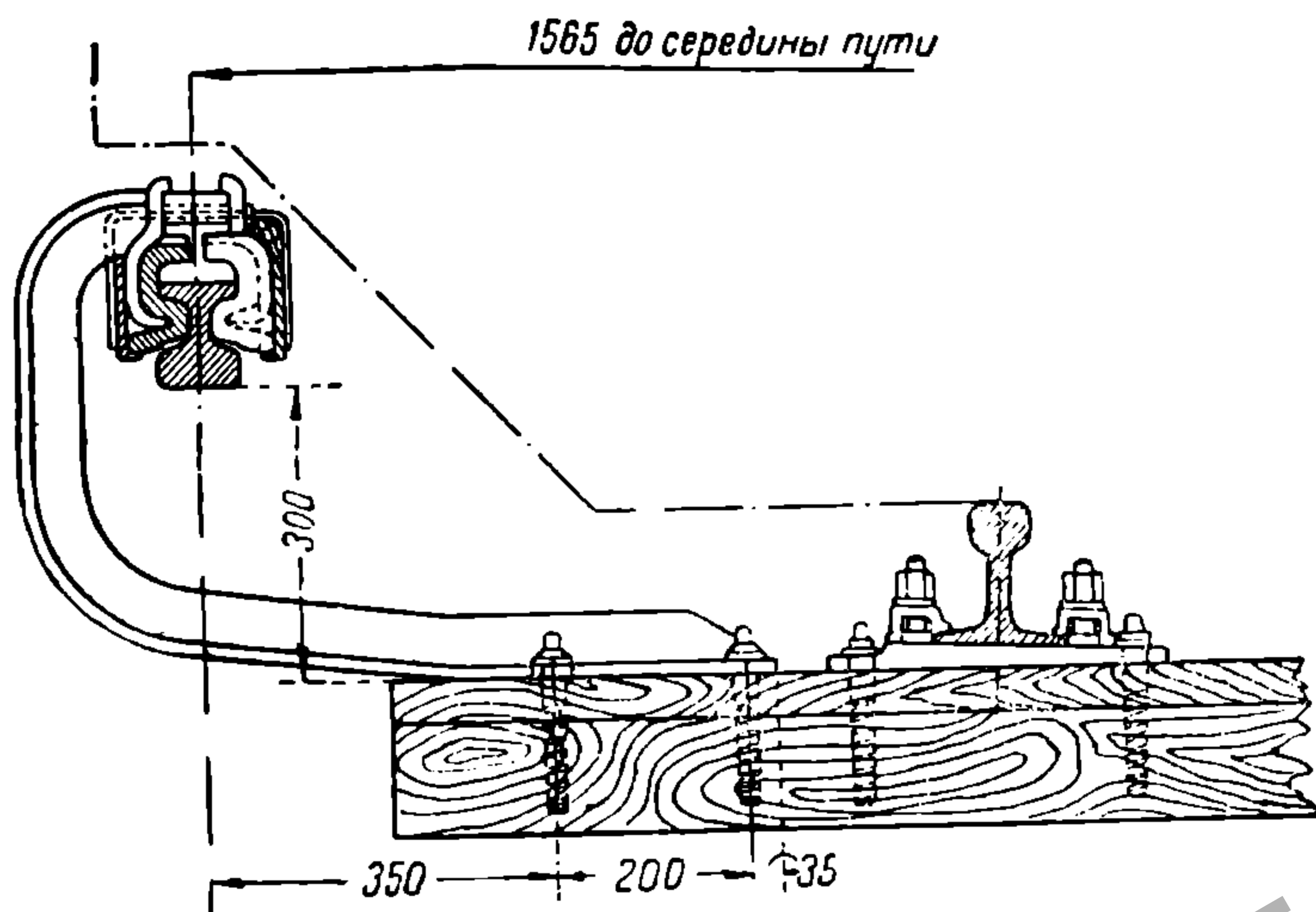


Рис. 36. Укрепление третьего рельса Берлинских пригородных железных дорог.

от назначения жел. дороги, имеет следующие значения: 600, 800, 1200, 1500, 2000, 2400, 3000 и 4800 вольт. Напряжение 600 в существует преимущественно на трамвайных линиях,—800, 1200 и 1500 вольт — на метрополитенных, пригородных и отчасти

магистральных электрических жел. дорог и напряжения 2 000, 2 400, 3 000 и 4 800 вольт — преимущественно она магистральных жел. дор.¹ Контактная сеть на трамвайных линиях при системе постоянного тока напряжением 600 вольт осуществляется воздушной проводкой контактных проводов на опорах или гибких поперечинах.

На рис. 34 показано устройство консоли на опорах, а на рис. 35 — изоляция крепления рабочего контактного провода в местах подвешивания.

При напряжении 800, 1200 и 1500 вольт контактная сеть осуществ-

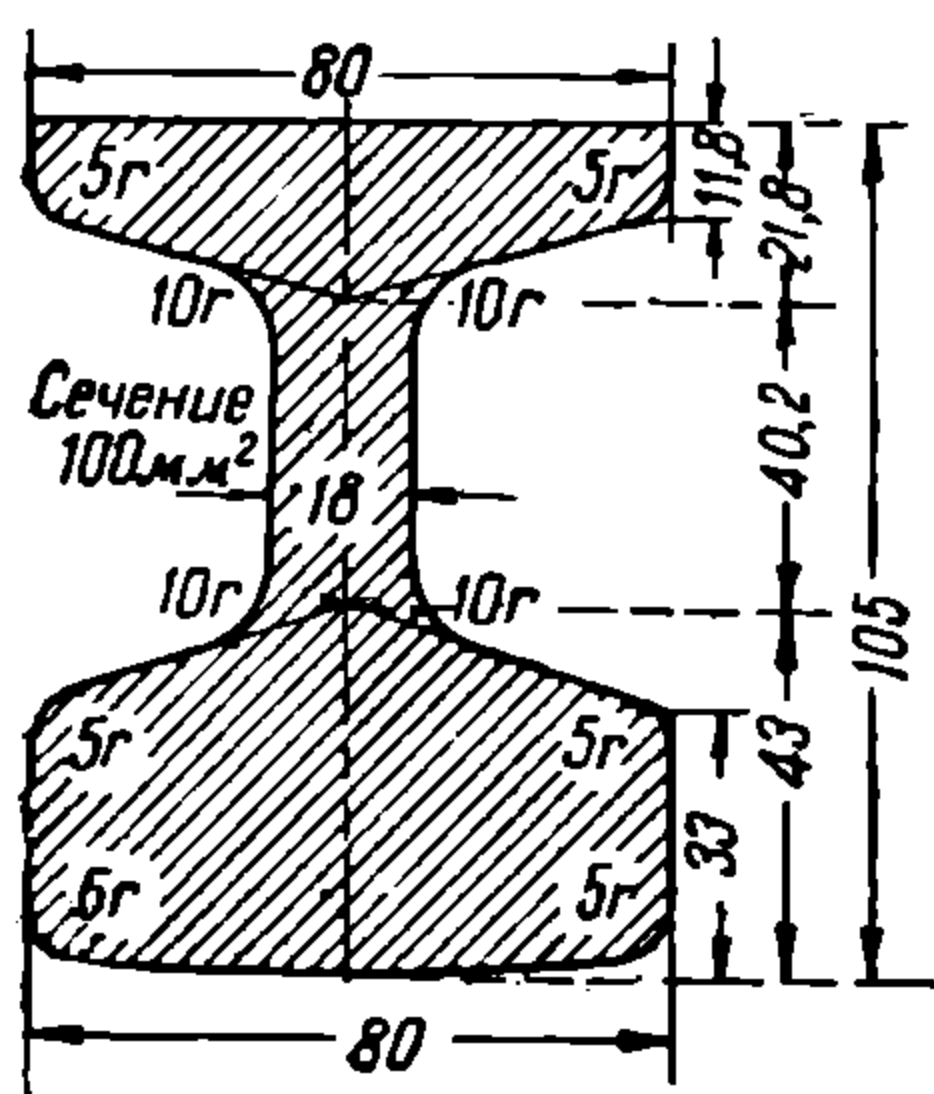


Рис. 37. Профиль третьего рельса Берлинских пригородных жел. дор.

ляется или воздушной проводкой на опорах, или, что имеет большое распространение в метрополитенах, но сравнительно редко на пригородных железных дорогах, — при помощи третьего рельса. На рис. 36 приведена схема укрепления третьего рельса на берлинских пригородных жел. дор., а на рис. 37 — профиль третьего рельса,

Контактная сеть магистральных жел. дорог при системе постоянного тока с напряжением 2 000, 2 400, 3 000 и 4 800 вольт осуществляется воздушной проводкой контактного провода на опорах. На рис. 38 приведена подвеска контактной сети на опоре при постоянном токе напряжением 3 000 в. на магистральных ж. д.

В тоннелях и под путепроводами, в силу стесненного габарита, рабочий контактный провод располагается на очень близком расстоянии от поддерживающего троса. Ввиду наличия сырости в тоннелях особенное внимание должно быть обращено на надежность изоляции. На рис. 39 приводится подвеска контактного провода в тоннеле жел. дор. Чикаго—Мильвоки—Сан-Поль, электрифицированной на системе постоянного тока.

Пример подвески сети под низким путепроводом на Пенсильванской жел. дор. приведен на рис. 40.

При системе однофазного тока пониженной частоты 15, $16\frac{2}{3}$ и 25 пер/сек напряжения в контактном проводе существуют следующих значений: 3 300, 6 600, 11 000 и 15 000 вольт. Вследствие того, что при системе однофазного тока напряжение выше, чем при постоянном, сечение контактных проводов значительно меньше. Необходимость в подвешивании дополнительных проводов — фидеров в целях увеличения сечения проводов (что имеет место при постоянном токе) в этом случае отпадает. Устройство контактной сети осуществляется также воздушной проводкой на опорах.

¹ При электрификации пригородного участка ж. д. Делавейр — Лакаванна в 1930 г. принята система постоянного тока напряжением 3 000 вольт.

На рис. 41 приведено устройство при однофазном токе контактной сети на однопутных жел. дор. Германии.

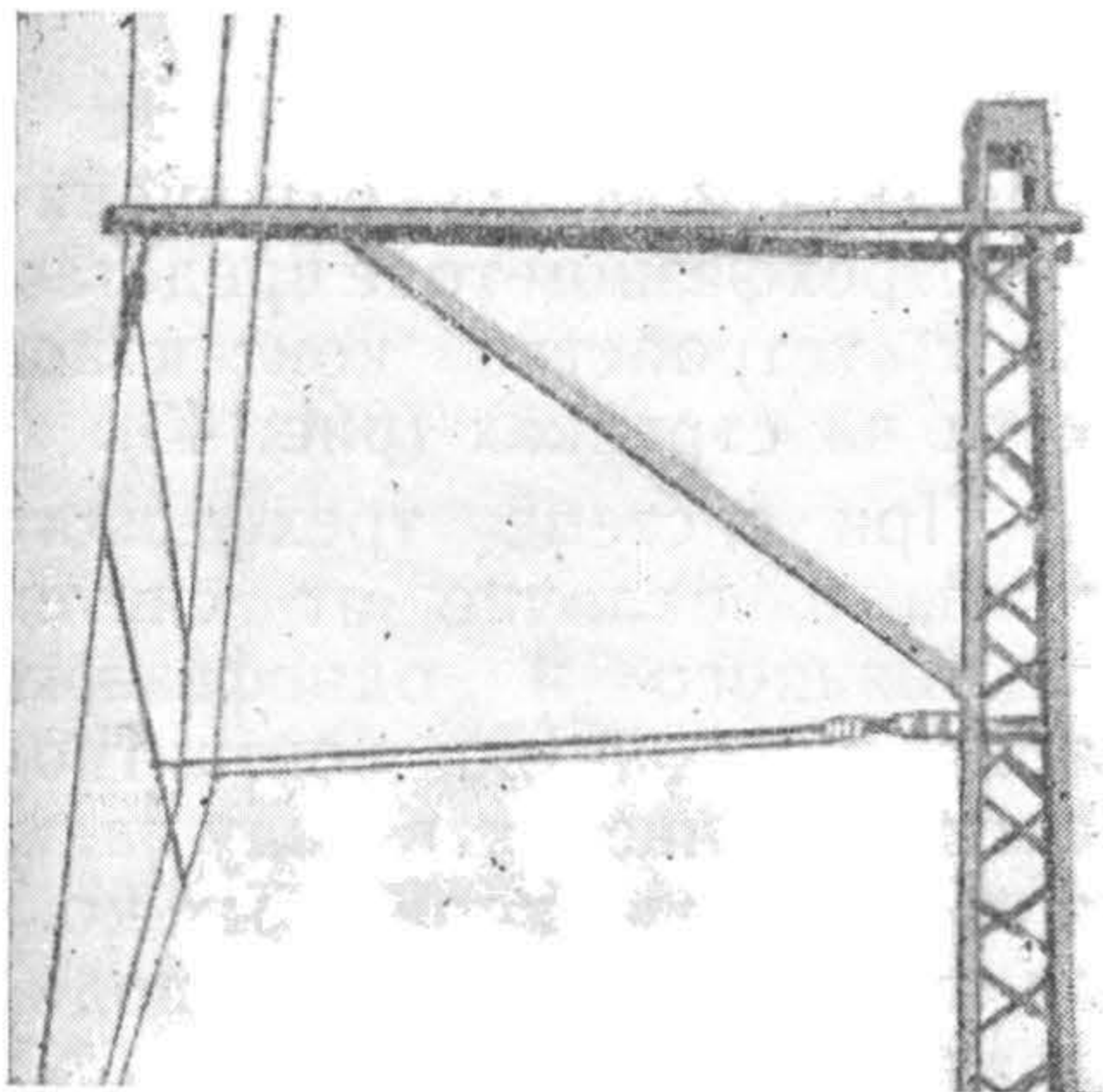


Рис. 38. Подвеска контактной сети на опоре на электрифицированном участке Сталини — Зестафони Закавказских ж. д.

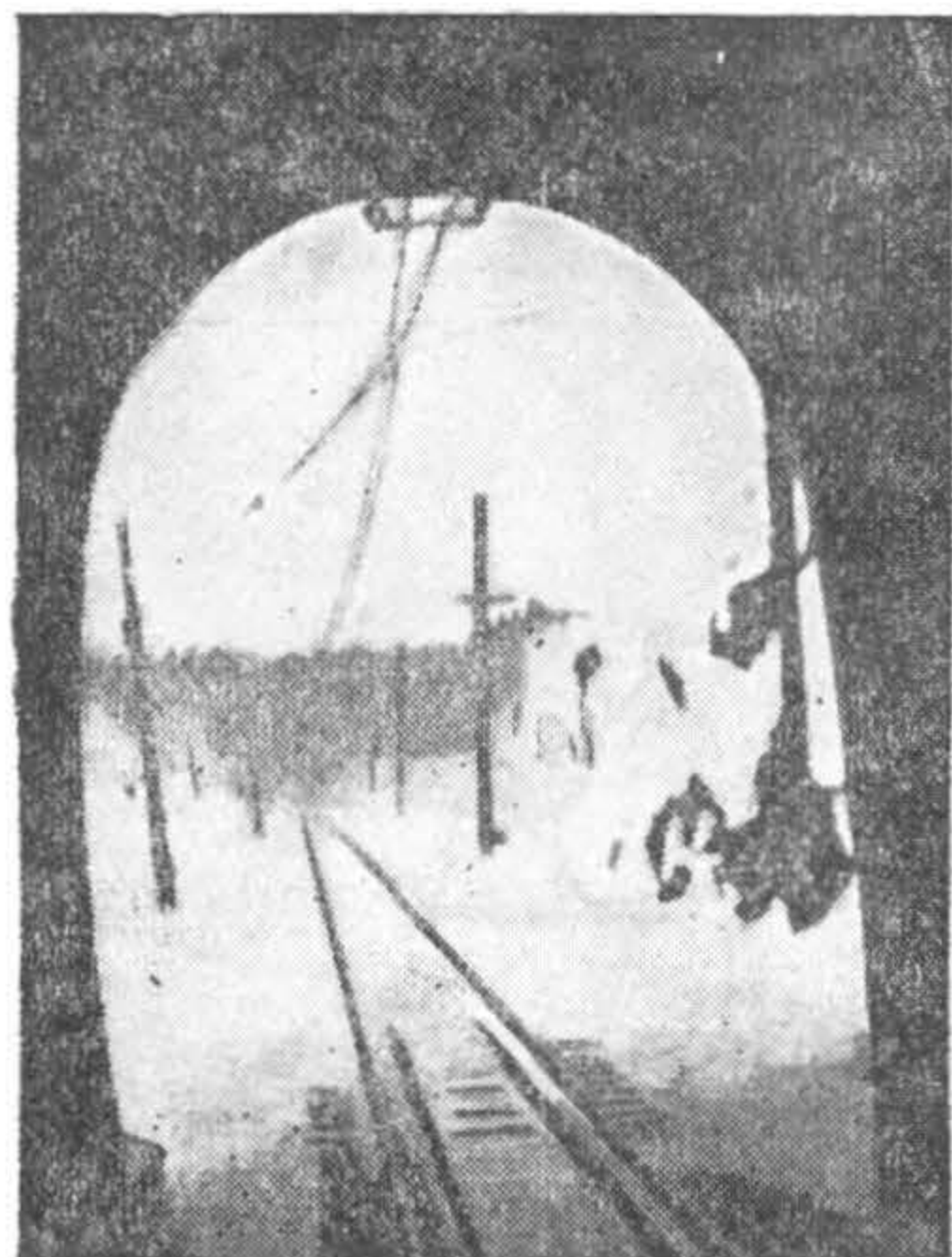


Рис. 39. Тоннель на ж. дор. Чикаго—Мильвоки—С-Поль. Перед тоннелем сделано секционирование контактной сети.

Контактная сеть жел. дор. при системе трехфазного тока с частотой 15, $16\frac{2}{3}$ и 45 *пер/сек* осуществляется при напряжении 3 000, 3 600 и 10 000 вольт. При системе трехфазного тока, вследствие

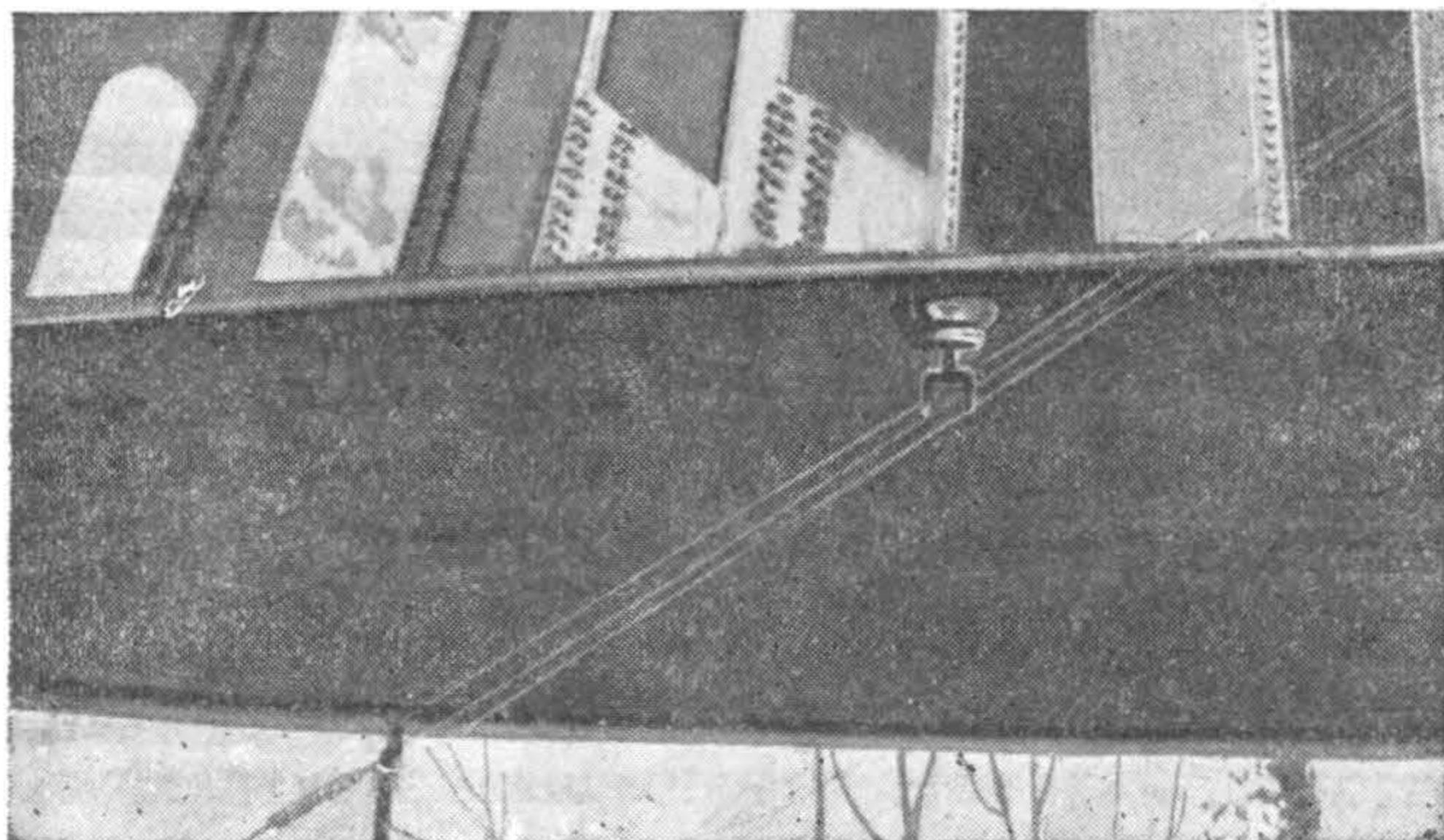


Рис. 40. Подвеска контактной сети под низким путепроводом на Пенсильванской жел. дор.

необходимости в тщательной и надежной изоляции проводов для каждой фазы, конструкция контактной сети получается сложной и дорогой как в отношении строительной стоимости, так и в отноше-

нии эксплуатационных расходов. При этой системе тока должны быть два контактных провода, по одному проводу на фазу. Для третьей фазы в качестве провода служат рельсы. Схема устройства контактной сети при системе трехфазного тока на итальянских жел. дор. приведена на рис. 42.

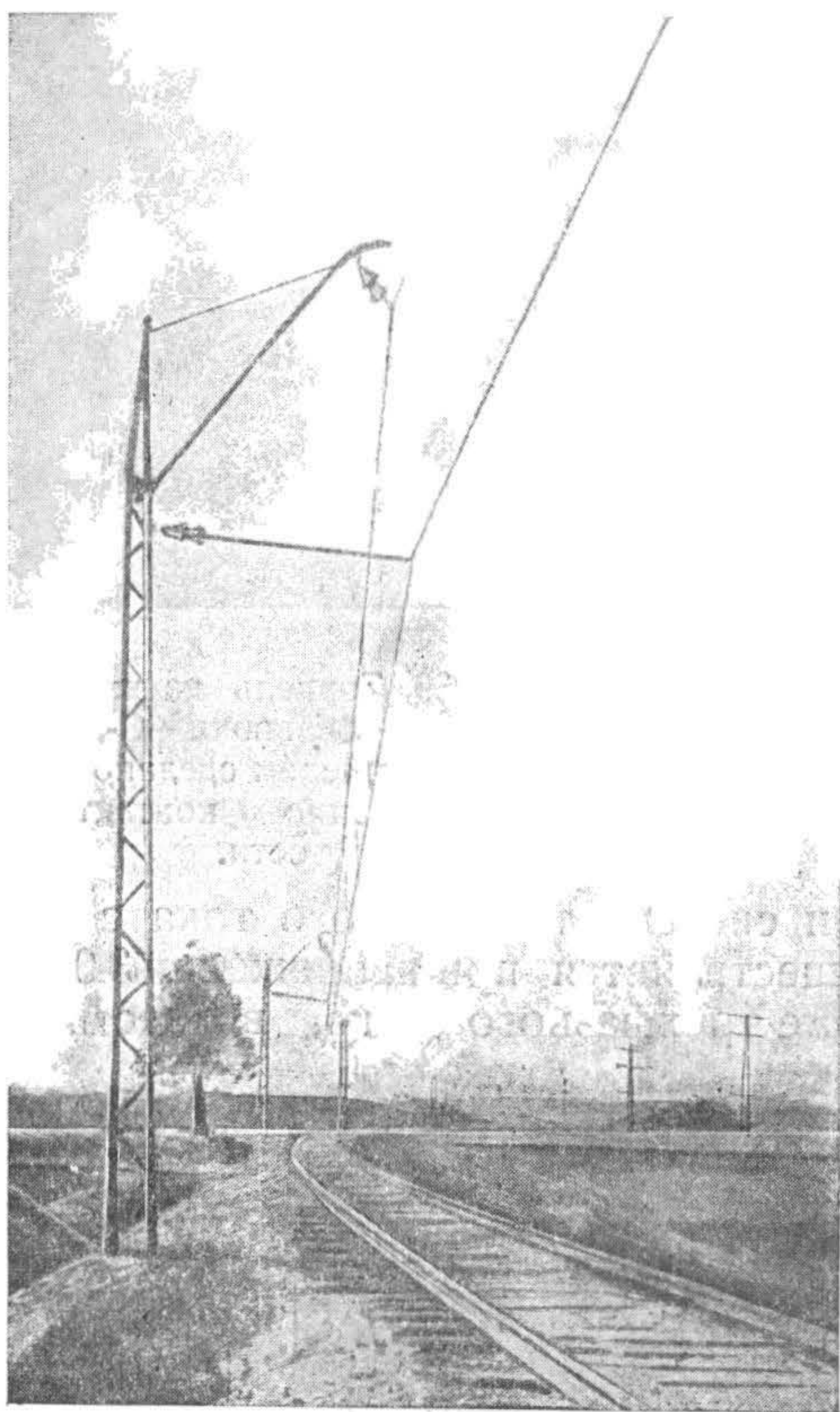


Рис. 41. Устройство контактной сети на однопутных ж. д. Германии.

Наибольшие трудности в конструктивном отношении при трехфазном токе представляет устройство контактной сети на стрелках (рис. 43).

При системе трехфазного тока, в отличие от систем постоянного и однофазного тока, устройство контактной сети в тоннелях в силу наличия двух изолированных контактных рабочих проводов значительно осложняется.

На рис. 44 приводится схема устройства рабочего провода в тоннелях при трехфазном токе 3300 вольт.

Коэффициенты полезного действия контактной сети зависят от принятых допустимых падений напряжений при расчете сечения проводов. Чем выше напряжение в контактной сети, тем относительно больше коэффициент полезного действия контактной сети. Коэффициенты полезного действия контактной сети в среднем могут быть приняты при постоянном токе — 0,90, однофазном — 0,96 и трехфазном — 0,95.

§ 7. Электровозы

Пунктом потребления электрической энергии и превращения ее в механическую, создающим движение электровоза, являются установленные на нем электродвигатели. От контактного провода электрическая энергия через пантограф поступает в электродвигатели. Образующийся на валу якоря электродвигателя вращающий момент через механическую передачу передается на ведущие оси электровоза.

На электровозе для снятия тока с контактного провода и передачи его электродвигателям устанавливаются два токособираателя —

называемых пантографами. В рабочем состоянии преимущественно бывает поднят один пантограф. Поднятие и опускание пантографов производится обычно сжатым воздухом. На рис. 45 изображен общий вид Сурамского электровоза с одним поднятым пантографом.

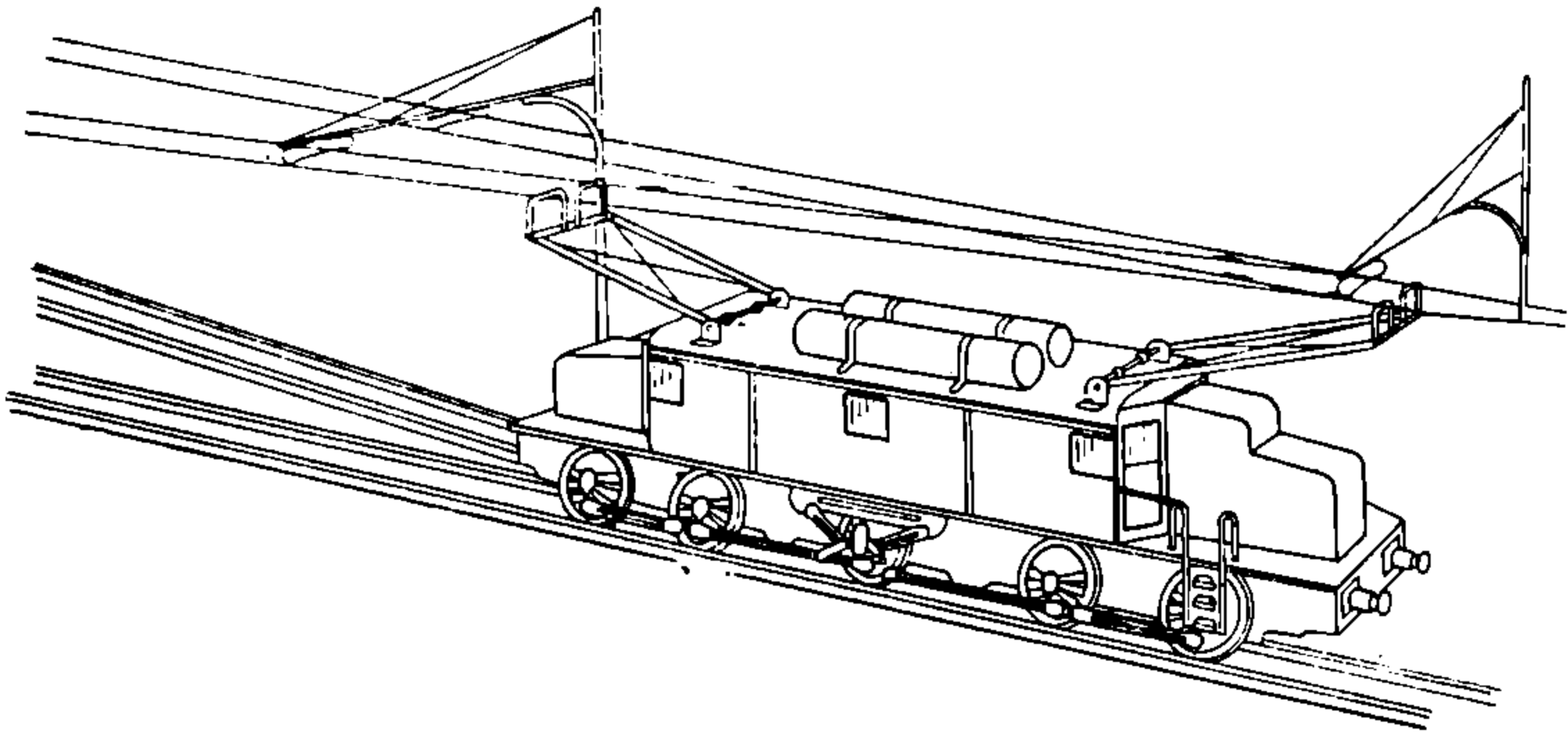


Рис. 42. Типовая подвеска контактной сети при трехфазном токе на Итальянских ж. д.

При системе трехфазного тока конструкция пантографов усложняется, вследствие необходимости снимать ток с двух изолированных друг от друга контактных проводов. Конструкция пантографа при трехфазном токе видна на приведенных выше рис. 42 и 43.

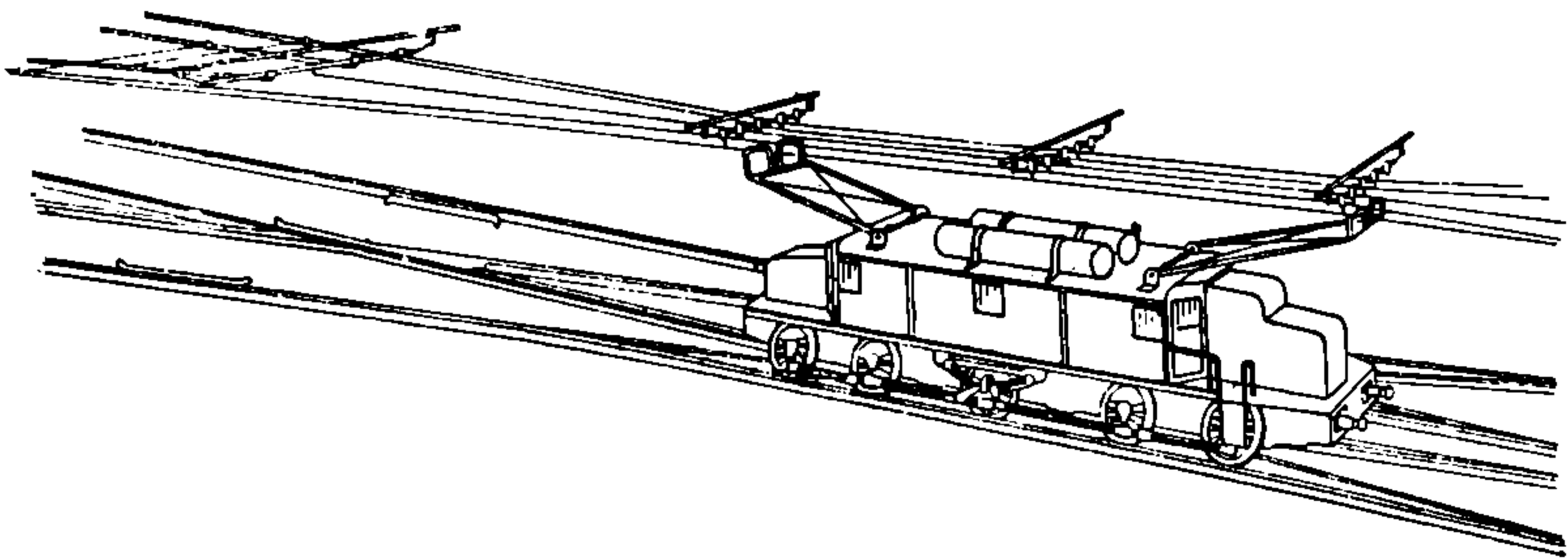
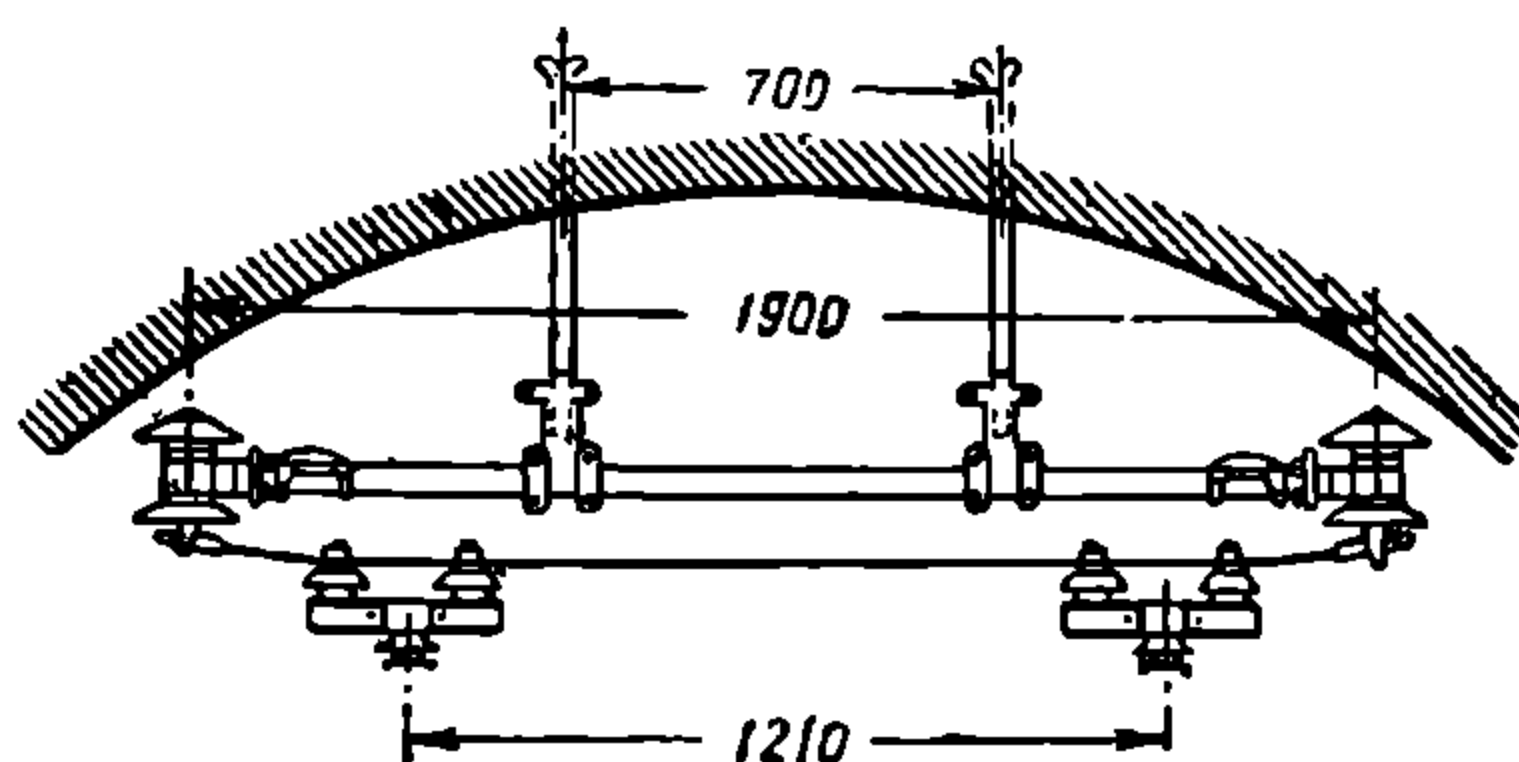


Рис. 43. Устройство контактной сети на стрелках на Итальянских ж. д.

В зависимости от системы тока в контактном проводе и в электродвигателях, электровозы разделяются на следующие типы: электровозы постоянного тока, однофазного тока, трехфазного тока или, при разных системах тока в контактном проводе и в электродвигателях, электровозы смешанных систем (однофазно-трехфазного тока или однофазно постоянного тока). Электровозы постоянного тока имеют электродвигатели той же системы тока, но с напряжением на зажимах или равным напряжению в контактном проводе (что может иметь место при напряжении до 1 500 вольт)

или меньшим в кратное число раз (по большей части 2 раза), в зависимости от способа рабочего соединения электродвигателей.

В СССР на электрифицированных магистральных жел. дорогах постоянного тока при напряжении в контактном проводе 3 000 вольт, напряжение на зажимах электродвигателей 1 500 вольт, вследствие чего в рабочем положении не менее 2-х электродвигателей соединены последовательно. Электровозы однофазного тока с частотой 15, $16\frac{2}{3}$ и 25 *пер/сек* имеют напряжение на зажимах электродвигателей в пределах от 300 до 600 вольт, т. е. в несколько раз меньше напряжения в контактном проводе. Вследствие этого на электровозах однофазного тока устанавливаются трансформаторы для понижения напряжения.



Фиг. 44. Устройство рабочего провода в тоннелях. Трехфазный ток 3 300 вольт.

Электровозы трехфазного тока имеют напряжения на зажимах электродвигателей трехфазного тока с частотой 15, $16\frac{2}{3}$, 25 и 45 *пер/сек* в пределах от 900 до 3 600 вольт.

При напряжении в контактном проводе больше 3 600 в на электровозах устанавливаются трансформаторы для понижения напряжения.

Электровозы системы однофазно-трехфазного тока или так называемые системы расщепленной фазы при однофазном токе в контактном проводе с напряжением 11 000 — 15 000 вольт и частотой 25 *пер/сек* имеют электродвигатели трехфазного тока с напряжением 750 в той же частоты. Электровозы этого типа имеются в Америке на жел. дор. Norfolk and Western Ry.

Однофазный ток, напряжением 11 000 вольт в контактом проводе, снимаемый пантографом, проходит через масляный выключатель и поступает в трансформатор, понижающий напряжение до 750 вольт. Вторичная обмотка трансформатора питает конвертор фаз, преобразующий однофазный ток в трехфазный той же частоты (25 периодов в секунду), которым питаются статоры тяговых электродвигателей.

Сравнение коэффициентов полезного действия электровозов системы однофазно-трехфазного тока и системы постоянного тока приведено ниже в таблице 5, заимствованной из статьи А. Camier

«Electrification de chemins de fer francais et l'experience americaine ,
Technique Modern 1921, стр. 167.

Таблица 5

Система тока	Однофазно-трех- фазный		Постоянный высо- кого напряжения	
	На пло- щадке	На под'- еме	На пло- щадк	На под'- еме
Характер профиля				
Мотор с зубчатой передачей	86,0	89,3	86,0	89,3
Вентиляторы . . .	95,8	97,8	95,9	97,9
Пусковые реостаты	98,0	98,6	99,4	99,2
Преобразование фаз	94,7	96,3	—	—
Трансформаторы	97,0	98,0	—	—
Поправка на неравномерность диаметра ведущих колес	98,0	98,0	—	—
Поправка на вес электровоза (по срав- нению с электровозом постоянного тока)	97,0	98,0	—	—
Общий коэф. полезного действия . .	70,5%	75,7%	82,0%	86,6%

Электровозы системы однофазно-постоянного тока с однофазным током в контактном проводе и постоянным током в тяговых электродвигателях, получают его от мотор-генератора, установленного на электровозе. Для понижения напряжения, подводимого к мотор-генератору, на электровозе имеется трансформатор. Мотор-генератор, установленный на электровозе и состоящий из синхронного мотора и двух генераторов, преобразовывает переменный ток в постоянный, который и направляется к тяговым электродвигателям, соединенным по-парно последовательно, с напряжением каждый 750 вольт. Электровозы этого типа, построенные фирмой Джeneral Электрик К-о, применены в Америке на Великой Северной жел. дор. (Great Northern Railway), где напряжение в контактной сети принято 11 000 вольт при частоте 25 *пер/сек*.

Фирмой Броун-Бовери в настоящее время разрабатывается электровоз с серийной тяговой характеристикой с безколлекторными вентильными двигателями, коллекторы которых заменены ртутными преобразователями. На электровозе имеется комплект ртутных выпрямителей (три группы по два преобразователя на все 6 электродвигателей).

Кроме электровозов указанных систем тока представляют интерес с технической и экономической сторон следующие типы электровозов: электровозы системы Кандо и электровозы системы Пунга-Шен; оба при системе однофазного тока нормальной частоты 50 *пер/сек* в контактном проводе. Электровоз системы Кандо получает энергию от контактной сети однофазного тока 50 *пер/сек*

при напряжении 15 000 вольт. Электровозы этого типа, выполненные фирмами Ганц и Метро-Виккерс для венгерских ж. д., имеют групповой привод от одного двигателя мощностью 1840 *квт*. На электровозе находится фазопреобразователь, объединяющий собой и трансформатор и преобразователь. Таким образом на электровозе системы Кандо нет в отдельности трансформатора и преобразователя.

Электровозы системы Пунга-Шен, находящиеся в эксплуатации пока лишь на угольных разработках в Германии, имеют два

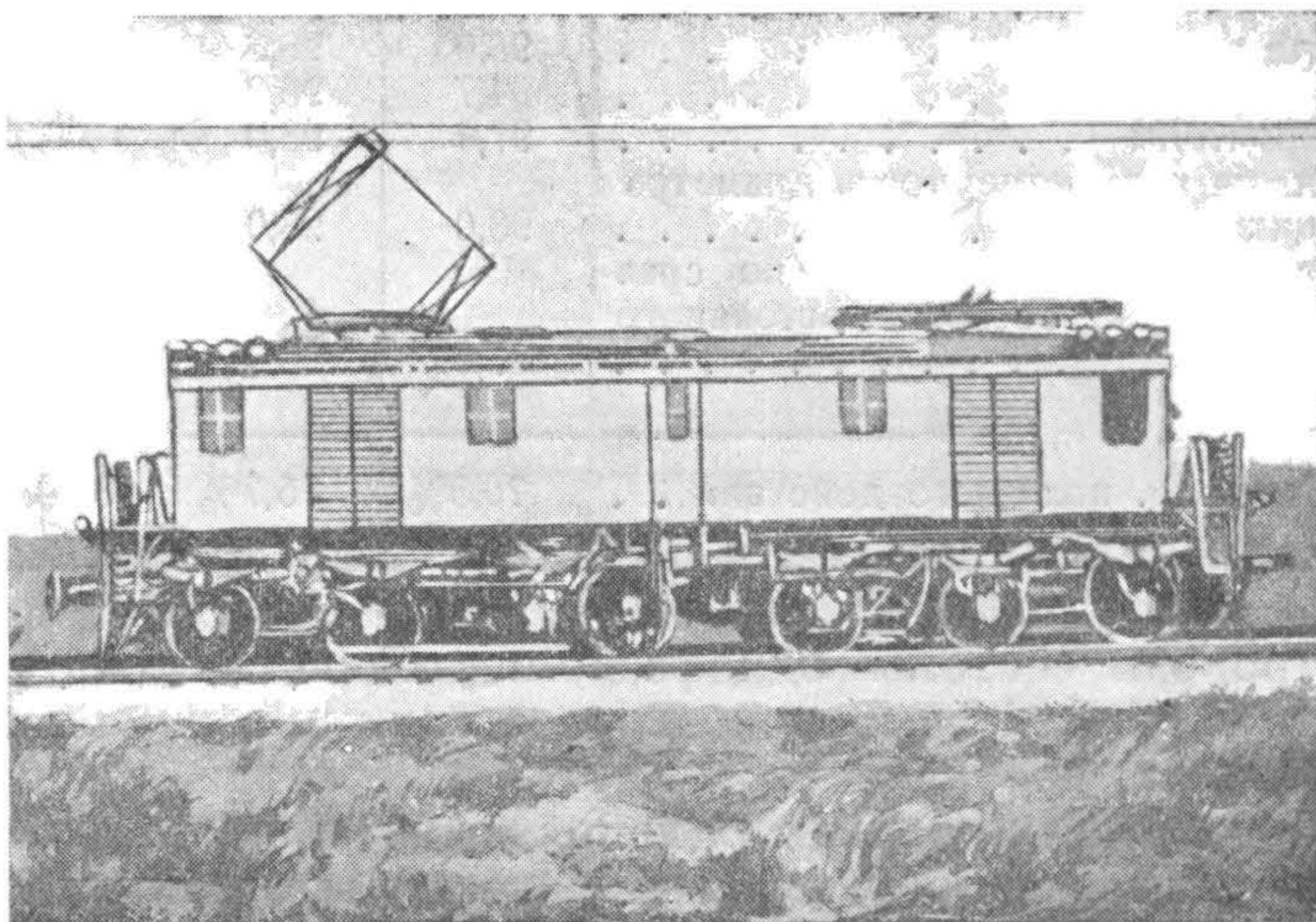


Рис. 45. Общий вид Сурамского электровоза типа С-10.

электродвигателя, из которых один нормальный трехфазный, а другой — однофазный системы Пунга-Шен с промежуточным ротором. Напряжение в контактной сети 3 000 вольт. При большем напряжении в контактной сети вызывается необходимость в установке на электровозе трансформатора. Электровозы системы Кандо и Пунга-Шен обладают так называемой шунтовой тяговой характеристикой.

С развитием и усовершенствованием проектируемых в настоящее время в качестве агрегатов на подстанциях ионных преобразователей, представляет интерес осуществление электровозов с такими преобразователями. При постоянном токе высокого напряжения до 20 000 вольт в контактном проводе, эти электровозы, по данным расчетов Научно-исследовательского института электрификации жел. дор. обещают дать значительные технико-экономические преимущества по сравнению с другими типами электровозов.

В отношении системы механической передачи усилий от электродвигателей на ведущие скаты, электровозы, независимо от системы тока, разделяются на следующие типы:

а) электровозы с непосредственной передачей усилий от электродвигателей на ведущие скаты;

б) электровозы с зубчатой передачей: эластичной и неэластичной;

в) электровозы с шатунной передачей.

Электровозы с непосредственной передачей усилий отличаются простотой конструкции и бывают двух видов: с якорем, насаженным непосредственно на ось (рис. 46), и с якорем, насаженным на полую ось, внутри которой проходит ось ската электровоза (рис. 47а и 47б).

Электровозы с непосредственно насаженными якорями электродвигателей на движущие оси, вследствие отсутствия потерь в передаче усилий, имеют более высокий коэффициент полезного действия по сравнению с другими электровозами. Эта передача применялась преимущественно для электровозов постоянного тока

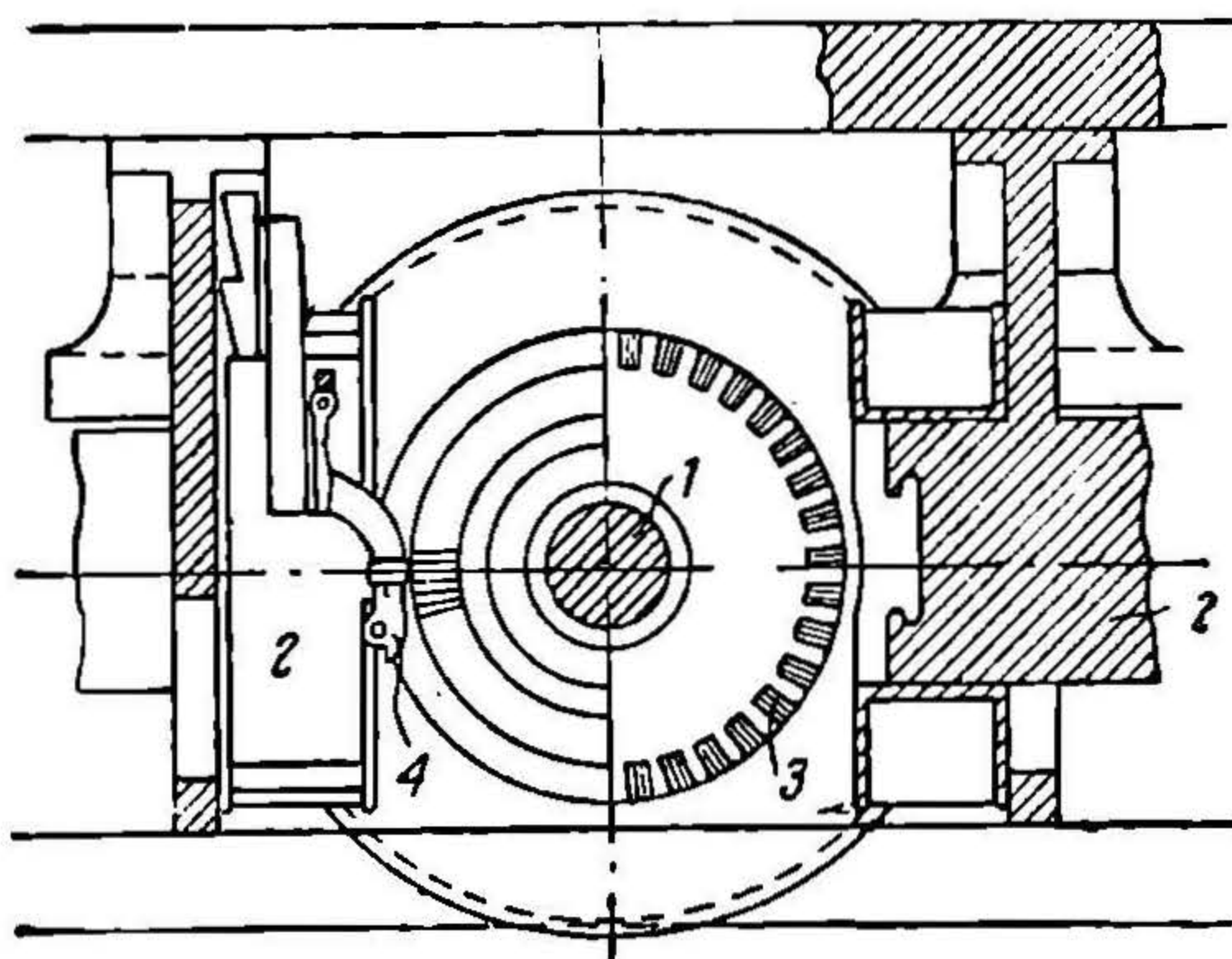


Рис. 46. Схема непосредственной насадки якоря на ведущую ось ската.

1—ведущая ось ската, 2—полюс, 3—якорь, 4—щеткодержатель.

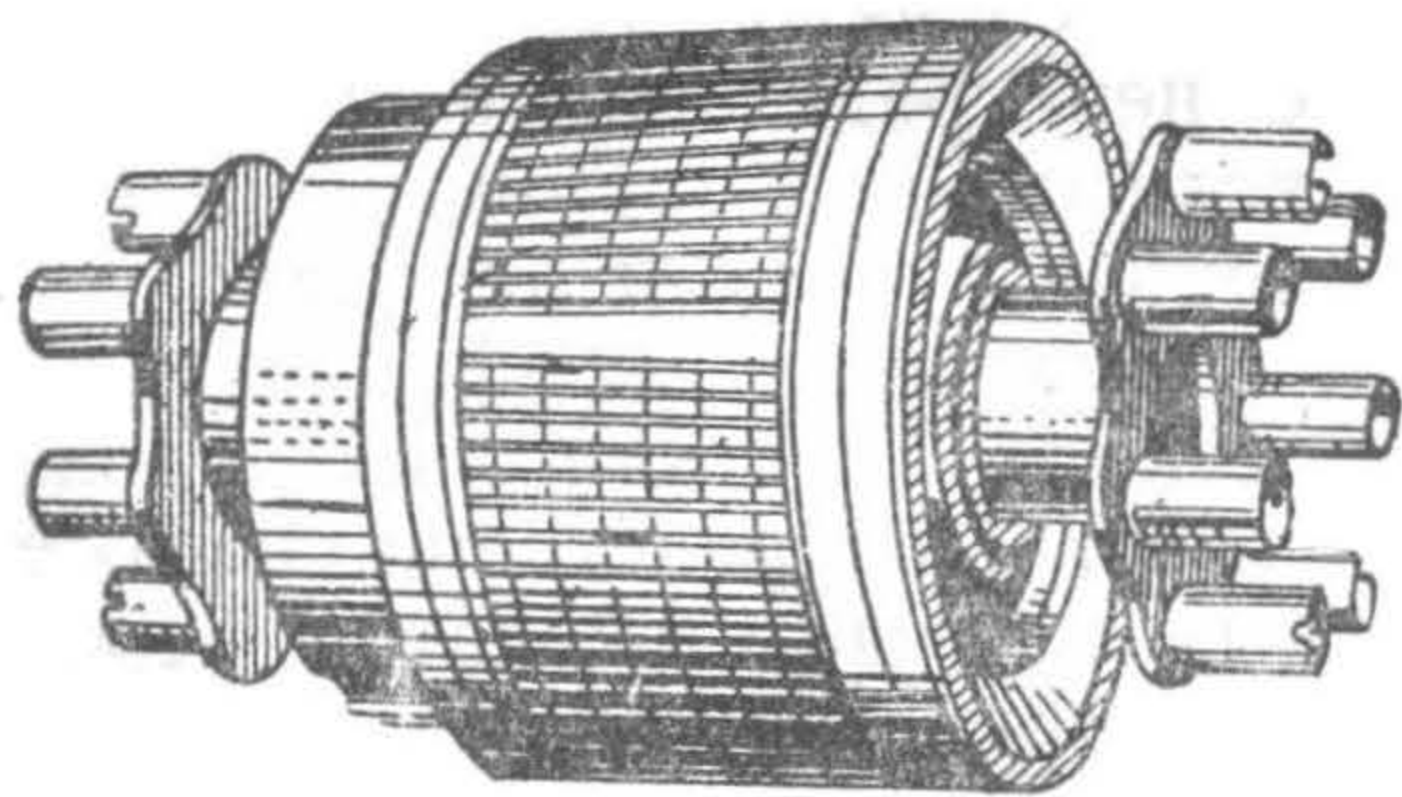


Рис. 47а. Якорь с полым валом. Жел. дор. Нью-Йорк, Нью-Гавен и Гартфорд.

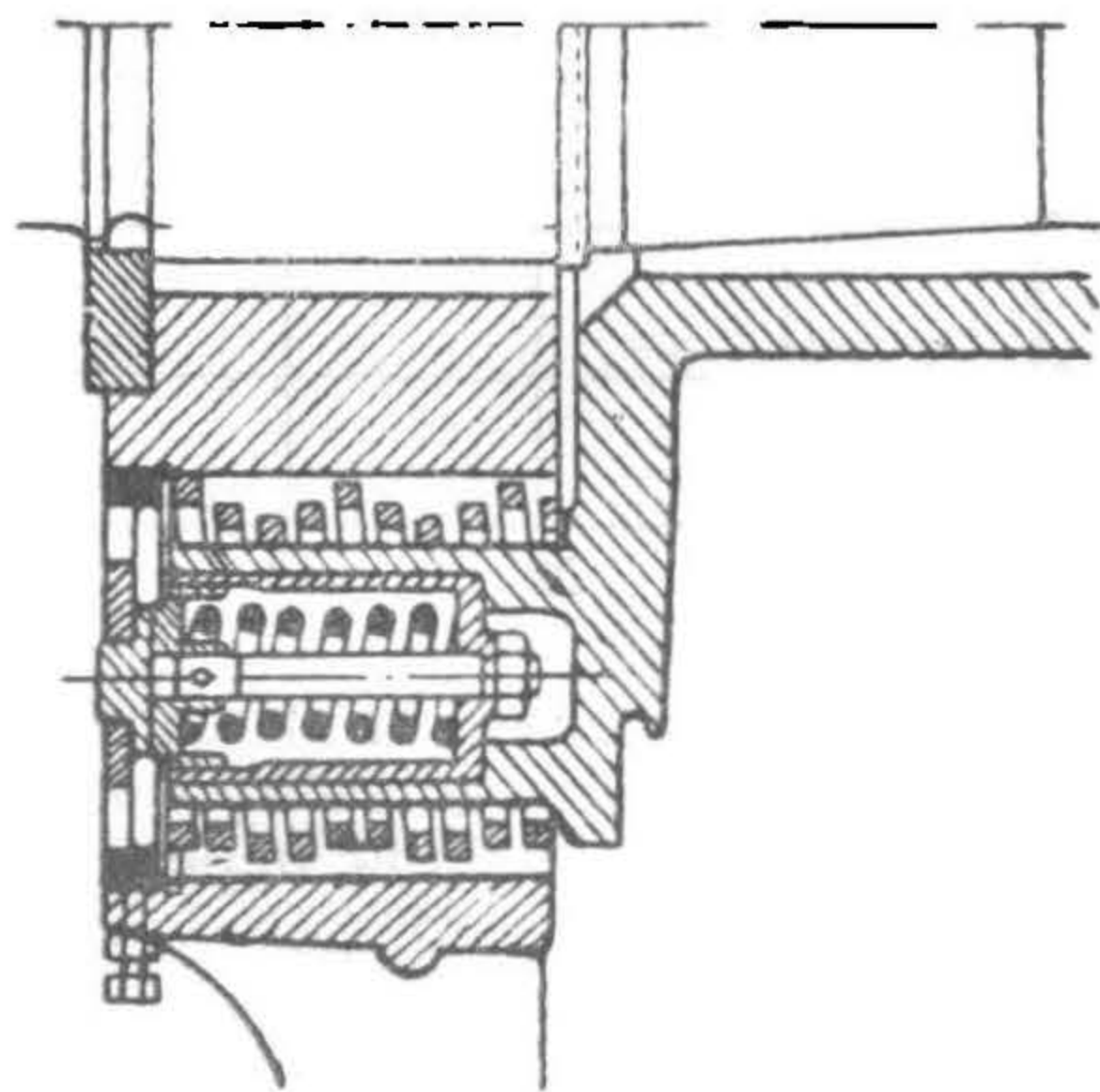


Рис. 47б. Упругое соединение поллой оси с движущей осью.

и главным образом для пассажирской службы, но ввиду удорожания стоимости электровоза по сравнению с другими системами передачи (зубчатой и шатунной) большого распространения не получила.

Для сравнения стоимости электровозов с непосредственной передачей и с зубчатой, в таблице 6 приводятся данные об электровозах жел. дор. Chicago, Milwaukee and St.-Paul.

Таблица 6

Система передачи усилий	Часовая мощность в л. с.	Общий вес электровоза в амер. тоннах	Вес электрической части	Стоимость в американских долларах
Непосредственная передача с якорями, насаженными на ось	3 240	236,4	106,6	205 000
Зубчатая передача (моторы, близнецы) и полый осью	4 000	241,0	109,8	192 000

Стоимость электровоза с зубчатой передачей, несмотря на несколько больший общий вес электровоза меньше потому, что в весе электрической части у электровозов с непосредственной передачей вес меди составляет 30 т, а при зубчатой передаче— всего лишь 11 т.

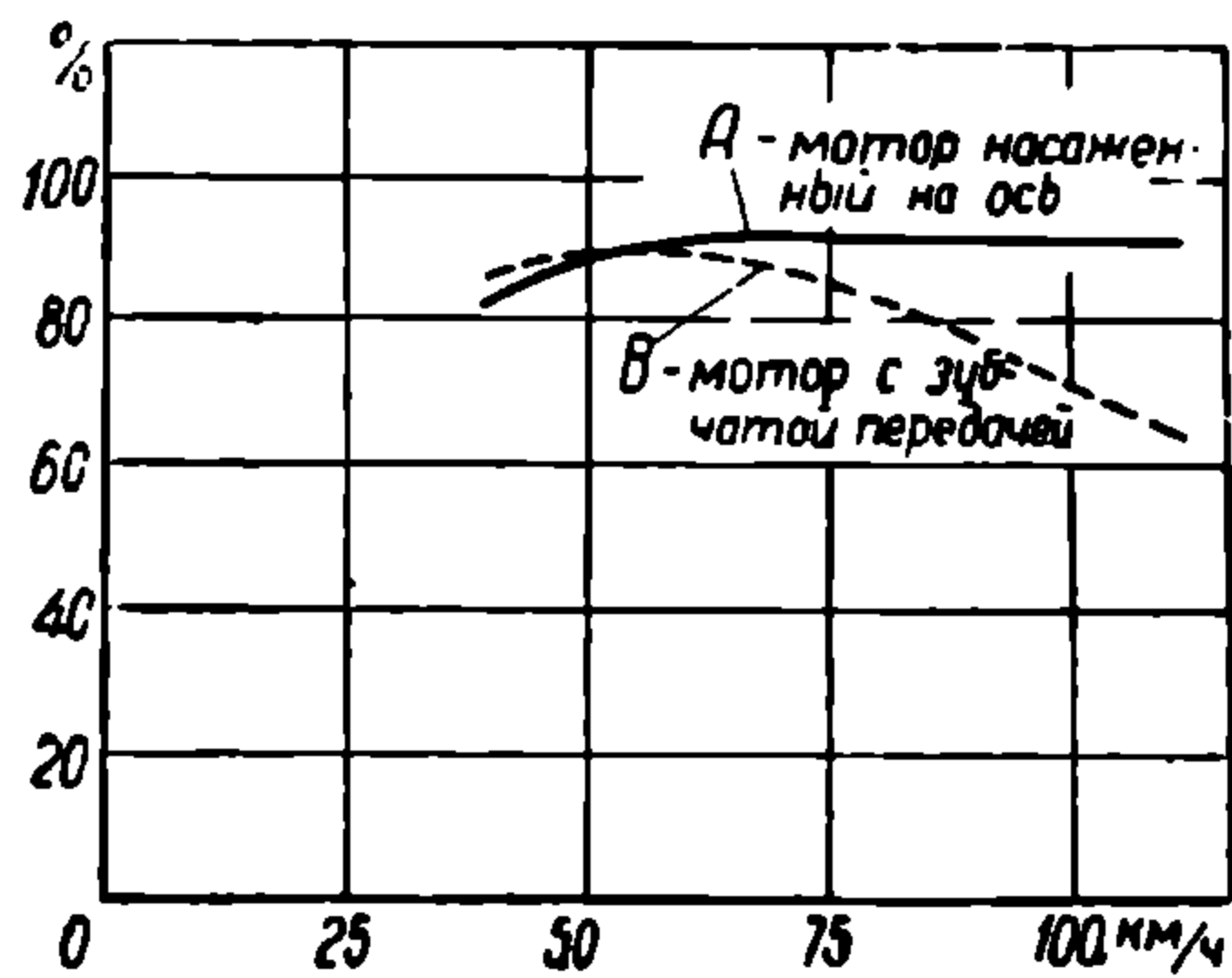


Рис. 48. Сравнение к. п. д. электродвигателей непосредственно насаженных на ось (А) с зубчатой передачей (В).

Электровозы с зубчатой передачей по сравнению с электровозами с непосредственной передачей отличаются тем, что электродвигатели первых имеют большое число оборотов, что уменьшает вес электродвигателей и удешевляет их стоимость.

Коэффициент полезного действия электровозов с зубчатой передачей ниже, чем электровозов с непосредственной передачей, вследствие дополнительных потерь в зубчатой передаче.

Сравнение коэффициента полезного действия электродвигателей, непосредственно насаженных на ось с зубчатой передачей, приводится на рис. 48

Зубчатая передача на электровозах применяется в трех видах:
а) при трамвайной подвеске электродвигателей,
в) при расположении электродвигателей над осями,
с) при системе передачи Buchli.
Зубчатая передача с электродвигателями трамвайного типа получила наиболее широкое распространение на электровозах постоянного тока как товарных, так и пассажирских. На американской жел. дороге Butte Anaconda and Pacific Railway

все товарные и пассажирские электровозы с указанной передачей. Эта же передача применена на большинстве электровозов жел. дор. Chicago—Milwaukee—St. Paul. В СССР, в электровозах, построенных по заказу в Америке фирмой General Electric-С⁰ и в электровозах типа ВЛ, построенных заводом Динамо, находящихся на электрифицированных участках Пермской жел. дор. и Закавказской жел. дор., применена зубчатая передача при трамвайной подвеске электродвигателей.

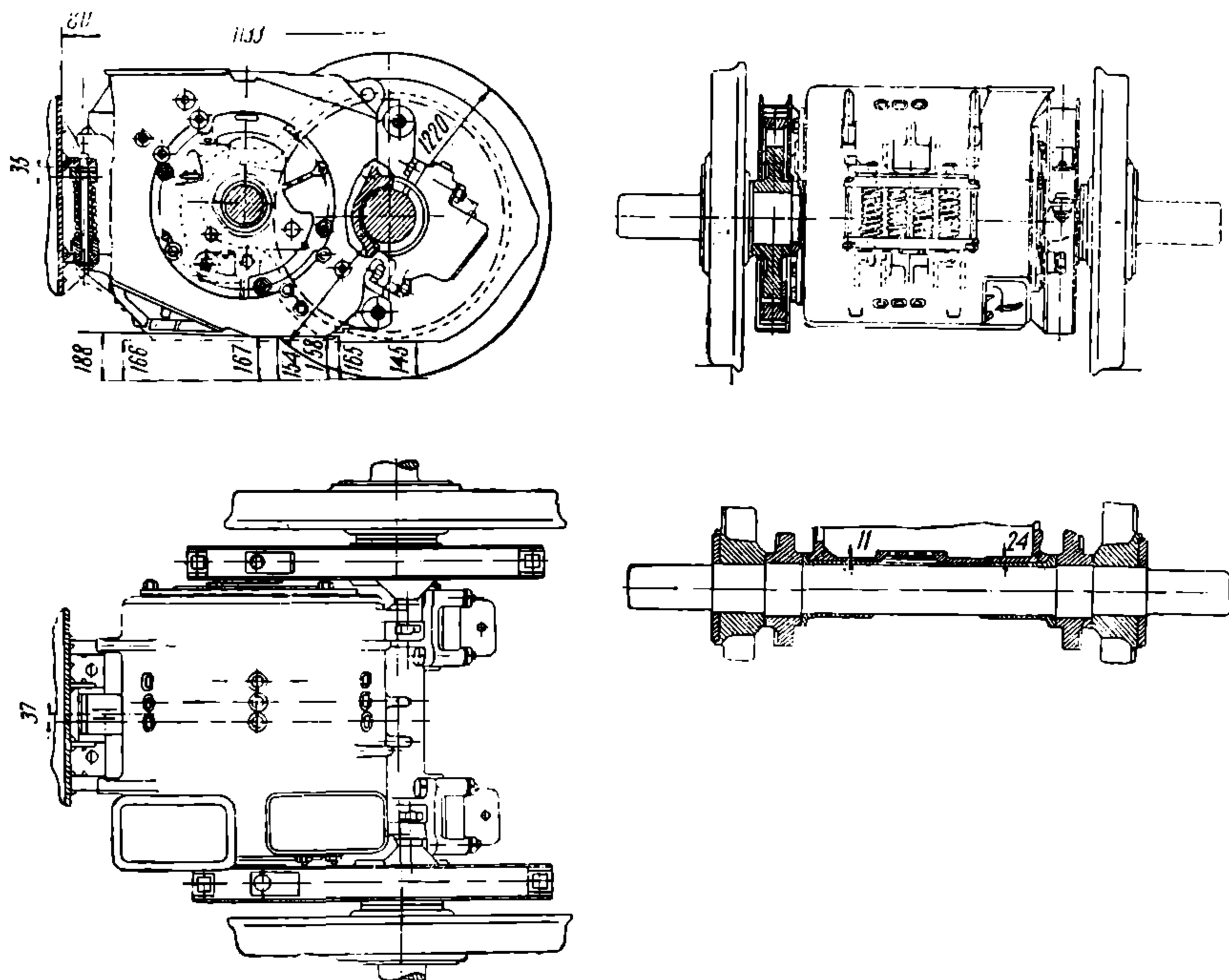


Рис. 49. Расположение электродвигателя ДПЭ-340 с эластичной зубчатой передачей на оси ската электровоза ВЛ-19 (трамвайный тип подвески).

Недостатком подвески трамвайного типа является значительный вес электродвигателей, передающийся непосредственно на ведущие оси, что вызывает перегрузки при неровностях в рельсовой колеи. Благодаря неправильности пути получается перенапряжение о зубчатых колесах. Для уменьшения влияния перенапряжения, передачу делают эластичной, путем устройства дополнительных конструктивных элементов.

Как при непосредственной передаче усилий, так и зубчатой трамвайного типа мощность электродвигателей электровоза ограничивается размерами движущихся колес. Для увеличения общей

мощности применяются электродвигатели-близнецы, располагаемые над осью электровоза. Схема расположения электродвигателей-близнецов приведена на рис. 50.

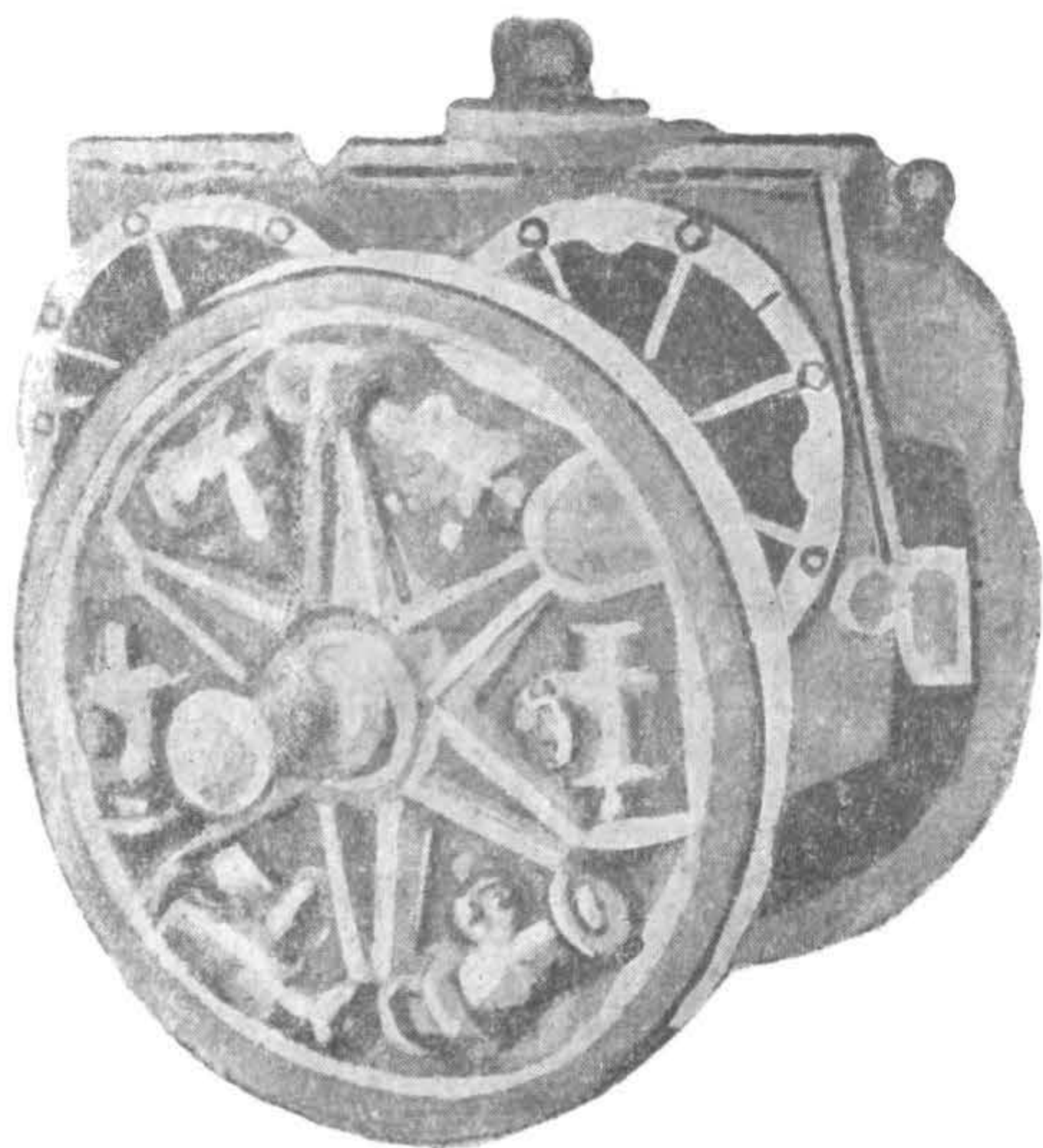


Рис. 50. Электродвигатели-близнецы завода AEG.

Электровозы с электродвигателями над осью, давая возможность увеличить мощность электродвигателей, имеют еще и другие преимущества, как то: повышение центра тяжести наддрессорного строения электровоза, уменьшение расстояния между движущимися осями, следовательно, уменьшение длины и веса электровоза, а также создается улучшение в эксплуатационном отношении — более доступный осмотр и ремонт электродвигателей. Электровозы с передачей Buchli отличаются тем, что зубчатые колеса выносятся наружу за ведущие колеса, что дает возможность более свободного расположения эле-

ктродвигателей и повышение центра тяжести электровоза. Схема передачи Buchli изображена на рис. 51.

В эксплуатационном отношении эта передача требует помимо высокого качества смазочного материала более тщательной смазки отдельных частей. Электровозы с непосредственной или зубчатой передачей называются электровозами с индивидуальными передачами, так как каждая ведущая ось имеет свой отдельный электродвигатель.

В том случае, когда число электродвигателей меньше, чем число ведущих осей, применяется шатунная передача.

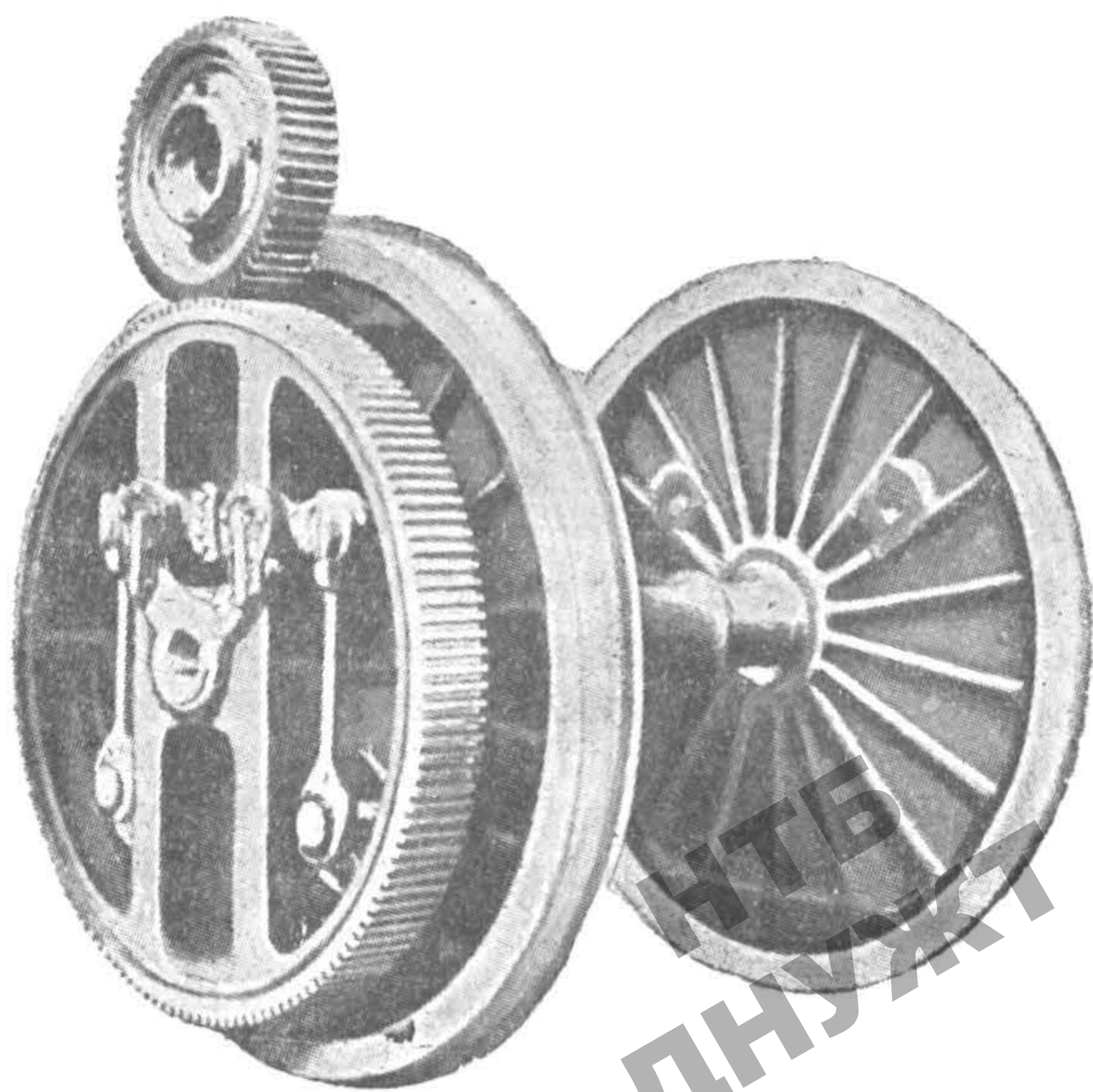


Рис. 51. Передача Buchli

При этой передаче ведущие скаты соединяются между собой спарниками. Электродвигатель, расположенный на раме электровоза, передает через отбойный вал усилия на сцепные оси или при помощи шатуна непосредственно или через посредство зубчатого колеса. В первом случае передача называется шатунной, во втором—шатунно-зубчатой. Эти передачи устраиваются у электровозов системы однофазного и трехфазного тока. Схема шатунной передачи приведена на рис. 52, а шатунно-зубчатой — на рис. 53.

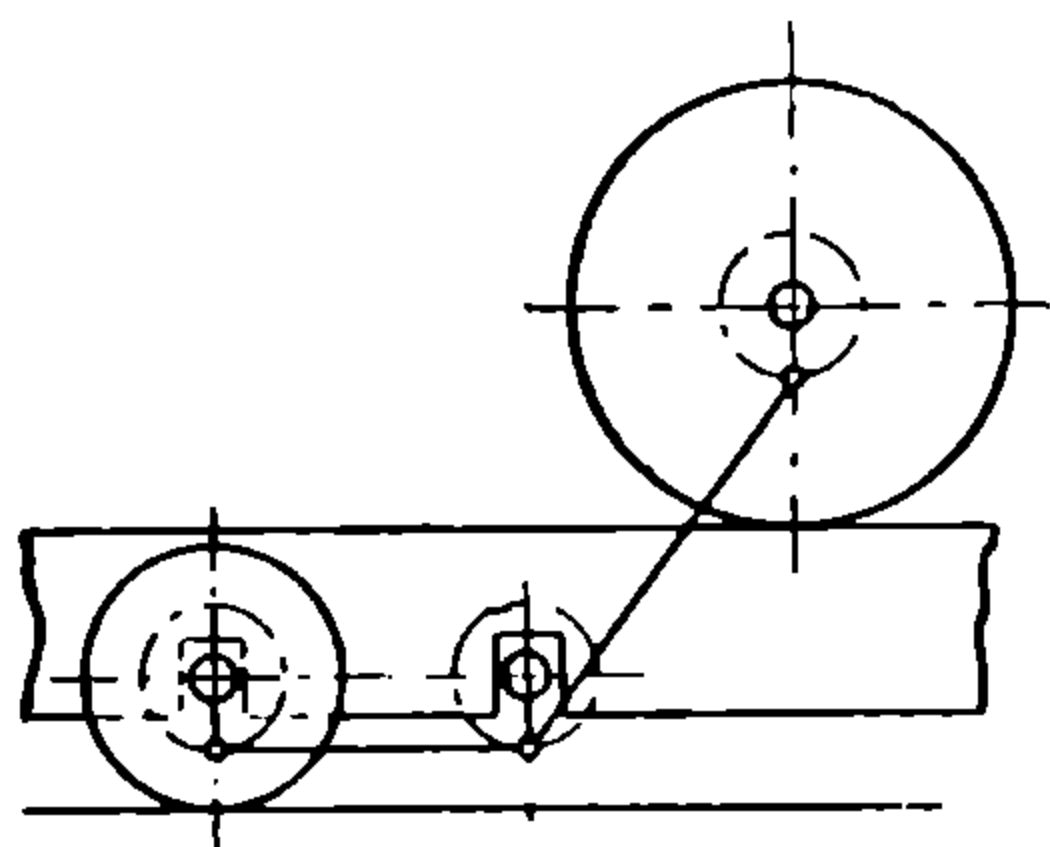


Рис. 52.

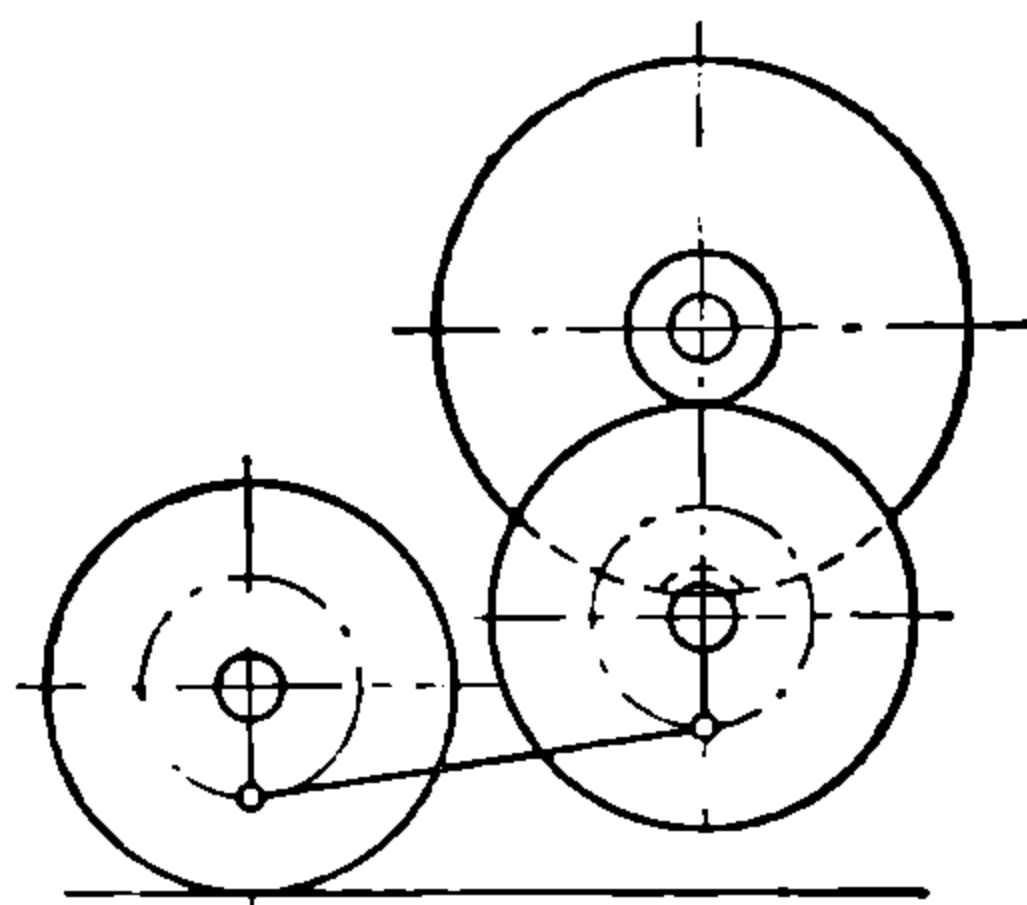


Рис. 53.

Недостатком передачи усилий от электродвигателей через шатун на отбойный вал, а затем при помощи спарников на сцепные оси является то, что вследствие одинакового числа оборотов электродвигателей и движущихся колес электродвигатели получают тяжелыми и дорогими.

В шатунно-зубчатой передаче, при которой усилие от электродвигателей передается при помощи зубчатой передачи на отбойный вал, а последний при помощи спарников передает на движущие оси, получается возможность увеличить число оборотов электродвигателя, а следовательно, уменьшить его вес и стоимость. Шатунная передача у электровозов более сложна, чем у паровозов, так как у паровозов она является незамкнутой системой и статически определимой, а у электровозов — замкнутой и статически неопределимой, следствием чего вызывается необходимость более тщательного ухода и ремонта за механической частью электровозов этой системы передачи. Достоинством этой передачи является более высокое положение центра тяжести электровоза и легко доступное для осмотра и ремонта расположение электродвигателей.

Наибольшее распространение из всех систем передачи усилий от электродвигателей на ведущие оси получила зубчатая передача как на дорогах постоянного, так и однофазного тока.

§ 8. Общий коэффициент полезного действия всей схемы энергоснабжения электрических железных дорог

Общий к. п. д. от центральной электрической станции до обода ведущих колес электровоза зависит от к. п. д. каждого из составных элементов общей схемы энергоснабжения. Коэффициент же полезного действия каждого элемента устройства в свою очередь зависит от конструкции его мощности и от степени использования этой мощности. В отношении центральной электрической станции следует отметить, что чем больше ее мощность, тем выше ее полный к. п. д. Помимо мощности, на к. п. д. центральной электрической станции влияет степень использования этой мощности. Чем ближе к установленной номинальной мощности степень использования ее, чем равномернее ее нагрузка, тем выше к. п. д.

К. п. д. тяговой подстанции зависит от типа агрегатов, установленных на подстанции, мощности их и степени использования этой мощности. В расчетах принято считать к. п. д. тяговой подстанции от ввода высокого напряжения до выводных шин к контактной сети, т. е. включая сюда понизительную трансформаторную часть подстанции. К. п. д. контактной сети зависит от системы тока и напряжения и от степени нагрузки контактной сети. К. п. д. электровозов зависит от многих факторов, как-то: системы тока и величины напряжения в электродвигателях электровоза, системы передачи усилий от тяговых электродвигателей на ведущие оси электровоза и от степени использования мощности электровоза по отношению к режиму его часовой мощности. Для того, чтобы точно подсчитать к. п. д. всей схемы устройства электрической жел. дороги, необходимо точно знать тип, конструкции каждого элемента устройства и расчетную мощность. Следовательно, при точных подсчетах, к. п. д. всей схемы устройства электрической железной дороги следует определять исходя из данных о мощности каждого из элементов оборудования и о коэффициенте его загрузки, т. е. степени использования номинальной мощности. Чем выше степень использования номинальной мощности, чем больше к ней приближается расчетная, тем выше общий к. п. д. всей схемы устройства электрической жел. дор.

В целях выявления степени изменения общего к. п. д. схемы устройства электрической жел. дороги при различных системах тока, ниже, в таблице 7, приводится сравнение к. п. д. от централи до обода ведущих колес электровоза для различных систем электрических жел. дор., взятое из статьи А. Carnier «Lectrification de chemins de fer français et l'expérience americain». Technique Modern, 1921 г. стр. 168.

В приведенной таблице нет данных к. п. д. от источника получения механической энергии до генераторов, установленных на центральной электрической станции, и для получения полного полезного коэффициента использования энергии при электрической тяге необходимо учесть этот коэффициент.

Таблица 7

Наименование элементов оборудования	Род тока первичный. Частота. Род тока в контактном проводе. Передача											
	Трехфазный 25 период. Постоянный ток. Зубчатая передача	Трехфазный 25 период. Постоянный ток. Непосредственный привод	Трехфазный 25 период. Постоянный ток. Зубчатая передача	Трехфазный 50 период. Однофазный. Зубчатая передача	Однофазный 25 период. Однофазный. Зубчатая передача	Однофазный 25 период. Однофазный. Зубчатая передача	Однофазный 25 период. Однофазный. Зубчатая передача	Трехфазный 50 период. Однофазный. Зубчатая передача	Трехфазный 50 период. Постоянный. Зубчатая передача	Трехфазный 50 период. Постоянный. Непосредственная передача	Трехфазный 25 период. Трехфазный. Зубчатая передача	Трехфазный 50 период. Трехфазный. Зубчатая передача
Генераторы	93	93	93	93	89	89	89	93	93	93	92	93
Повысительный трансформатор .	97	97	97	97	96	89	89	97	97	97	97	97
» автотрансформатор	97	97	97	97	96	97	97	97	97	97	97	97
Электропередача	95	95	95	95	95	97	97	95	95	95	95	95
Понижительный трансформатор	97	97	97	97	96	97	97	97	97	97	96	97
Преобразователи частоты	97	97	97	84	96	97	97	84	97	97	96	85
Мотор-генераторы	97	97	85	84	96	97	97	84	85	85	96	85
Одноякорный преобразовател. .	91	91	85	84	96	97	97	84	85	85	96	85
Повысительные трансформаторы	91	91	85	84	96	97	97	84	85	85	96	97
» автотрансформаторы	91	91	85	98	96	97	97	98	85	85	96	97
Линии передачи между п/с .	91	91	85	97	96	97	97	97	85	85	96	97
Понижительный трансформатор	91	91	85	97	96	97	97	97	85	85	96	96
Контактный провод	90	90	90	97	96	97	97	97	85	85	96	96
Трансформатор на электровазе	90	90	90	96	97	97	97	97	90	90	95	95
Преобразователь фаз	90	90	90	97	96	96	96	96	90	90	86	96
Управление, вентиляция и прочее	94	94	94	95	96	96	96	96	94	94	95	95
Электродвигатели	91	93	91	91	88	88	88	88	91	93	91	91
Поправка на неедин. диам. колес	95	93	95	95	95	95	95	95	95	93	94	95
Поправка веса	100	98	100	98	98	98	98	98	100	98	100	100
Общий коэффициент полезного действия %	55	58	51	43	57	59	59	47	51	54	59	46

§ 9. Обеспечение надежности питания электрических жел. дор. энергией

Для обеспечения надежности питания энергией электровоза необходима исправная работа всех элементов схемы устройства электрической железной дороги: контактной сети, подстанций, линий электропередачи и центральной электрической станции. Контактная сеть электрических жел. дор. получает электрическую энергию от подстанции при помощи фидеров, которые подвешиваются на опорах контактной сети и соединяются с контактным проводом одним гибким проводником через 3 — 4 пролета между опорами. В отношении надежности питания электровоза контактная сеть должна удовлетворять двум требованиям: электрической проводимости и механической прочности. Обычно питание электровоза энергией через контактную сеть происходит от двух подстанций (двухстороннее питание). Контактная сеть между подстанциями при помощи участковых выключателей, или раз'единителей, разделяется на отдельные секции-участки. Это разделение позволяет в случае какой-либо аварии выключить лишь один поврежденный участок, а остальные работают нормально.

Контактная сеть каждого пути на перегонах между станциями должна быть электрически независима одна от другой, но при этом должна быть предусмотрена возможность соединения их через установленные в надлежащих местах раз'единители.

Разделение контактной сети раз'единителями на секционные участки дает возможность, в случаях короткого замыкания, локализовать его на небольшом по протяжению участке.

Перегрузка контактной сети вызывает увеличение падения напряжения, которое влияет на потерю энергии и на уменьшение скорости движения поездов.

В отношении механической прочности устройства всей системы контактной сети при проектировании и сооружении ее пред'являются жесткие требования и расчет сети производится при учете всех неблагоприятных условий в ее работе. Тяговые железнодорожные подстанции, воспринимающие нагрузку от движения поездов, подвергаются, в силу непрерывного изменения величины нагрузки, колебаниям в отношении отдачи потребной энергии для движения поездов. Вследствие неравномерного характера нагрузки, агрегаты, установленные на тяговых подстанциях, испытывают толчковую нагрузку и должны быть способными в отдельные моменты выдерживать перегрузки. В зависимости от типа агрегатов, установленных на тяговой подстанции, устанавливается величина и продолжительность допустимой, с точки зрения безопасности, перегрузки тяговых подстанций. Для защиты от чрезмерных перегрузок на подстанциях устанавливаются автоматические выключатели, которые выключают агрегаты в случае короткого замыкания со стороны контактной сети, и через некоторый промежуток времени после выключения снова их включают. Кроме того,

в целях регулирования напряжения со стороны контактной сети в зависимости от типа агрегатов, на подстанциях устанавливаются дополнительные элементы оборудования, выравнивающие нагрузку.

Если же по каким-либо особым причинам выбывает из строя одна подстанция, то (питание контактной сети двухстороннее), снабжение электровоза энергией происходит от соседних подстанций, но в этом случае при значительном падении напряжения и уменьшении скорости движения поездов.

Особое внимание в отношении надежности питания железных дорог энергией должно быть предъявляемо к линиям электропередачи. Линии электропередачи от центральных электрических станций устраиваются двойными, т. е. на двух отдельных опорах.

Кроме того, питание энергией тяговых подстанций должно быть двухсторонним с тем, чтобы в случае короткого замыкания или неисправности с одной стороны, работа подстанций могла происходить без перерыва, благодаря питанию с другой стороны.

В отношении обеспеченности и надежности в получении энергии от центральных электрических станций, следует отметить, что в условиях планового и объединенного энергоснабжения в СССР, снабжение электрических железных дорог энергией находится в несравнимо более благоприятных условиях, чем в капиталистических странах.

Величина потребной энергии для нужд электрических жел. дор. сравнительно с потребной энергией для нужд промышленности и сельского хозяйства представляет небольшую величину и вполне гарантируется ее получение от мощных центральных электрических станций СССР. Объединение же в общую схему нескольких электрических станций и условия регулирования и планового энергоснабжения промышленности, транспорта и сельского хозяйства создают, в условиях СССР, полную надежность в питании электрических железных дорог энергией.

Статья 2. СИСТЕМЫ ТОКА И ВЕЛИЧИНЫ НАПРЯЖЕНИЙ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГАХ

§ 10. Краткий очерк исторического развития различных систем тока и напряжения на электрических жел. дор.

При первом применении электрической тяги в 1881 году в трамвае в Grosse-Lichterfeld'e была применена система постоянного тока напряжением 180 вольт. Ток подводился к электродвигателям вагона по одному из ходовых рельсов, а другой служил обратным проводом. Так как деревянная шпала, даже при напряжении 180 вольт, оказалась недостаточным изолятором между проводом и землей, получились значительные падения напряжения. Это обстоятельство было учтено в том же году при постройке электрической жел.

дороги на парижской Всемирной выставке, где рабочим проводом являлась уже железная труба, подвешенная над путем. Обратным проводом служила такая же труба, подвешенная рядом с первой. В 1884 году в Америке при постройке трамвая в Кливлэнд, Бетли и Найт в качестве рабочего провода была применена железная труба с прорезом, уложенная в подземный желоб между рельсами, куда входил токособираатель. Прототип же современной контактной сети (воздушный рабочий провод и обратные ходовые рельсы) был применен бельгийцем Ван-Депуль (Van Depoele) на постройке трамвая в Торонто (Канада). В 1890 году, при введении электрической тяги в лондонском метрополитене (City and South London) была применена система постоянного тока напряжением 500 вольт. В качестве рабочего провода был применен третий рельс.

Все приведенные выше системы тока и напряжения и конструкции рабочего провода были применены при мотор-вагонном движении.

На первой железной дороге с электровозной тягой в Америке, на подходе к Балтимору (жел. дор. Baltimore and Ohio) была применена система постоянного тока при напряжении 600 вольт. Рабочим проводом был третий рельс. В Европе при введении впервые электровозной тяги в 1901 году в Италии на линии Milano — Varese — Porto — Ceresio и в 1902 году на линии Leco — Colico — Chiavenna была применена система трехфазного тока с напряжением в контактом проводе 3000 вольт. Проводка двух рабочих проводов — воздушная, третьим проводом служили ходовые рельсы.

Впервые на системе однофазного тока с частотой $16\frac{2}{3}$ пер/сек была в 1903 году электрифицирована в Швейцарии Лечбергская жел. дор. на участке Seebach — Wettingen. В последующем на системе однофазного тока с частотой $16\frac{2}{3}$ были электрифицированы жел. дор. в Швеции и в Германии, принявших эту систему как стандартную. Эта же система тока, но с частотой 25 пер/сек была применена в 1908 году в Америке при электрификации магистрали New-York, New-Haven and Hartford.

Система постоянного тока высокого напряжения 2400 вольт была применена в 1913 году в Америке при электрификации жел. дор. Butte — Anaconda and Pacific Railway. Электрификация в Америке железной дороги Chicago — Milwaukee and St-Paul по системе постоянного тока с напряжением в контактом проводе 3000 вольт, давшая хорошие эксплуатационные показатели, явилась неоспоримым доказательством технического совершенства и эффективности электрификации железных дорог магистрального значения. На основе изучения опыта эксплуатации этой жел. дороги, после войны электрификация жел. дор. Франции проводилась на системе постоянного тока с напряжением 1500 вольт в контактом проводе, несмотря на то, что до этого электрификация Южных жел. дорог была проведена на системе однофазного то-

ка с частотой $16\frac{2}{3}$ пер/сек. При электрификации железных дорог Японии была принята также система постоянного тока с напряжением 1500 вольт в контактном проводе.

Система однофазного тока получила преимущественное распространение в Германии, Швейцарии и Швеции. Система трехфазного тока наибольшее развитие и техническое усовершенствование получила на железных дорогах Италии. Помимо развития однородных систем тока в контактном проводе и в электродвигателях, сравнительно в последнее время при электрификации жел. дорог стали применять смешанные системы: однофазный ток в контактном проводе и трехфазный или постоянный ток в электродвигателях. Это стремление к применению смешанных систем объясняется желанием с одной стороны использовать достоинства однофазного тока в контактной сети, обеспечивающего более легкую конструкцию, меньшее сечение проводов и потерь энергии и с другой стороны—преимущества в технико-экономическом и эксплуатационном отношении электродвигателей трехфазного и постоянного тока по сравнению с электродвигателями однофазного тока. Смешанные системы получили свое применение и развитие на жел. дор. Америки, где на системе однофазно-трехфазного тока электрифицирована жел. дор. Virginia—Railway и на системе однофазно-постоянного тока линии Detroit—Toledo and Ironton, New-York, New-Haven and Hartford Railway, и Great—Nothorn.

Электрификации последних линий на системе однофазно-постоянного тока, т. е. с принятием электродвигателей постоянного тока, показывает преимущество последних в эксплуатационном отношении.

§ 11. Распространение различных систем тока и напряжения на электрических жел. дорог во всех странах

Принятие той или иной системы тока и напряжения при электрификации жел. дорог какой-либо страны в начальной стадии введения электрической тяги определялось в значительной степени техникой развития и совершенства в элементах оборудования применяемой системы. В последующем развитии выбор системы тока и напряжения производился на основе улучшения вопроса энергоснабжения, с учетом густоты движения, топографических условий местности, характеризующих трудность профиля, и, безусловно, проверенностью и надежностью в эксплуатации, обеспечивающих экономический эффект от электрификации.

Следует отметить, что выбор той или другой системы в капиталистических условиях обуславливался не столько технико-экономическими соображениями, сколько конкурентной борьбой отдельных фирм, специализировавшихся на определенных системах.

Так как введение электрической тяги на железных дорогах производилось в различных странах в разное время, и стадия раз-

вития в электро-техническом отношении элементов оборудования была различна, то в настоящее время имеется применение и развитие в разных странах различных систем тока и напряжения. Применяв ту или иную систему тока и напряжения при электрификации своих жел. дор., страна, естественно, добивалась совершенствования данной системы и ее развития. Примером может служить Италия, применившая систему трехфазного тока, и Германия, применившая систему однофазного тока. Нужно заметить, что в последнее время Италия начинает применять при электрификации жел. дор. систему постоянного тока высокого напряжения. Электрификация жел. дор. Франции и Японии производилась уже на основании изучения опыта эксплуатации различных систем тока и напряжения и с учетом условий работы своих железных дорог и вопроса энергоснабжения их. Поэтому во Франции, Японии и Испании широкое применение получила система постоянного тока с напряжением 1500 вольт. Америка электрификацию своих магистральных железных дорог преимущественно производила на системе постоянного тока высокого напряжения 2400—3000 вольт.

Электрифицированные жел. дор. на данной системе в эксплуатационном и экономическом отношении показали большие преимущества и совершенство. На основании изучения опыта эксплуатации жел. дорог Америки Франция, при электрификации своих железных дорог, приняла систему постоянного тока. Однако Америка, применив систему постоянного тока высокого напряжения, не остановилась на исключительном ее применении и развитии и в более позднее время применяла смешанные системы тока. Это объясняется не отказом от системы постоянного тока, а стремлением найти наиболее выгоднейшее сочетание в наилучшей работе всех элементов оборудования электрических жел. дор.: подстанции, контактной сети и электровоза. Воспользовавшись в контактной сети однофазным током, в электровозах — постоянным током, стремились в эксплуатации получить лучшие показатели. Следует отметить, что за исключением системы трехфазного тока, при котором сложность конструкции контактной сети и ее эксплуатация пошатнули мнение о ней даже ее родоначальников, все остальные системы еще не достигли предела своего совершенства и, естественно, в дальнейшем, с развитием электротехники, с введением новых агрегатов, системы будут совершенствоваться в своем дальнейшем развитии. Для характеристики распространения различных систем тока и напряжения на электрических железных дорогах мира ниже в таблице 8 приводятся данные¹ о протяжении жел. дор. в разных странах по состоянию на 1931 год, электрифицированных на различных системах тока и напряжении (см. стр. 78—83).

¹ Заимствованы из статьи инж. Соколова и Вислоух «Классификация существующих систем тока в контактном проводе электрических жел. дор.» Труды Научно-исследовательского института НКПС по электрификации жел. дор.

§ 12. Перспективы развития различных систем тока и напряжения

Кроме систем тока и напряжения, применяемых сравнительно давно на электрических жел. дор. и имеющих уже достаточный опыт в эксплуатации, в настоящее время в стадии опытной эксплуатации находятся другие системы. К числу таких систем тока следует отнести систему однофазного тока высокого напряжения нормальной частоты 50 периодов в контактном проводе и применение электровозов системы Кандо, Броун-Бовери, Пунга Шен, преобразующих однофазный ток на электровозе. Стремление к применению системы однофазного тока высокого напряжения и нормальной частоты, как указывалось ранее, объясняется желанием улучшить дело энергоснабжения и уменьшить расходы, упростив конструкцию подстанций и контактной сети. Сложность в конструктивном отношении электровозов однофазного тока нормальной частоты не позволила до сего времени создать мощных электровозов.

На электрифицированной в 1925 г. жел. дор. Detroit Toledo and Ironton Ry при применении однофазного тока в контактной сети на электровозах были установлены мотор-генераторы, преобразующие переменный ток в постоянный для питания электродвигателей постоянного тока. Тяжелая конструкция электровозов с мотор-генераторами заставляет искать лучших форм разрешения этого вопроса и появляются новые типы электровозов: системы Кандо, американская расщепленная фаза, электровозы системы Пунга-Шен и электровозы с вентильными двигателями (системы Броун-Бовери). Изобретение ртутных сетчатых преобразователей, которые находятся еще в стадии усовершенствования, вносят большие достижения в разрешение проблемы системы тока и напряжения. Способ регулирования напряжения ртутных выпрямителей при помощи сетки, помимо разрешения вопросов регулирования напряжения, открывает путь к разрешению при ртутных выпрямителях целого ряда очень важных проблем: статическое преобразование переменного тока одной частоты в переменный ток другой частоты, статическое преобразование постоянного тока в переменный и проблему рекуперации энергии при ртутных выпрямителях. Применение этого типа преобразователей может внести существенные изменения в постановку и разрешении вопроса системы тока и напряжения. Практическое разрешение разрабатываемого в настоящее время вопроса о системе постоянного тока высокого напряжения как в линиях электропередач, так и в контактном проводе до 20 000 в, овладение конструкцией электродвигателей постоянного тока при высоком напряжении может существенно улучшить технико-экономическую характеристику системы постоянного тока и поставить в будущем на высокую ступень техники эту систему. Ионные преобразователи (системы Чернышева — Ситникова), находящиеся еще в стадии конструирования и усовершенствования, будучи применены на подстанциях и

Таблица 8

тактном проводе электрических железных дорог

Основные преимущества системы			Основные недостатки системы		
Для подстанций и линий передач	Для подвижного состава	Для контактной сети	Для подстанций и линий передач	Для подвижного состава	Для контактной сети
Большой $\cos \varphi$ линий передачи	1) Небольшой вес электрооборудования 2) Высокий к. п. д. электродвигателей и надежность их работы 3) Широкое регулирование скорости 4) Большая легкость рекуперации 5) Большая пригодность для мотор-вагонного движения	1) Относительно высокий к.п.д. сети (отсутствие самоиндукции в проводах) 2) Меньшее воздействие на провода слабого тока (относительно дешевые защитные устройства) 3) С увеличением напряжения уменьшается стоимость контактной сети	1) Относительно дорогое оборудование	1) Более сложная конструкция электропоездов: вследствие наличия пусковых реостатов (по сравнению с однофазным током) 2) Большие потери при пуске (по сравнению с однофазным током)	1) Относительно дорогое оборудование 2) Наличие электролиза

НТБ
ДНУЖТ

№ п/п	Название систем тока	Напряжение в контактном проводе вольт	Частота	Устройство подстанций	Ток в электродвигателях	Географическое пространство		% к суммарной протяженности
						Страны	км линии	
5	Однофазный ток	15 000	15	1) Трансформаторы 2) Большие расстояния между подстанциями (больше чем при постоянном токе) 3) Вращающиеся преобразователи частоты	Однофазный	Швеция и Норвегия	1 168	—
						Итого	1 168	5,0
6	Однофазный ток	6 000	16 ² / ₃	Тоже	Однофазн.	Англия Испания	204 60	— —
						Итого	264	1,1
7	Однофазный ток	11 000	16 ² / ₃	Тоже	Однофазн.	Норвегия Швейцария	56 350	— —
						Итого	406	1,7
8	Однофазный ток	15 000	16 ² / ₃	Тоже	Однофазн.	Австрия Венгрия Германия Дания Норвегия Швейцария Италия	724 106 1 303 105 216 2 282 19	— — — — — — —
						Итого	4 755	20,1
9	Однофазный ток	3 000—6 000	25	—	—	Германия Австрия Норвегия США	33 91 24 6	— — — —
						Итого	154	0,7
10	Однофазный ток	11 000	25	Вращающиеся преобразоват. част.	Однофазн.	США	416	—
						Итого	416	1,7

Таблица 8 (продолжение)

Основные преимущества системы			Основные недостатки системы		
Для подстанций и линий передач	Для подвижного состава	Для контактной сети	Для подстанций и линий передач	Для подвижного состава	Для контактной сети
Простота оборудования (при условии специальной питательн. сети)	1) Простота устройства электровоза 2) Легкость и простота регулирования скорости	1 Сравнительно небольшая стоимость сети 2) Возможность иметь большие колебания напряжения в контактной сети 3) Отсутствие электролиза	1) При питании от трехфазной сети необходимо иметь вращающиеся преобразователи 2) При питании от собственной сети низкий коэффициент использования последней	1) Относительно высокая стоимость подвижного состава и электродвигателей 2) Низкий к. п. д. электродвигателей 3) Отсутствие надежной системы рекуперации 4) Более высокая стоимость ремонта и содержания	1) Вредные влияния на провода слабого тока

№№ п/п	Название систем тока	Напряжения в контактном проводе вольт	Частота	Устройство подстанций	Ток в электропроводах	Географическое распространение		% к суммарной протяженности
						Страны	км линии	
11	Однофазный ток (сист. Пунга-Шен) электровазы ф. Крупп	6 000	50	Трансформаторы	Однофазн.	Германия Австрия	{ 20	—
						Итого	20	0,1
						Итого по однофазному току всех напряжений и частот		
12	Трехфазный ток	3 000—3300	15	Трансформаторы	Трехфазн.	Италия	37	—
						Итого	37	0,2
13	Трехфазный ток	3 600	16 2/3	—	—	Италия Австрия Швейцария	1 540 92 60	— — —
						Итого	1 692	7,1
14						Трехфазный ток	10 000	45
	Итого	172	0,7					
	Итого по трехфазному току всех напряжений и частот					1 901	8,0	
15	Однофазно-трехфазный ток (система расщепленной фазы)	15 000	50	Подстанции оборудованы понижающими трансформаторами, большие расстояния между подстанциями	Трехфазн	Венгрия	40	—
						Итого	40	0,2
16	Однофазно-трехфазный	11 000	25	То же	Трехфазн ток 750 в	США	318	—
						Итого	318	1,3
	Всего по однофазно-трехфазному току всех напряжений и частот					358	1,5	
17	Однофазно-постоянный ток	11 000	25	—	Постоянный ток 600 в	США	144	0,6
						Итого	144	0,6
	Итого по смешанным системам					502	2,1	
	Всего электрических железных дорог					23 638	100,0	

Таблица 8 (окончание)

Основные преимущества системы			Основные недостатки системы		
Для подстанций и линий передач	Для подвижного состава	Для контактной сети	Для подстанций и линий передач	Для подвижного состава	Для контактной сети
Отсутствие преобразовательных подстанций	1) Электровоз легче, чем при однофазн. пониженной частоты 2) $\cos \varphi = 1$	Легкая и дешевая контактная сеть	Неравномерные нагрузки трехфазных сетей		Вредное влияние на провода слабого тока
Отсутствие вращающихся машин	1) Высокие удельные мощности локомотивов 2) Автоматическая рекуперация 3) Высокий к. п. д. электродвигателей и их прочность и надежность 4) Устойчивость скорости, независимо от силы тяги 5) Простота оборудования электровоза			1) Отсутствие эластичного движения с точки зрения изменения скоростей 2) Мало экономичный пуск в ход и переход от скорости к скорости 3) Неудовлетворительное распределение нагрузки, вызываемое случайным различием диаметров сцепных колес	1) Сложность двухпроводной сети 2) Вредное влияние на провода слабого тока
Относительно меньшие расходы на подстанциях (отсутствие вращающихся машин)	1) Большая мощность на единицу веса 2) Отсутствие коллекторов 3) Высокий к.п.д.	1) Более дешевая сеть сравнительно с постоянным током 2) Отсутст. электролиза	При присоединении к трехфазной сети асимметрия в фазах	Усложняется конструкция электровоза, на котором установлен расщепитель фаз. Ограничено число ходовых скоростей (2—4)	
	1) Упрощение вспомог. оборуд. электровоза 2) Хорошее регулир. скорости 3) Меньшее напряж. электродв. 4) Высокий к. п. д. одн. ф. синхрон. мотор - генератора	Те же, которые указаны выше для однофазного тока		1) Потери в мотор-генераторе 2) Утяжеление электрического оборудования	1) Вредное влияние на провода слабого тока

электровозах (при системе постоянного тока высокого напряжения в контактном проводе до 20 000 вольт), как показывают теоретические расчеты Научно-исследовательского института электрификации жел. дор. НКПС, ставят систему постоянного тока в преимущественное положение. Конечно, кроме теоретических расчетов, требуется проверка и испытание этой системы в условиях эксплуатации. Техника в области оборудования электрических жел. дор. мощными агрегатами развивается быстрым темпом и возможно в недалеком будущем мы будем иметь крупные открытия и изобретения, которые внесут существенные, неизвестные нам в настоящее время, усовершенствования в области электрических жел. дор. В перспективе развития железных дорог будущее, несомненно, за электрическими железными дорогами.

§ 13. Технические и экономические характеристики различных систем тока и напряжения

Существующие на электрических железных дорогах системы тока и напряжения, конечно, не являются совершенными. Каждая из них имеет свои технические и экономические преимущества и недостатки. При системе трехфазного тока, как отмечалось ранее, получается сложность в конструкции контактной сети, а отсюда вызываемые затруднения в ее эксплуатации. Электровозы же системы трехфазного тока просты в своей конструкции и при рекуперации энергии на скатах (использование живой силы поезда и обратное получение энергии в сеть) работа электродвигателей трехфазного тока происходит легко, так как асинхронные электродвигатели при числе оборотов выше синхронизма становятся генераторами. Недостатком в этом случае является лишь постоянство скорости при рекуперации и если ее необходимо изменить — например, уменьшить, то использовать рекуперативное торможение нельзя. Система однофазного тока, имея преимущество в отношении контактной сети, которая вследствие высокого напряжения получается легкой и простой в конструкции, в отношении же электровозов однофазного тока имеет ряд недостатков. Так как электродвигатели однофазного тока при малых скоростях не допускают значительной перегрузки, условия трогания с места поезда при электровозе однофазного тока находятся в худшем положении по сравнению с электровозами постоянного тока, электродвигатели которого допускают при трогании с места перегрузку до 100%.

Кроме того, так как напряжение у электродвигателей однофазного тока 300 — 600 вольт, вызывается необходимость в постановке на электровозе трансформатора и поэтому вес электровоза больше, чем электровозов трехфазного или постоянного тока. Рекуперативное торможение при электровозах однофазного тока находится в худших условиях. Помимо тех или иных преимуществ и недостатков в отношении контактной сети и электровозов, следует отметить, что как при системе трехфазного, так и однофазного

тока, с частотой $16\frac{2}{3}$ или 25 пер/сек, пониженной по сравнению с нормальной 50 пер/сек, принятой в линиях электропередач осложняется вопрос электроснабжения и вызывается необходимость устройства на жел.-дор. подстанциях вращающихся преобразователей частоты. При системах переменного тока на электрических ж. д. вызывается затруднение в работе близь находящихся линий слабого тока (телеграф, телефон), которые или приходится заключать в кабель или относить в сторону от линии жел. дор. на определенное расстояние. Система постоянного тока, имея большое преимущество в электровозах постоянного тока, более удовлетворяющих эксплуатационным условиям работы на жел. дор., вызывает большие затраты в отношении устройства подстанции и контактной сети. Эксплоатация же подстанций и контактной сети жел. дор. постоянного тока не вызывает затруднений и осложнений. В смешанных системах, однофазно-трехфазной и однофазно-постоянной, имеющих преимущество в отношении контактной сети при однофазном тске нормальной частоты и высоком напряжении, в силу необходимости преобразования этого тока на электровозах, получается сложность в конструкции электровоза. Для сопоставления относительной величины стоимости электрооборудования электрических жел. дор. при различных системах тока и напряжения далее, в таблице 9, приводятся данные, взятые из статьи:

Таблица 9

Система тока и величина напряжения

Наименов. элемент. оборудов.	Постоянный ток		Однофаз- ный ток 11 000 в	Трехфаз- ный ток 11 000 в
	600 в	1200 в		
А. Подвижной состав				
Полный вес электров. (в тоннах)	112	112	144	144
Стоимость его (в фран.) . .	265 000	285 000	385 000	350 000
Коэф. п. д. от провода до обода колес.	85	85	79	81
Стоимость содер. и ремонт от- нес. на 1 лок. км.	0,25	0,25	0,50	0,31
Б. Подстанции				
Стоим. за уст. квт (в франках)	160	170	70	75
Коэффициент использования %.	20—40	40—70	40—80	30—60
Ср. коэф. полезного действия	78—88	87—93	97—98	97—98
Расходы по содержанию и ре- монту (в франках)	40 000	40 000	20 000	20 000
В. Контактная сеть				
	Третий рельс		Воздушный провод	
Стоимость за 1 км.	30—45 000 фр.	35—50 000 фр.	20—40 000 фр.	27—50 000 фр.
Коэф. полезного действия %	88—92	90—96	93—97	93—97
Расходы по содерж. и ремонту	300—500 фр.	400—600 фр.	500—1000 фр.	500—1000 фр.

A. Carnier L'électrification de chemins de fer français et l'expérience américain . Technique Modern 1921 г.

Для разрешения вопроса о выборе стандартной системы тока и напряжения для электрификации железных дорог СССР Научно-исследовательским институтом электрификации при НКПС была произведена в 1931-1932 г. большая работа по технико-экономическому сравнению различных систем тока и напряжения. Помимо систем тока и напряжения, существующих на жел. дор., в расчеты технико-экономического сравнения были введены системы тока и напряжения и различные варианты их, не имеющие опыта эксплуатации и находящиеся пока в стадии разработки и усовершенствования.

В качестве объектов жел.-дор. линий, на которых произведены технико-экономические расчеты при разных системах тока и напряжения, были взяты три участка существующих жел. дор., находящихся в отличных по топографическим условиям местностях и с разными руководящими под'емами. Расчетные грузообороты, разные для каждой линии, принимались в 2-х вариантах: неинтенсивного и интенсивного движения. Техничко-экономическое сравнение произведено для различных вариантов системы тока и напряжения, из которых основные следующие:

Постоянный ток напряжением 3 000 и 4 500 вольт в контактном проводе.

Однофазный ток пониженной частоты ($16\frac{2}{3}$ и 25 пер/сек) при напряжении в контактном проводе 15 000 вольт с мотор-генераторными преобразователями и с ртутными сеточными преобразователями частоты на подстанциях.

Однофазный ток промышленной частоты (50 пер/сек) при напряжении 20 000 вольт в контактном проводе: с мотор-генераторными электровозами (электродвигатели постоянного тока), с электровозами с расщеплением фаз по системе Вестингауза, с электровозами по системе Кавдо, с электровозами по системе Пунга-Шен, с электровозами с вентильными электродвигателями (система Броун-Бовери).

Постоянный ток 20 000 вольт в контактном проводе: с ионными преобразователями системы Чернышева-Ситникова на подстанциях и электровозах.

Трехфазный ток промышленной частоты (50 пер/сек) при напряжении 10 000 вольт в контактном проводе. В результате расчетов сравнения различных вариантов приведены следующие показатели: капиталовложения, себестоимость перевозок, материаловложения по меди и материаловложения по железу. Далее, в таблицах приведены средние данные¹ по приведенным показателям различных систем тока и напряжения, для двух размеров грузооборота, соот-

¹ Выбор системы тока для электрификации ж. д. СССР. Труды Научно-исслед. института НКПС по электрификации ж. д.

ветствующих неинтенсивному и интенсивному движению, при чем для первого данные указаны в числителе, для второго—в знаменателе. Величины показателей приведены в процентах по отношению к постоянному току напряжением в 3 000 вольт, принятому за 100%. В показателе материаловложения по железу для каждого размера движения приведены две цифры: первая относится к расходу активного железа в электрических машинах и аппаратах, вторая — к расходу прочего железа.

Таблица 1

Средние показатели по наиболее распространенным системам однофазного тока пониженной частоты и трехфазного тока

С и с т е м ы	Капита- ловложе- ния	Себестои- мость пе- ревозок	Материа- ловложе- ния по меди	Ма териало- вложения по желе-у
Постоянный ток 3 000 в	100	100	100	100
Однофазный ток 25 <i>пер/сек</i> с синхрон- но-синхронными преобразователями без рекуперации	$\frac{106}{114}$	$\frac{112}{118,5}$	$\frac{34}{45}$	$\frac{150+138}{161+117}$
То же, но с ртутными преобразовате- лями	$\frac{90}{95}$	$\frac{112}{115}$	$\frac{32}{42}$	$\frac{167+139}{171+117,5}$
Однофазный ток $16\frac{2}{3}$ <i>пер/сек</i> с синхрон- но-синхронными преобразователями без рекуперации	$\frac{112}{118,5}$	$\frac{117}{119}$	$\frac{31,5}{45}$	$\frac{161+139}{171+118}$
То же, но с ртутными преобразовате- лями	$\frac{97}{96,5}$	$\frac{109}{115}$	$\frac{32}{42}$	$\frac{176+140}{183+117,5}$
Трехфазный ток 50 <i>пер/сек</i> (питание от сети 35 кв).	$\frac{122}{107}$	$\frac{102}{98,5}$	$\frac{132}{117,5}$	$\frac{165+158}{134+124}$

Таблица 11

Средние показатели для системы однофазного тока 50 *пер/сек* с электрово-
зами по системе расщепленной фазы Вестингауза и мотор-генераторными

С и с т е м ы	Капита- ловложе- ния	Себестои- мость пе- ревозок	Материа- ловложе- ния по меди	Ма териало- вложения по железу
Постоянный ток 3000 в	100	100	100	100
Однофазный ток 50 <i>пер/сек</i> с электро- возами по системе Вестингауза	$\frac{87,5}{98}$	$\frac{97}{99,5}$	$\frac{35}{50,3}$	$\frac{150+134}{165+116,5}$
Однофазный ток 50 <i>пер/сек</i> с мотор- генераторн. электровозами	$\frac{99,3}{110,5}$	$\frac{102}{104,3}$	$\frac{37}{54,5}$	$\frac{182,5+123}{200+115,5}$

Таблица 12

Средние показатели наиболее экономических систем

С и с т е м ы	Капита- ловложе- ния	Себестои- мость пе- ревозок	Материа- ловложе- ния по меди	Материало- вложения по железу
Постоянный ток 3 000 в	100	100	100	100
Постоянный ток 20 000 в с ионными преобразователями	$\frac{79,5}{82}$	$\frac{95}{97}$	$\frac{29}{36,5}$	$\frac{117+136}{134+116}$
Однофазный ток 50 пер/сек с вентильн. двиг. Броун-Бовери с регенерацией (с нормальными пролетами между подст.)	$\frac{82,0}{85,5}$	$\frac{97,5}{96}$	$\frac{29,0}{35,5}$	$\frac{120+130}{126+109}$
Однофазный ток 50 пер/сек по системе Кандо (с нормальными пролетами между подст.)	$\frac{83}{89}$	$\frac{95}{99}$	$\frac{32}{40,5}$	$\frac{128+131}{134+108}$
Однофазный ток 50 пер/сек с двиг. по системе Пунга-Шен с нормальными пролетами между подст.	$\frac{84}{93,5}$	$\frac{98}{100}$	$\frac{31,5}{42,3}$	$\frac{136,5+135}{148+118}$

Из приведенных в таблицах данных видно, что наиболее эффективными как в отношении капиталовложений и материаловложений по меди, так и по себестоимости являются новые системы.

К числу таких новых систем, находящихся еще в стадии разработки: относятся системы постоянного тока 20 000 вольт с ионными преобразователями, система с вентильными электродвигателями (Броун-Бовери), а также системы, мало еще испытанные в практике, как-то: система однофазного тока промышленной частоты (50 пер/сек) с электровозами системы Кандо и системы Пунга-Шен.

Нужно отметить, что так как при производстве расчетов по сравнению вариантов принимались по некоторым вариантам проектные данные, или же данные испытаний системы по иностранным источникам, то в целях проверки и окончательного установления эффективности той или иной системы желательно испытание их в условиях СССР. При установлении стандартной системы тока и напряжения для электрификации жел. дор. СССР помимо технико-экономических характеристик той или иной системы в отношении электрооборудования электрической жел. дор. необходимо учитывать также и условия наилучшей связи между высоковольтными линиями электропередачи и электрооборудованием электрических жел. дор.

Первая Всесоюзная конференция по электрификации железных дорог, состоявшаяся в Москве в 1932 году, по вопросу выбора стандартной системы тока и напряжения для электрификации жел. дор. СССР, отмечая, что единая плановая система социалистического хозяйства требует и единой энергетической системы для всех отраслей народного хозяйства, считает необходимым избрать такую

систему тока и величину напряжения, которые полностью удовлетворяют поставленному выше условию, а также следующим трем основным требованиям:

«а) технической надежности оборудования в конструкции и эксплуатации;

б) экономической выгоды как в отношении капитала и материалоуложений и эксплуатации, так и в отношении наилучшей связи с высоковольтными линиями электропередач СССР;

в) относительно быстрой освоенности советской промышленностью всех элементов оборудования при той или иной системе тока и величине напряжения».

Из всех рассмотренных систем выбор должен быть произведен между двумя системами тока и величины напряжения, а именно:

«а) постоянный ток напряжения 3 000 в;

б) однофазный ток нормальной индустриальной частоты напряжения 20 000 вольт. Из указанных двух систем переменный однофазный ток нормальной частоты имеет перед постоянным током ряд технических и экономических преимуществ. Однако, ввиду того, что эта система лишь недавно получила свое развитие и как сама система, так и надежность ее в эксплуатации подлежат еще дальнейшему подробному и всестороннему изучению, а с другой стороны, считая, что система постоянного тока является вполне надежной, испытанной и зарекомендовавшей себя на железных дорогах почти всех стран, впредь до опытной проверки электровозов и системы в целом работающих на однофазном токе нормальной частоты, электрификацию магистральных железных дорог СССР вести на постоянном токе напряжением 3 000 вольт».

Одновременно конференция отмечает необходимость опытной и исследовательской работы по изучению электровозов и систем работающих на однофазном токе нормальной частоты.

НТБ
ДНУЖТ

ГЛАВА II

ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ, ЭЛЕКТРОВОЗ И ТЯГОВЫЕ РАСЧЕТЫ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДОРОГАХ

Статья 3. ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ И ЭЛЕКТРОВОЗ

§ 14. Принцип работы тяговых электродвигателей постоянного и переменного тока

Тяговые электродвигатели, находящиеся на электровозе, поступающую к ним электрическую энергию превращают в механическую, которая при помощи той или другой системы передачи передается на ведущие скаты электровоза. Принцип работы электродвигателя и превращения электрической энергии в механическую основывается на взаимодействии магнитного потока с находящимся в нем проводником, по которому течет ток. Как известно, если в магнитном поле перпендикулярно к силовым линиям поместить замкнутый проводник, то последний в силу взаимодействия магнитного потока с током, текущим по проводнику, будет стремиться к перемещению. Направление перемещения проводника зависит от направления как магнитных силовых линий потока, так и тока в проводнике.

Создание магнитного потока и тока в проводниках, в электродвигателях постоянного, однофазного и трехфазного тока осуществляется различно.

В электродвигателях постоянного тока магнитный поток создается магнитами — полюсами, на которых, в целях увеличения и регулирования величины магнитного потока, помещаются обмотки возбуждения, по которым течет ток. В магнитном потоке, создаваемом полюсами, находится якорь, в пазах которого помещены проводники, по которым также течет ток. Взаимодействие магнитного потока с проводниками якоря, по которым течет ток, создает вращение якоря. Для того, чтобы вращение якоря было направлено в одну сторону, необходимо, чтобы направление тока в проводниках якоря, по отношению к северному или южному полюсу магнитов при перемещении проводников, оставалось одним и тем же. Это осуществляется при помощи коллектора, находящегося на оси якоря, к которому и присоединяются проводники якоря. К коллектору, состоящему из отдельных медных пластинок, изолированных друг от друга, ток из внешней цепи передается через щетки, положение которых не изменяется. Коллектор, находясь на одной оси с якорем, при вращении распределяет ток в проводниках якоря таким образом, что в проводниках, расположенных перед северным полюсом магнитов, ток проходит в одном направлении, а в проводниках, расположенных под южным полюсом — в обратном направлении.

Так как полярность магнитов зависит от направления тока в обмотках возбуждения, то необходимо также, чтобы направление тока в них оставалось без изменения. В зависимости от способа соединения проводников якоря и обмоток возбуждения полюсов, электродвигатели постоянного тока разделяются на серийные и шунтовые. В серийных электродвигателях обмотка возбуждения (полюсов) соединена последовательно с проводниками якоря, следовательно, величина силы тока в обмотках возбуждения и проводниках якоря нормально остается одинаковой. Схема электродвигателя серии приведена на рис. 54.

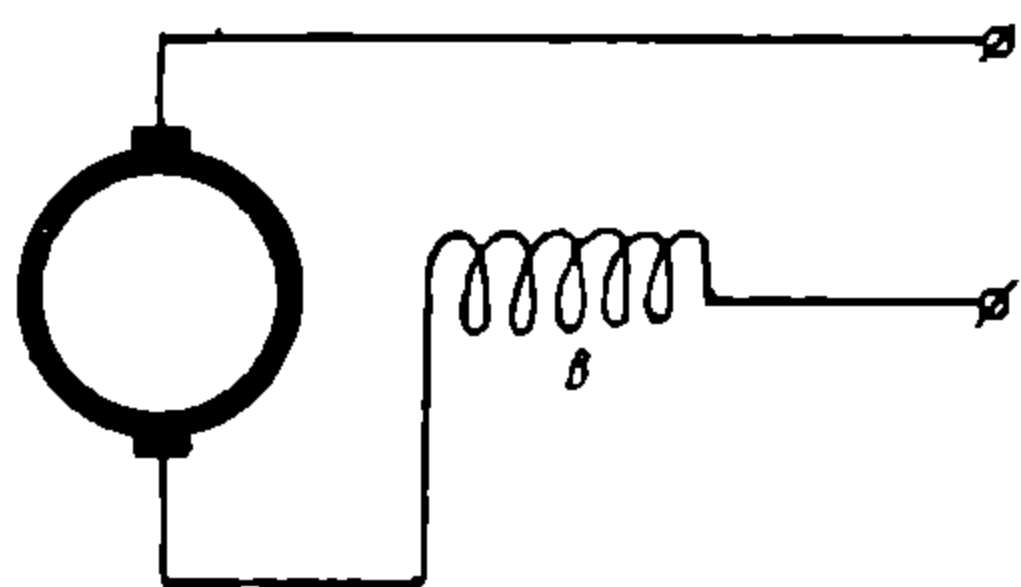


Рис. 54. Схема соединения обмоток в электродвигателе серии постоянного тока.

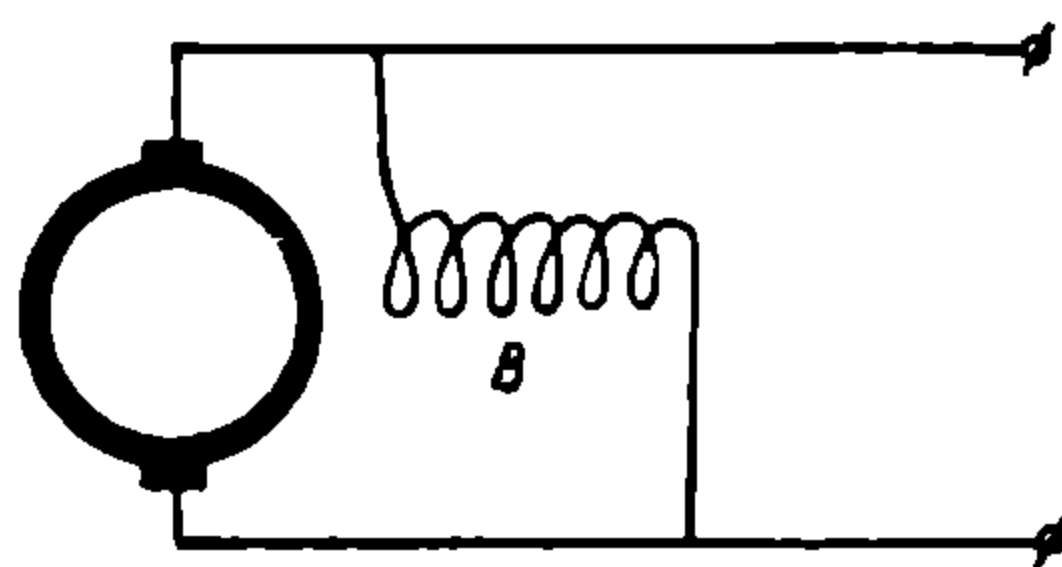


Рис. 55. Схема соединения обмоток в шунтовом электродвигателе постоянного тока.

В шунтовых электродвигателях постоянного тока обмотка возбуждения присоединена параллельно к обмоткам якоря (рис. 55.)

Так как в шунтовых электродвигателях сила тока, в силу постоянства сопротивления обмоток возбуждения, поступает одна и та же, магнитный силовой поток, образуемый полюсами, остается без изменения. С изменением величины силы тока, поступающего из внешней цепи, изменяется лишь сила тока в проводниках якоря. В электрической тяге на жел. дор. большое распространение получили электродвигатели серии, в силу их тяговых преимуществ по сравнению с шунтовыми. Последние имеют применение в промышленных установках.

При прохождении тока по проводникам якоря вокруг них появляются свои магнитные силовые линии, которые образуют магнитный поток, перпендикулярный к магнитному потоку, создаваемому полюсами магнитов. Взаимодействие этих магнитных потоков дает результирующий, который смещается на некоторый угол по отношению к нейтральной оси. Смещение магнитного потока главных полюсов под влиянием магнитного потока, образуемого проводниками якоря, называется реакцией якоря. Так как сила тока в проводниках якоря не остается постоянной, то изменяется магнитный поток якоря, а следовательно, изменяются результирующий поток и перемещение нейтральной оси.

Положение щеток на коллекторе должно соответствовать нейтральной оси, следовательно, изменение силы тока в проводниках

якоря при отсутствии мер устранения реакции якоря вызывало бы при каждом изменении силы тока необходимость в смещении щеток.

Кроме смещения нейтральной оси, магнитный поток проводников якоря вызывает некоторое размагничивание и ослабление главного магнитного потока, создаваемого полюсами. Из приведенной на рис. 56 векторной диаграммы магнитных потоков видно, что вектор Φ_{α} , представляющий магнитный поток якоря, может быть разложен на горизонтальную и вертикальную составляющие, из которых первая, будучи перпендикулярна к магнитному потоку полюсов Φ_{δ} , будет смещать его, а следовательно, вызывать изменение нейтральной оси, а вторая составляющая, направленная в противоположную сторону магнитного потока полюсов Φ_{δ} , — раз-

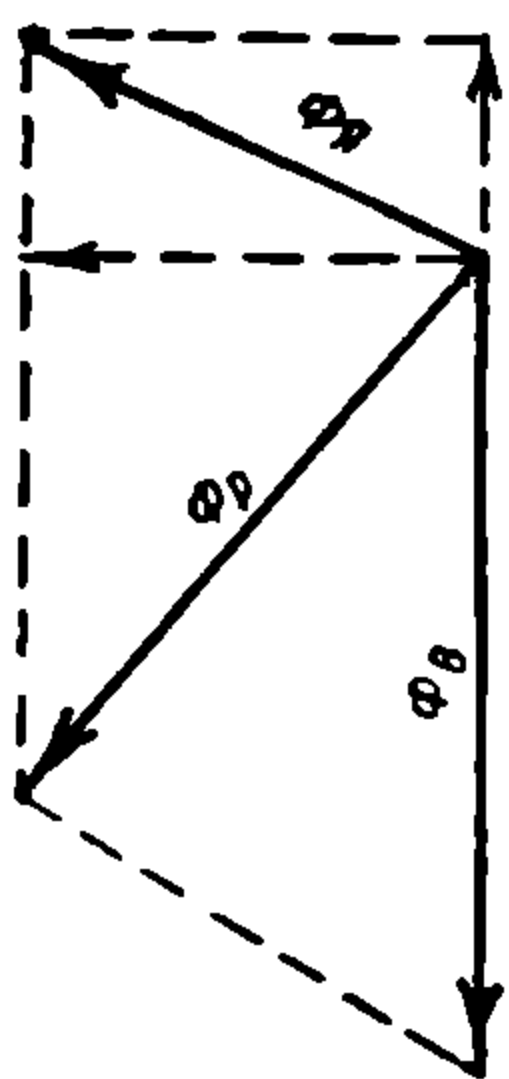


Рис. 56.

магничивать и ослаблять последний. В целях устранения вредного влияния магнитного потока якоря, кроме главных полюсов устраиваются дополнительные полюса, которые своим создаваемым магнитным потоком нейтрализуют вредное влияние реакции якоря и устраняют искажение магнитного потока главных полюсов и смещение нейтральной оси, а следовательно, и необходимость в перемещении щеток. В электродвигателях, применяемых в электрической тяге на железных дорогах, число пар главных полюсов равно двум; дополнительные полюса, в том же количестве, располагаются между главными полюсами.

Обмотки возбуждения дополнительных полюсов соединяются последовательно с обмотками якоря. Такое соединение дает, одновременно с изменением магнитного поля якоря, соответствующее изменение магнитного потока от дополнительных полюсов, который нейтрализует реакцию якоря.

Кроме того, дополнительные полюса значительно улучшают условия коммутации, компенсируя электродвижущую силу самоиндукции, которая появляется в секции обмотки якоря при прохождении ее через нейтральную ось. Изменением силы тока в секции обмотки якоря как по величине, так и по направлению, возбуждается электродвижущая сила самоиндукции, а также вызывается появление добавочных токов короткого замыкания.

Вследствие добавочных токов короткого замыкания, плотность тока под щеткой, перекрывающей не менее двух соседних коллекторных пластинок, не остается постоянной, а изменяется, при этом плотность тока будет больше в последующем сбегавшем краю щетки по ходу движения коллектора, чем в переднем набегающем краю щетки.

Вследствие увеличения плотности тока в последующем «сбегавшем» краю щетки увеличивается нагревание ее и коллекторных пластинок. Сильное нагревание вызывает искрение щеток. Если

искрение вызывается только накаливанием частиц щетки, то оно влечет за собой изнашивание ее; но при достижении большой плотности тока получается уже и разрушение коллекторных пластин, вследствие испарения их краев (коллекторных пластин).

При значительном напряжении может образоваться вольтова дуга между сбегающим краем щетки и смежной пластиной и получится так называемый круговой огонь на коллекторе.

Для устранения этих вредных для коллектора и щеток явлений необходимо в коммутируемой секции проводников якоря создать электродвижущую силу, которая нейтрализовала бы электродвижущую силу самоиндукции.

Устройством дополнительных полюсов в электродвигателе достигается возбуждение электродвижущей силы, которая парализует до известной степени электродвижущую силу самоиндукции коротко-замкнутого элемента якорной обмотки.

Таким образом дополнительные полюса устраняют влияние реакции якоря и улучшают коммутацию. Введение дополнительных полюсов имело большое значение в развитии электродвигателей постоянного тока, так как благодаря им представилась возможность повысить напряжение в электродвигателях до 1500 — 2500 в. В настоящее время все электродвигатели постоянного тока, независимо от напряжения, строятся с дополнительными полюсами.

Из электродвигателей переменного тока наибольшее распространение получили коллекторные электродвигатели однофазного тока и асинхронные электродвигатели трехфазного тока.

Коллекторные электродвигатели однофазного тока, имея также серийную характеристику, по своим тяговым свойствам сходны с электродвигателями серий постоянного тока, но отличаются схемой соединения обмоток возбуждения полюсов и обмоток якоря, а также конструкцией электродвигателя, в силу особенностей переменного тока.

Если питать переменным однофазным током электродвигатель серий постоянного тока, то он будет работать, так как одновременное изменение направления тока в обмотках возбуждения и обмотках якоря не изменяет направления вращения якоря, но при этом в работе электродвигателя появляются следующие недостатки.

1) понижение мощности электродвигателя, вследствие большого угла φ сдвига фаз, т. е. сдвига тока относительно напряжения, так как при переменном токе мощность равна $E \cdot J \cdot \cos \varphi$, где E — напряжение, J — сила тока, $\cos \varphi$ — коэффициент мощности;

2) образуется сильное искрение под щетками, вследствие того, что при прохождении каждой секции обмотки якоря под щеткой (секция обмотки будет замкнута на короткое), в ней индуктируется трансформаторная электродвижущая сила. Под влиянием трансформаторной электродвижущей силы в коротко-замкнутой секции будет проходить ток большой силы и при размыкании этого тока,

в момент схода щетки с коллектора, появляется сильное искрообразование;

3) происходит сильное нагревание корпуса, вследствие больших токов Фуко, вызванных переменным магнитным потоком возбуждения

Следовательно, в коллекторном однофазном электродвигателе должны быть приняты соответствующие мероприятия, устраняющие указанные выше недостатки.

Для повышения мощности коллекторного однофазного электродвигателя необходимо увеличение коэффициента мощности $\cos \varphi$.

Величина φ зависит от величины магнитных потоков обмоток возбуждения и якоря электродвигателя, вызывающих коэффициент

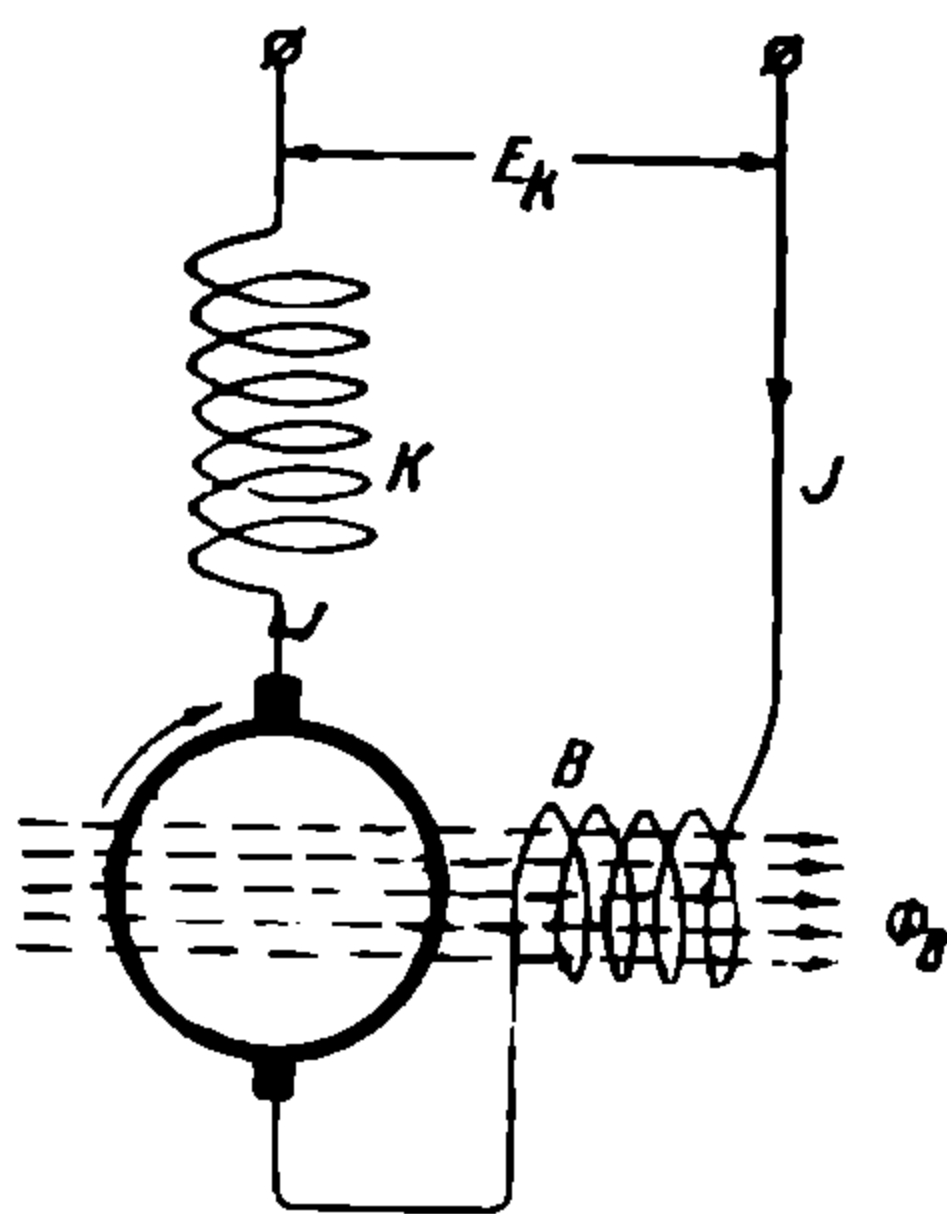


Рис. 57. Применение компенсирующей обмотки для уничтожения поля якоря.

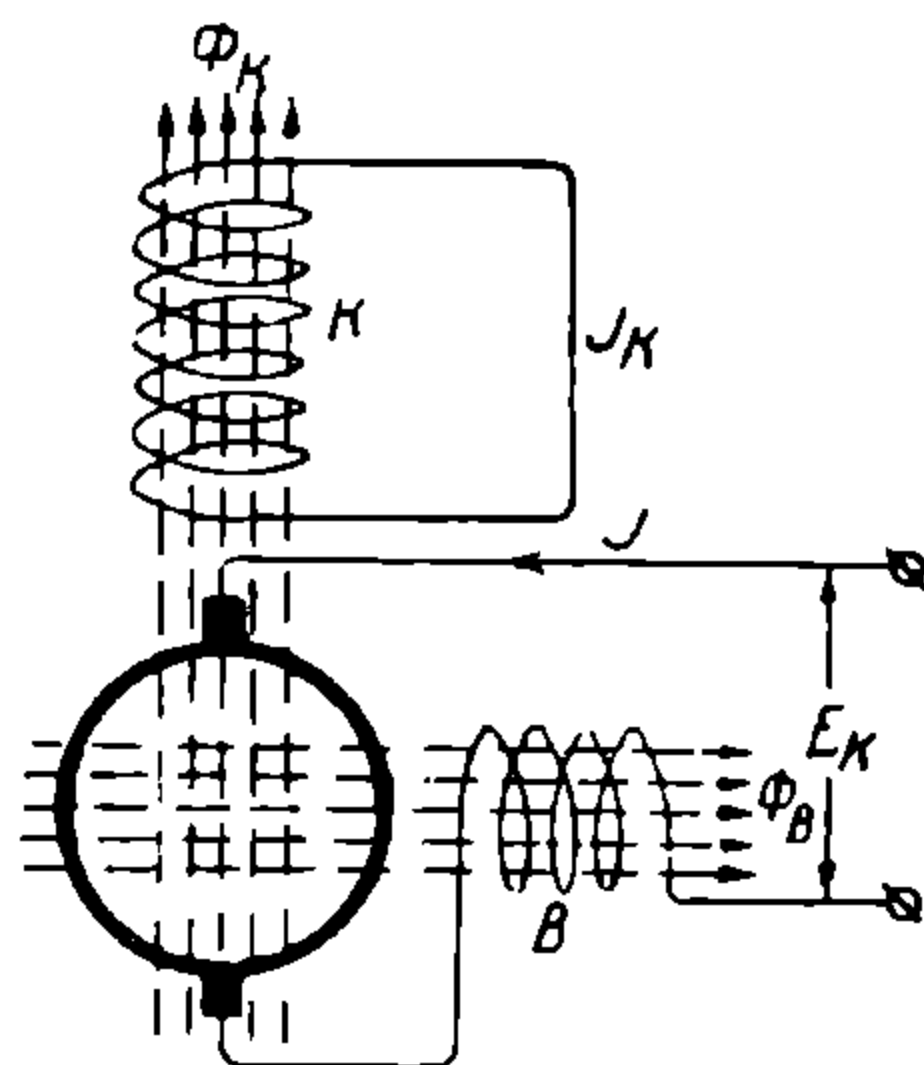


Рис. 58. Применение коротко-замкнутой компенсирующей обмотки.

самоиндукции цепи. Следовательно, уменьшение φ может быть произведено за счет уменьшения магнитного потока возбуждения и за счет полного уничтожения магнитного потока якоря.

Уничтожение влияния магнитного потока якоря на коэффициент мощности достигается применением особой компенсирующей обмотки K , ось которой расположена под прямым углом к оси обмотки возбуждения B (рис. 57).

Компенсирующая обмотка якоря может применяться или соединенной последовательно в цепи якоря, как указано на рис. 57, или замкнутой на себя (рис. 58).

Питание током компенсирующей обмотки K в этом случае происходит в силу трансформаторного действия магнитного потока якоря. Пульсирующий магнитный поток якоря вызовет в компенсирующей обмотке K ток I_K , сдвинутый по фазе с главным током электродвигателя на угол $\cong 180^\circ$, отчего создается магнитный поток Φ_K , противоположный магнитному потоку якоря Φ_A , почему вредное влияние магнитного потока якоря остается незначительным.

Магнитный поток обмоток возбуждения полюсов помимо коэффициента мощности оказывает вредное влияние также и на искрообразование на коллекторе. Причиной искрообразования на коллекторе, как указывалось ранее, является трансформаторная электродвижущая сила.

Величина трансформаторной электродвижущей силы, аналогично обыкновенным трансформаторам, определяется из выражения

$$E_{mp} = 4,44 \Phi_g \cdot N \cdot f \cdot 10^{-8} \text{ в},$$

где Φ_g — величина главного потока,

N — число витков в секции обмотки,

f — частота переменного тока, питающего электродвигатель. Уменьшение вредного влияния главного потока обмоток возбуждения как на коэффициент мощности, так и на искрообразование может быть достигнуто уменьшением величины силового потока каждого полюса за счет увеличения числа полюсов и уменьшения числа ампервитков обмоток возбуждения. В коллекторных электродвигателях однофазного тока число полюсов может достигать до 12, тогда как в электродвигателях серий постоянного тока число полюсов равно 4. Уменьшение числа ампервитков возможно лишь с уменьшением магнитного сопротивления электродвигателя, для чего междужелезное пространство (воздушный зазор между якорем и полюсами) делается возможно меньшим (до 3 мм), допустимым с механической точки зрения зазора. Это уменьшение воздушного зазора по сравнению с электродвигателем серий постоянного тока вызывает эксплуатационные недостатки, так как влечет за собой помимо более тщательного содержания и осмотра и более частый ремонт.

Уменьшение числа N витков в секции обмотки коллекторного электродвигателя обычно доводят до возможного предела 1÷2, т. е. присоединяют к коллектору каждый виток или два витка. Вследствие этого число коллекторных пластинок сильно увеличивается. Поэтому, чтобы не придавать огромных размеров коллектору, напряжение в электродвигателе допускается очень невысокое (не более 600 в).

Уменьшение числа m проводников якоря, дающее уменьшение числа коллекторных пластинок, может быть достигнуто за счет увеличения числа оборотов n якоря в минуту, что видно из выражения электродвижущей силы якоря

$$E_{\alpha} = 4,44 \cdot v' \cdot p \cdot \frac{n \cdot m \cdot \Phi_v}{60} \cdot 10^{-8} \text{ в},$$

где v' — коэффициент, зависящий от обмотки. Нормальная промышленная частота 50—60 пер/сек для коллекторных однофазных электродвигателей вызывает недопустимую величину трансформаторной электродвижущей силы и не может быть еще применена

на данной ступени развития техники в мощных коллекторных электродвигателях однофазного тока. В коллекторных электродвигателях однофазного тока в Европе допустимая частота принята $15—16\frac{2}{3}$ пер/сек, в Америке в большинстве электродвигателей — 25 пер/сек.

Помимо всех приведенных ранее мероприятий по уменьшению величины трансформаторной электродвижущей силы, в целях полного уничтожения последней, в коллекторных однофазных электродвигателях, так же как и в сериях постоянного тока, применяются дополнительные полюса.

Для уменьшения потерь в электродвигателе необходимо уменьшить влияние токов Фуко, что достигается выполнением статора однофазного коллекторного электродвигателя из листового железа.

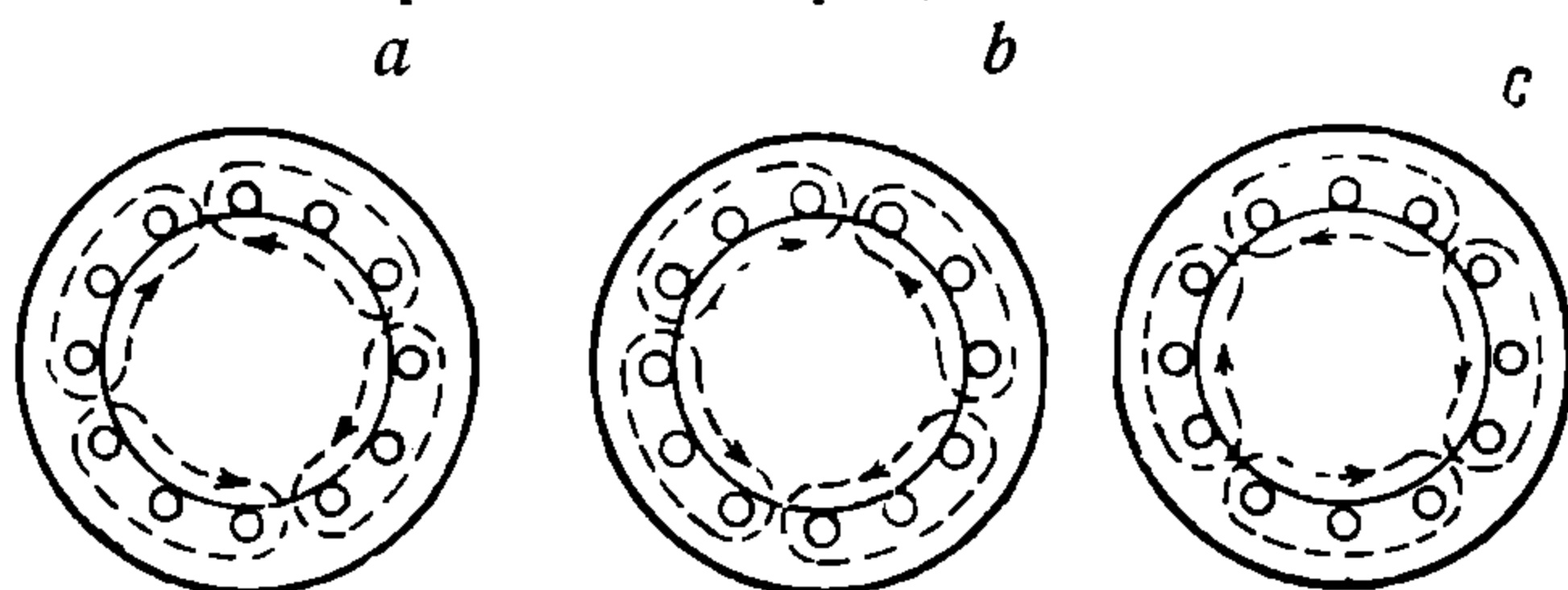


Рис. 59.

Асинхронный электродвигатель трехфазного тока состоит из неподвижного статора и вращающегося ротора. В отличие от электродвигателя серии постоянного тока и коллекторного однофазного тока асинхронный электродвигатель не имеет коллектора, который является самым слабым местом электродвигателей постоянного тока, а в особенности однофазного тока и подвергается довольно частым повреждениям.

Статор заключен в стальную станину и в образованном цилиндре на внутренней стороне его во впадинах закладывается статорная обмотка. Статорная обмотка состоит из катушек, число которых на каждый полюс кратно трем.

Так как по обмоткам статора проходит трехфазный ток, изменяющийся по направлению и смещенный по фазе на угол 120° , то при соответствующем расположении обмоток статора получается переменное намагничивание их, создается общее магнитное поле, перемещающееся по контуру расположения этих обмоток. Это вращающееся поле сохраняет свою полярность, т. е. имеет как бы вращение магнитных полюсов. На рис. 59 *a*, *b*, *c* приведены схемы образования вращающегося магнитного поля и его перемещения.

Скорость вращения магнитного потока пропорциональна частоте трехфазного тока и может быть определена из выражения:

$$\frac{n}{60} = \frac{f}{p},$$

где n — число оборотов магнитного потока в мин,
 p — число пар полюсов, образуемых статорной обмоткой;
 f — частота тока.

Ротор, являющийся подвижной частью асинхронного электродвигателя, делается в виде сплошного цилиндра из отдельных железных листов, на котором и помещаются обмотки, соединенные звездой.

Обмотки по концам ротора выведены к трем кольцам, насаженным на валу электродвигателя, к которым, с помощью скользящего контакта (щетki), может быть приключен трехфазный реостат, необходимый в момент пуска. Обмотки ротора и обмотки статора независимы, так как электрического соединения их не существует. На рис. 60 приводится схема расположения обмоток ротора и статора.

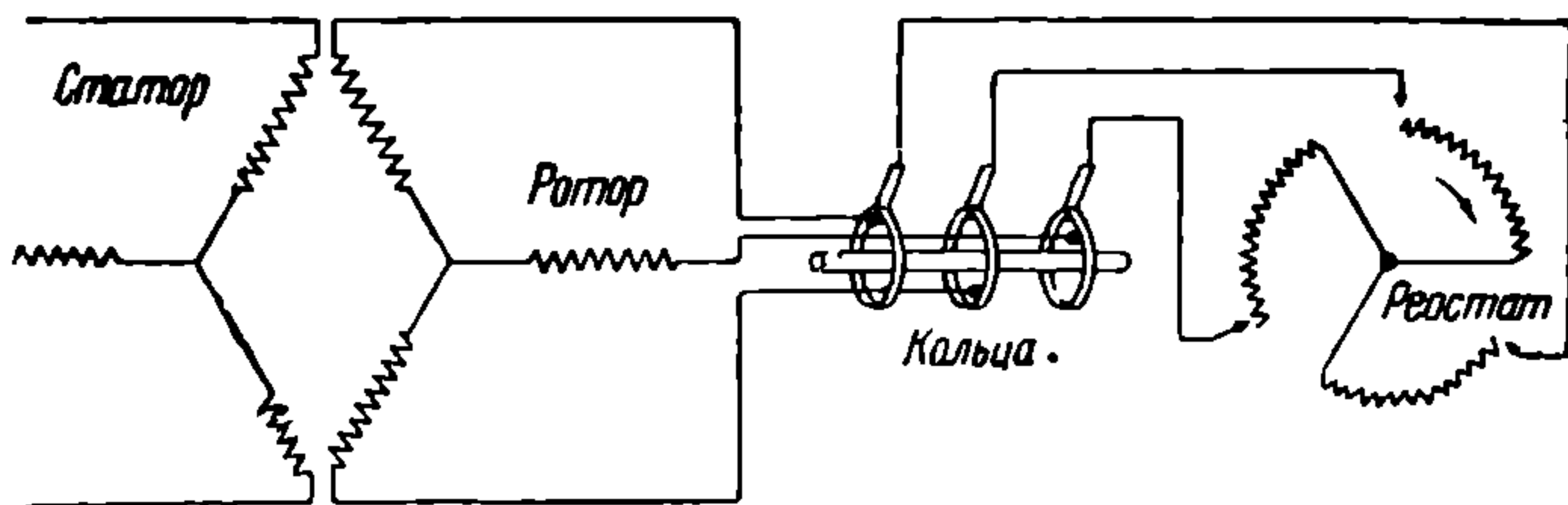


Рис. 60.

Вращающийся магнитный поток, создаваемый обмотками статора, пересекая своими силовыми линиями обмотки ротора, создает в обмотках ротора ток.

Электродвижущая сила, создаваемая в роторе, может быть определена из выражения:

$$E_p = 4,44\Phi \cdot m \cdot f \cdot 10^{-8},$$

где Φ — магнитный поток,
 m — число витков ротора,
 f — частота тока в роторе.

С появлением тока в обмотке ротора, последний придет во вращение в ту же сторону, в какую вращается магнитный поток, но с числом оборотов несколько меньшим, чем магнитный поток. Получается явление, называемое скольжением, т. е. отставание вращения ротора от вращающегося потока.

$$\text{Величина скольжения } S = \frac{n - n'}{n},$$

где n — число оборотов вращающегося магнитного потока, равное

$$n = \frac{60 \cdot f}{p}$$

n' — число оборотов ротора.

Величина числа оборотов ротора через величину скольжения может быть выражена следующим уравнением:

$$n' = n(1 - S) = \frac{60 \cdot f}{p}(1 - S),$$

т. е. число оборотов ротора пропорционально числу периодов и обратно пропорционально числу полюсов.

Величина S незначительна (не превышает 0,06), а поэтому число оборотов ротора почти не меняется от нагрузки.

§ 15. Понятие о конструкции тяговых электродвигателей постоянного тока

В конструктивном отношении тяговые электродвигатели разделяются на две группы.

Электродвигатели, находящиеся внутри кузова электровоза, и электродвигатели, расположенные под кузовом электровоза. Так как в электровозах постоянного тока наибольшее применение получила индивидуальная зубчатая передача с трамвайной подвеской электродвигателей, наибольшее распространение имеют электродвигатели, располагаемые под кузовом электровоза. Конструкция этих тяговых электродвигателей должна быть такой, чтобы, с одной стороны, не превышать определенных габаритных размеров и иметь детали для подвески, а с другой, — электродвигатель должен быть заключен в корпус — кожух, для защиты от попадания в него пыли, воды, грязи, являющихся причиной частых повреждений. Мощность тяговых электродвигателей, ограничиваемая габаритными условиями, в сильной степени зависит от системы вентиляции, принятой для охлаждения нагревающихся в работе его частей.

Корпус или кожух электродвигателя может быть как цельным, так и разъемным, состоящим из двух половинок. При цельном неразъемном корпусе для ремонта электродвигателя необходимо снятие его. Цельный корпус осложняет условия осмотра и ремонта электродвигателя, но зато с другой стороны обеспечивает сохранность от попадания в электродвигатель воды, пыли и грязи.

Разъемный корпус, давая возможность более частого производства осмотра якоря, требует очень тщательного соединения половинок, которое все же не гарантирует от возможного проникновения пыли и воды.

В верхней части корпуса как цельного, так и разъемного устраивается отверстие для очистки коллектора и для осмотра щеток.

Применяется как одна, так и другая конструкция корпуса, так как каждая из них имеет свои преимущества и недостатки. Преимущественное распространение имеют электродвигатели с цельным неразъемным корпусом.

На рис. 61 приведен общий вид тягового электродвигателя ДПЭ-340 завода Динамо с цельным корпусом принятого на сурамских электровозах.

С каждой стороны на оси вала электродвигателя находятся зубчатки, которые через большие зубчатки, укрепленные на оси ската электровоза, передают механические усилия от электродвигателя на скаты электровоза. В корпусе электродвигателя имеются приливы для подшипников, при помощи которых с одной стороны он опирается на ось ската. С другой стороны корпуса имеется выступающая консоль, посредством которой через систему

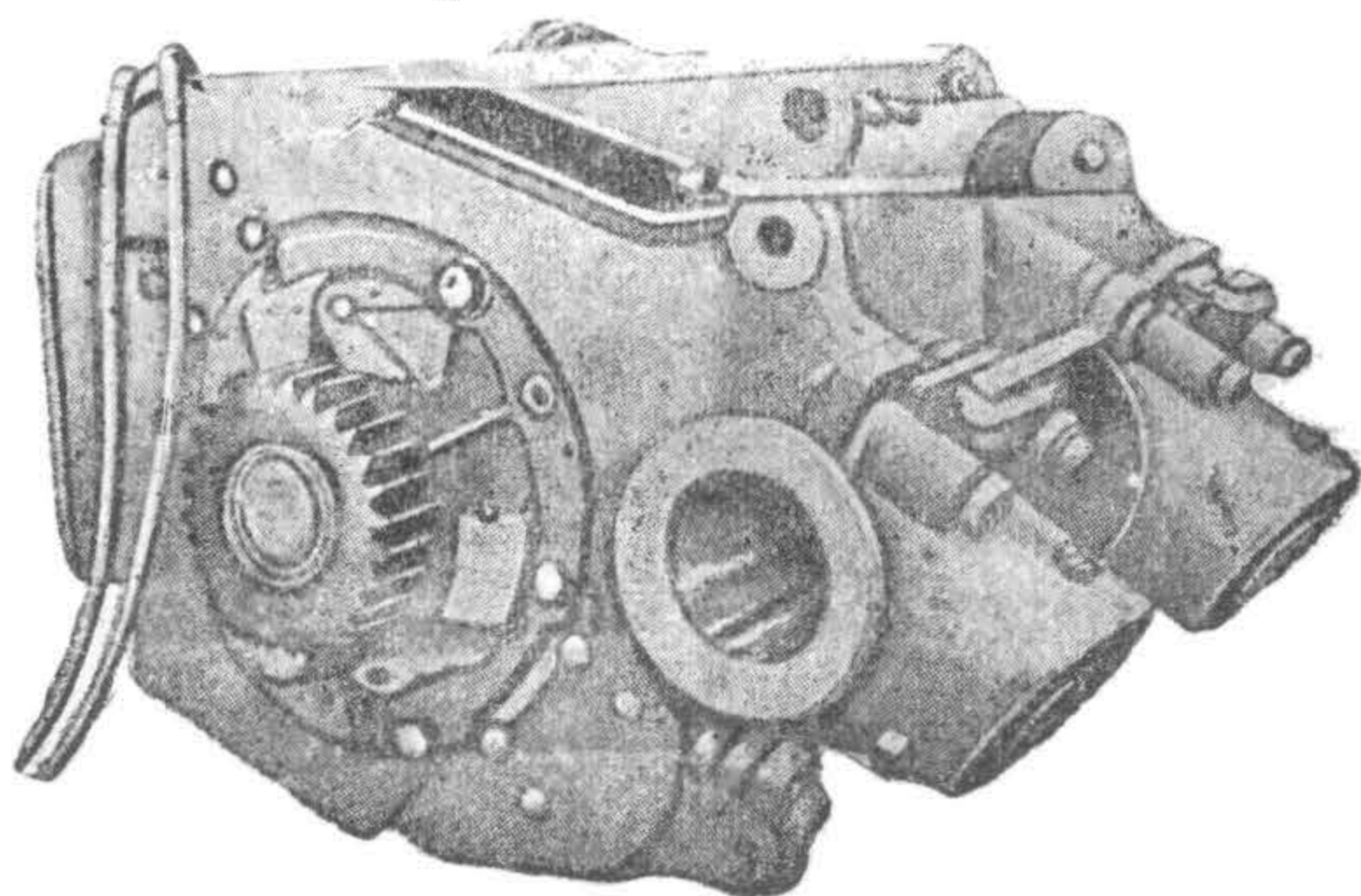


Рис. 61. Общий вид электродвигателя ДПЭ-340.

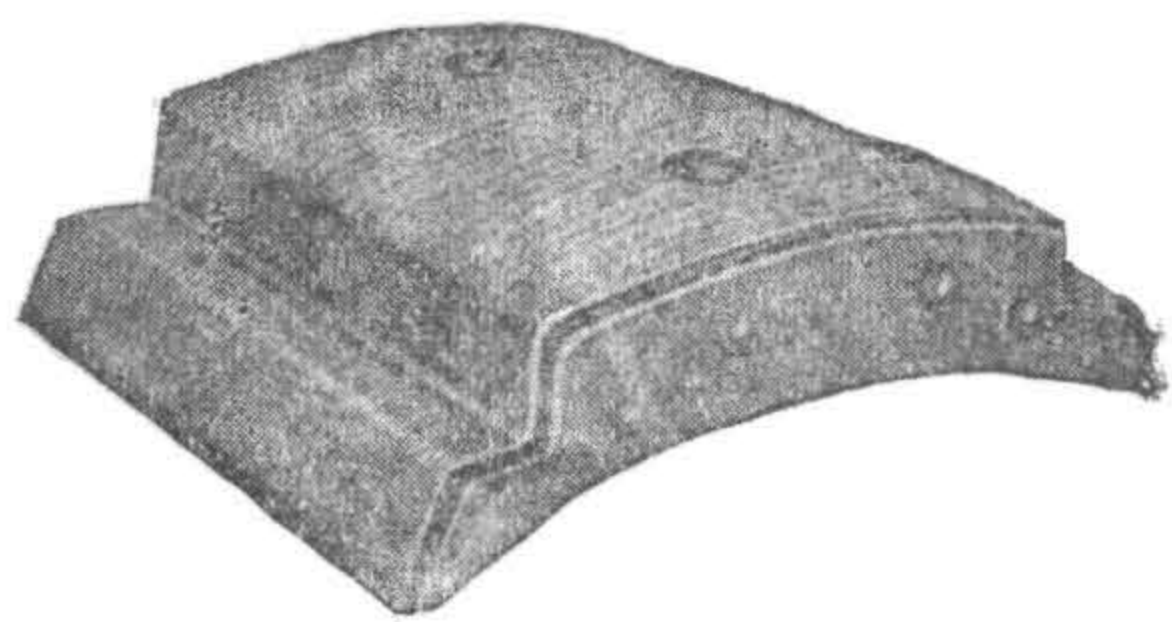


Рис. 62. Сердечник главного полюса электродвигателя ДПЭ-340.

рессор он опирается на раму тележки. Корпус ДПЭ-340 восьмигранный, сделан из литой стали с приливами под главные полюса. В электродвигателе имеются четыре главных полюса и четыре дополнительных. Главные полюса расположены по вертикали и горизонтали, а дополнительные размещены под углом в 45° к вертикали. Сердечники главных полюсов изготавливаются из отдельных листов литого железа или стали, толщиной до 5 мм, с устройством между железными пластинками изолирующих слоев, и стягиваются болтами или заклепками.

На сердечник полюса надевается намагничивающая катушка (обмотка возбуждения), обмотка которой состоит из полосовой меди с изоляцией из миканита. На рис. 62 приведен сердечник главного полюса, а на рис. 63 — намагничивающая катушка.

Сердечник главного полюса с надетой намагничивающей катушкой прикрепляется к корпусу при помощи болтов. Сердечники дополнительных полюсов делаются цельными из литого железа или стали. На них также одеваются соответствующие им намагничивающие катушки. Наиболее ответственной частью в общей конструкции электродвигателя являются якорь и коллектор. Якорь электродвигателя делается из колец тонкого динамного железа, толщиной до 0,7 мм, между которыми устраиваются изолирующие слои лаком или бумагой. В набираемых листах имеются впадины

(вырезы) для помещения обмоток (проводников) якоря. Тонкое кольцевое железо из отдельных листов, образующих якорь, насаживается не непосредственно на вал, а на особую втулку, благодаря чему облегчается возможность снятия якоря с вала. Якорные обмотки изготавливаются из медных полос прямоугольного сечения. При помещении обмоток в пазы впадины якоря, последние

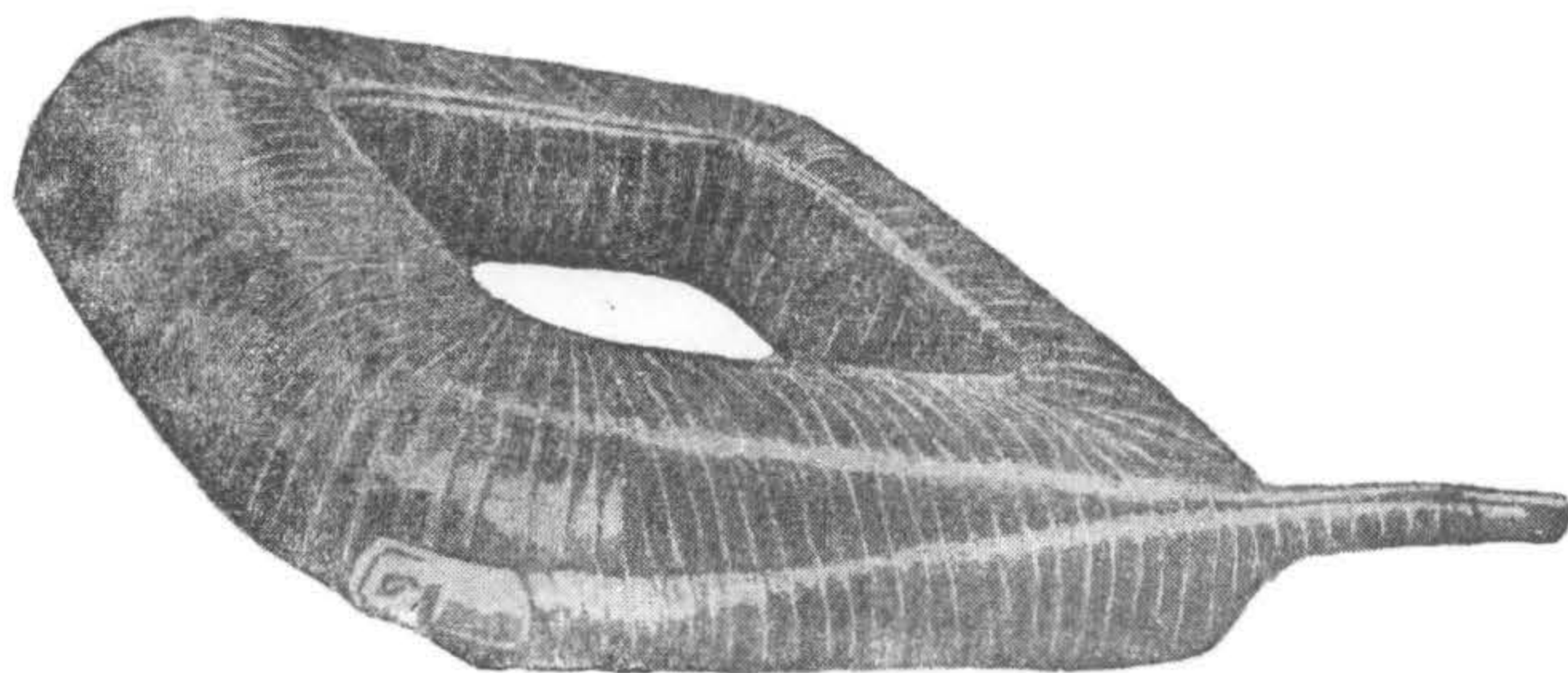


Рис. 63. Катушка главного полюса электро двигателя ДПЭ-340.

сверху закрываются лентероидом или прессшпаном. Заклинивание уложенных в пазы обмоток производится клиньями из бакелита или стягивается 8—10 бандажными кольцами. Подвод тока из внешней цепи к обмоткам якоря производится посредством щеток через коллектор. Коллектор делается из листовой или кованой меди. Между пластинками коллектора в качестве изоляции служит слюда.

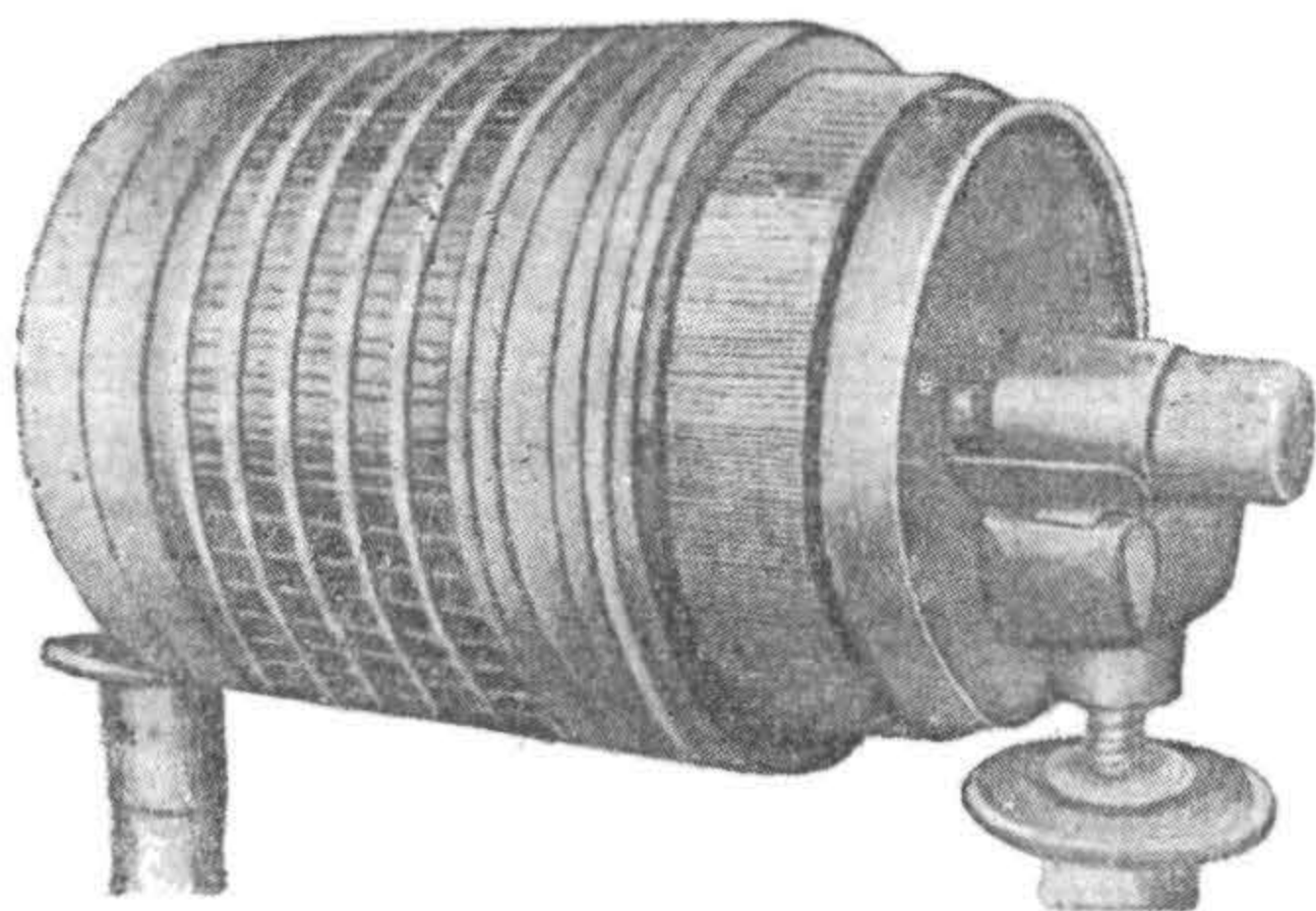


рис. 64. Якорь с коллектором электро-двигателя ДПЭ-340.

Внутри якоря имеются отверстия — вентиляционные каналы. На рис. 64 приводится общий вид изготовленного на заводе якоря с коллектором электродвигателя ДПЭ-340.

§ 16. Электромеханические характеристики тяговых электродвигателей постоянного тока

Электромеханическими рабочими характеристиками электродвигателя называются характеристики, показывающие зави-

симость между электрическим режимом работы электродвигателя и получающимися при этом механическими свойствами на валу электродвигателя.

Основными данными, характеризующими режим работы электродвигателя с электрической и механической сторон, являются:

- 1) напряжение E на зажимах электродвигателя,

- 2) сила тока J , поступающего в него,
- 3) скорость вращения якоря, которая выражается числом n оборотов его в минуту,
- 4) вращающий момент M , развиваемый двигателем на валу.

Следовательно электромеханические характеристики устанавливают зависимость $n = f(J)$ и $M = f(J)$.

а) Скорость вращения якоря

В серийных электродвигателях, как указывалось ранее, обмотки возбуждения полюсов находятся в последовательном соединении с обмотками якоря. При прохождении тока в обмотках возбуждения создается магнитный силовой поток Φ , величина которого с увеличением силы тока J увеличивается. Эта зависимость выражается кривой, вид которой изображен на рис. 65.

Эта кривая состоит из прямолинейного участка Oa , характеризующего, что магнитная система электродвигателя не насыщена, и криволинейного участка ab , показывающего постепенное насыщение магнитной цепи.

При вращении якоря в магнитном поле, в обмотках его появляется противодействующая электродвижущая сила E_{np} . Величина противоэлектродвижущей силы E_{np} определяется из выражения:

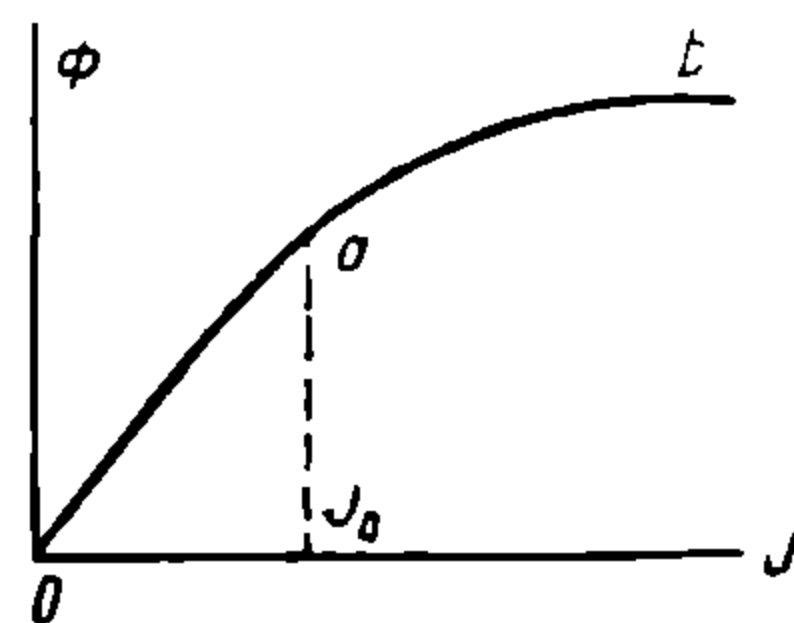


Рис. 65

$$E_{np} = \frac{p \cdot \Phi \cdot m \cdot n \cdot 10^{-8}}{a \cdot 60} \text{ вольт,}$$

где:

- p — число пар полюсов,
- m — число последовательно-соединенных проводников якоря,
- a — число пар параллельных ветвей якорной обмотки,
- n — число оборотов якоря в мин.

Обозначая постоянную для данного электродвигателя величину

$$\frac{p \cdot m \cdot 10^{-8}}{a \cdot 60} \text{ через } k$$

получаем:

$$E_{np} = k \cdot \Phi \cdot n.$$

Откуда скорость вращения электродвигателя

$$n = \frac{E_{np}}{k \cdot \Phi}.$$

Если обозначим через E напряжение на зажимах электродвигателя, через R —общее омическое сопротивление обмоток возбуждения и проводников якоря $R = R_a + R_{я}$, а через J силу тока в якоре, то величина

$$E_{np} = E - JR;$$

подставляя значение E_{np} в приведенное ранее выражение, получим

$$n = \frac{E - JR}{k \Phi}.$$

Величина магнитного потока Φ , как видно из кривой намагничивания (рис. 65), увеличивается с увеличением силы тока не одинаково. До магнитного насыщения, т. е. до какой то величины силы тока J_a магнитный поток Φ прямо пропорционален силе тока и может быть выражен как $\Phi = bJ$, где b — коэффициент. При величинах силы тока $J > J_a$, магнитный поток Φ будет увеличиваться медленнее.

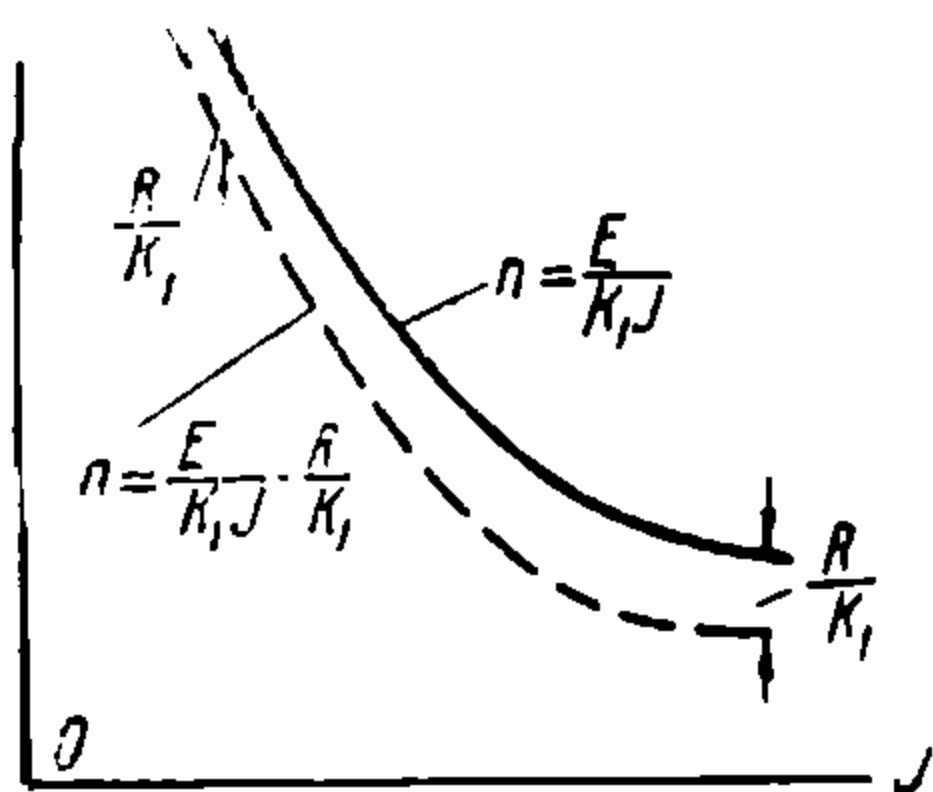


Рис. 66

Для анализа кривой $n = f(J)$ и установления влияния на нее различных факторов, как-то: различных величин силы тока, омического сопротивления обмоток возбуждения и якоря, а также реакции последнего рассмотрим характер кривой $n = f(J)$ при нескольких предположениях:

1) Величина силы тока $J < J_a$, омическое сопротивление обмоток возбуждения и якоря $R = 0$, влияние реакции якоря отсутствует.

Уравнение скоростной характеристики будет иметь вид

$$n = \frac{E}{k\Phi} = \frac{E}{k \cdot b \cdot J} = \frac{E}{k_1 J}.$$

2) Для тех же условий, но величина омического сопротивления обмоток возбуждения и проводников якоря R не равна 0.

Тогда

$$n = \frac{E - JR}{k\Phi} = \frac{E - JR}{k_1 J} = \frac{E}{k_1 J} - \frac{JR}{k_1 J} = \frac{E}{k_1 J} - \frac{R}{k_1}.$$

Скоростные характеристики в первом и втором случаях изображены на рис. 66.

Для первого случая кривая $n = f(J)$, определяемая из выражения

$$n = \frac{E}{k_1 J},$$

является гиперболической кривой. Учитывая же омические сопротивления обмоток, кривая $n = f(J)$, определяемая выражением

$$n = \frac{E}{k_1 J} - \frac{R}{k_1},$$

расположена ниже на величину $\frac{R}{k_1}$

3) Несмотря на устройство дополнительных полюсов, в целях уничтожения влияния реакции якоря, в действительности же электродвигатель имеет реакцию якоря с большим или меньшим ослаблением магнитного потока при нагрузке. Так как число оборотов якоря обратно пропорционально магнитному потоку, то ослабление его в силу реакции якоря увеличивает число оборотов якоря и кривая в этом случае будет еще выше приведенных ранее кривых. Рассмотренные случаи относятся к значениям $J < J_a$. При значениях же силы тока $J > J_a$ магнитный поток, как видно из кривой намагничивания (рис. 65), возрастает более медленно, а следовательно кривая $n = f(J)$ будет более пологой.

В электродвигателях с шунтовой характеристикой (так как обмотки возбуждения находятся в параллельном соединении) сила тока, поступающая в обмотки возбуждения, остается без изменения, а следовательно и магнитный поток не изменяется.

Вследствии этого в электродвигателях с шунтовой характеристикой число оборотов почти постоянно. Незначительное уменьшение числа оборотов с увеличением силы тока вызывается лишь реакцией якоря.

б) Вращающий момент на валу электродвигателя

Обозначив вращающий момент на валу электродвигателя через M (кгм), угловую скорость вращения якоря через ω (об/сек), механическая мощность, развиваемая якорем на валу электродвигателя, выразится следующим уравнением

$$N^6 = \frac{M \omega}{75} \text{ л. с.},$$

где угловая скорость вращения

$$\omega = \frac{2\pi \cdot n}{60} \text{ (об/сек)}.$$

Подставляя значения ω

получаем
$$N^6 = \frac{M \omega}{75} = \frac{M \cdot 2\pi \cdot n}{75 \cdot 60} = \frac{M \cdot n}{716} \text{ (л. с.)}.$$

С другой стороны, величина мощности может быть выражена следующим уравнением

$$N^6 = \frac{(E - JR) \cdot J \cdot \eta_{эм}}{100 \cdot 0,736} \text{ л. с.},$$

где $\eta_{эм}$ — коэффициент полезного действия, учитывающий магнитные и механические потери в якоре.

Из равенства этих двух выражений мощности, величина вращающего момента на валу электродвигателя определится следующим уравнением

$$M = \frac{(E - JR) J \cdot \eta_{эм}}{1000 \cdot 0,736} \frac{716}{n} \text{ (кгм)}.$$

Так как $E - JR = E_{np}$, а $E_{np} = k\Phi n$, то подставляя в выражение вместо $E - JR$ величину $k\Phi n$ получаем

$$M = \frac{k\Phi n J \cdot \eta_{эм} \cdot 716}{736 n} \text{ (кгм)}.$$

Заменяя

$$\frac{716 k \eta_{эм}}{736} \text{ через } k_2$$

имеем:

$$M = k_2 J_\pi \Phi.$$

Так как магнитный поток Φ в различных пределах изменения силы тока изменяется различно (рис. 65), то характер изменения кривой $M = f(J)$ будет неодинаков.

В пределах прямолинейной части кривой намагничивания, т. е. при значениях силы тока $J < J_a$ кривая $M = f(J)$ является параболой, так как $\Phi = b \cdot J$ и $M = k_2 J \cdot J \cdot b = k_2 b \cdot J^2 = k_3 J^2$ (рис. 67).

При значениях силы тока $J > J_a$, так как тяговые электродвигатели работают с некоторым насыщением магнитной системы, изменение вращающего момента на валу якоря будет изображаться кривой ac , приведенной на рис. 67.

По установленным характеристикам $n = f(J)$ и $M = f(J)$ легко может быть построена кривая изменения мощности на валу электродвигателя в функции силы тока.

Мощность на валу электродвигателя, как указано ранее, равна

$$N^e = \frac{M \cdot n \cdot 0,736}{716} = \frac{M \cdot n}{974} \text{ (квт)}.$$

Коэффициент же полезного действия электродвигателя определится из отношения мощности, развиваемой электродвигателем на валу, к мощности, полученной электродвигателем от источника питания энергией.

Подведенная к электродвигателям мощность равна

$$E \cdot J \cdot 10^{-3} \text{ квт}.$$

Коэффициент полезного действия электродвигателя равен

$$\eta_{эм} = \frac{M \cdot n \cdot 1000}{974 \cdot E \cdot J} = 0,974 \frac{M \cdot n}{E \cdot J}.$$

Потери мощности в электродвигателе слагаются из:

- 1) потерь в электрической цепи электродвигателя, т. е. потерь от сопротивления обмоток;
- 2) потерь в магнитной цепи электродвигателя, т. е. потерь от гистерезиса и токов Фуко;
- 3) механических потерь.

Потери в электрической цепи от сопротивления в обмотках полюсов и якоря выражаются произведением $RJ \cdot J = RJ^2$, где RJ характеризует падение напряжения в обмотках полюсов и якоря. К этим потерям кроме того относятся потери в контакте щеток и коллектора, но величина этих потерь по сравнению с потерями в обмотках полюсов и якоря незначительна.

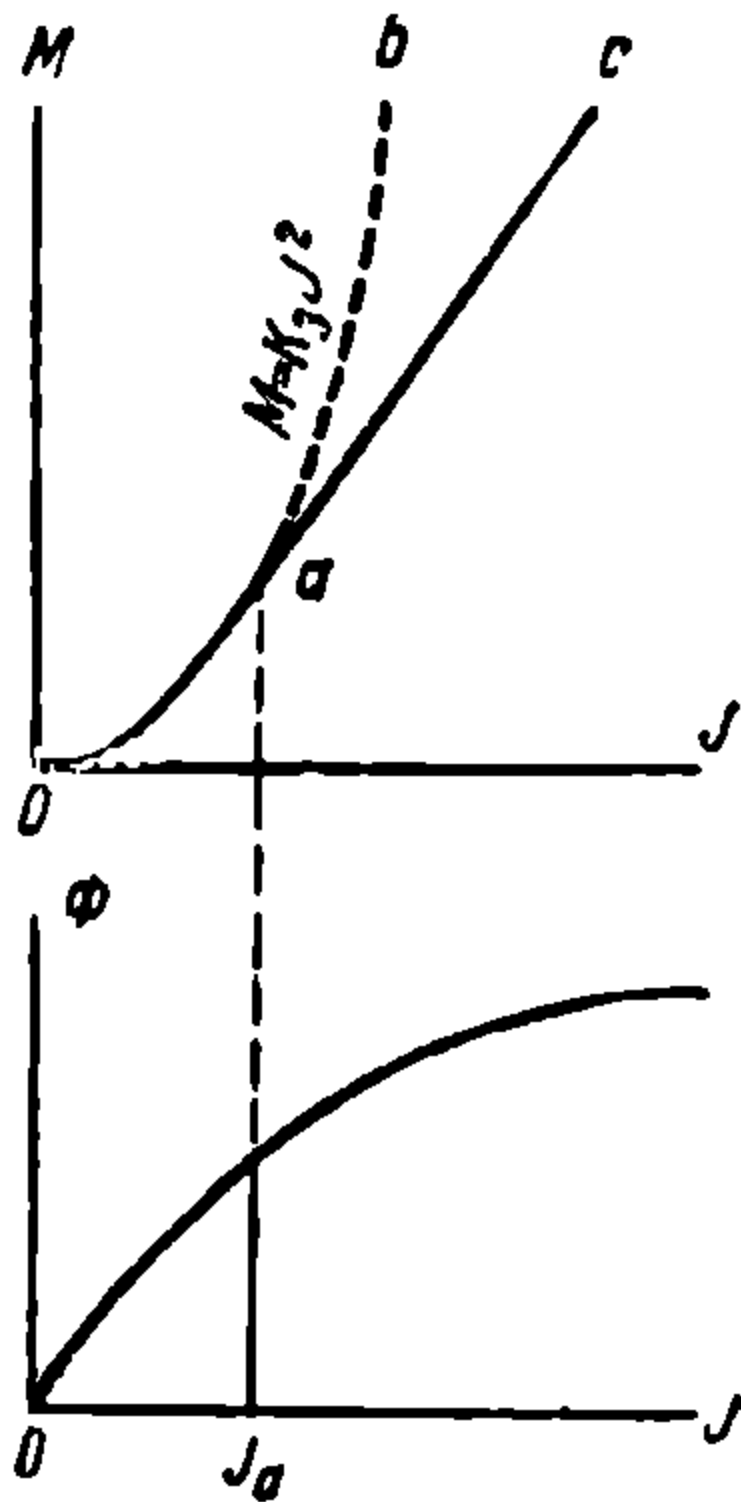


Рис. 67

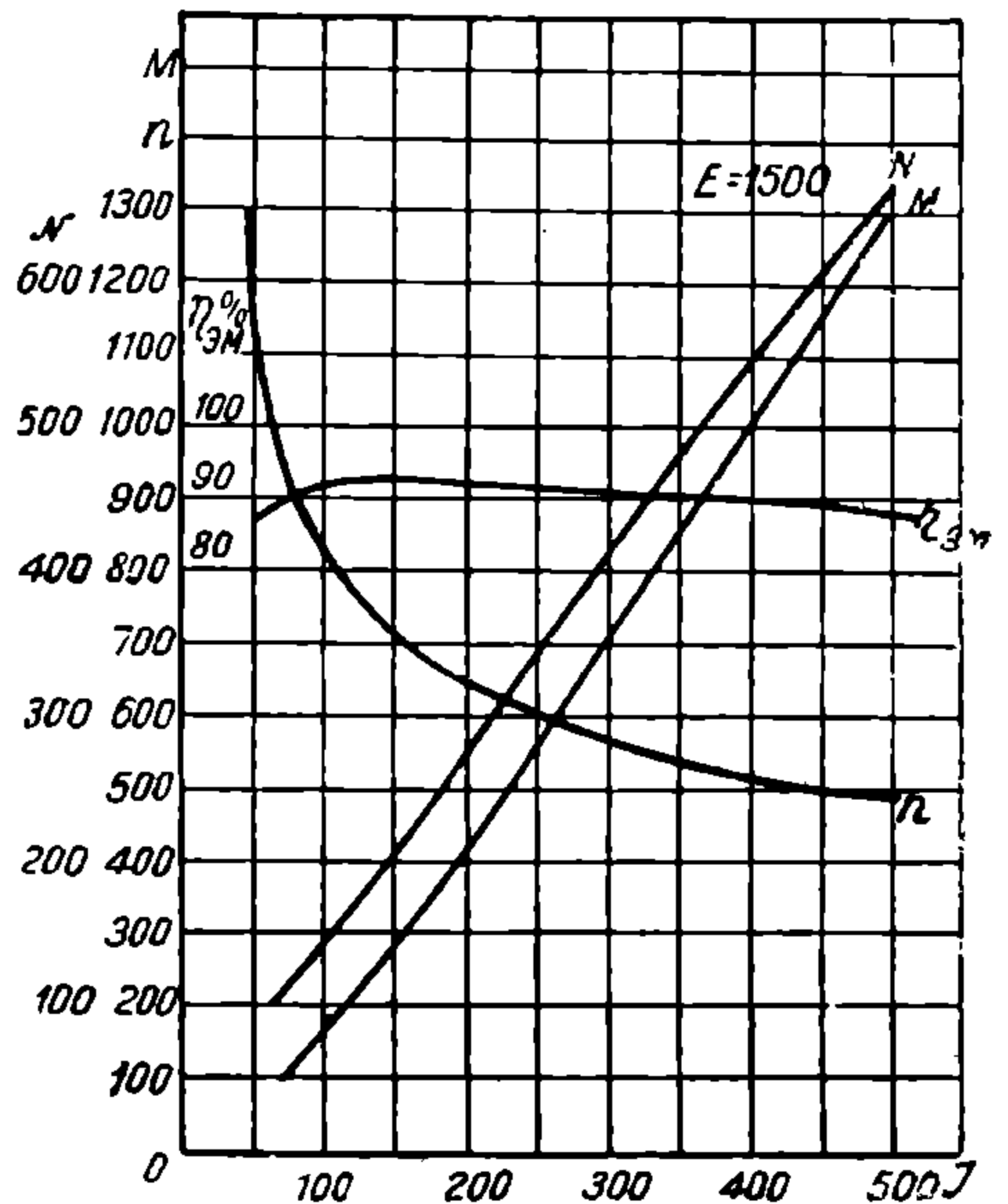


Рис. 68. Электромеханические характеристики электродвигателя ДПЭ-340.

Магнитные потери определяются обычно опытным путем и зависят от изменения магнитной индукции, от изменения числа периодов намагничивания и объема железа и возрастают с увеличением их.

Механические потери изменяются в зависимости от скорости, увеличиваясь с увеличением последней.

На рис. 68 в виде кривых приведены все электромеханические характеристики тягового электродвигателя серии (ДПЭ-340).

Электромеханические характеристики для каждого типа электродвигателя устанавливаются заводом на основании испытаний.

§ 17. Мощность электродвигателя

Полезная мощность на валу электродвигателя равна

$$N^e = E \cdot J \cdot \eta_{эм} \cdot 10^{-3} \text{ (квт)}.$$

Величина E напряжения на зажимах электродвигателя зависит от принятого напряжения в контактом проводе и схемы электрического соединения в работе всех электродвигателей, установлен-

ных на электровозе, и для данного электродвигателя в нормальном рабочем состоянии может быть принята постоянной величиной.

Величина силы тока, которая может быть получена от источника питания, мощность которого по сравнению с электродвигателем очень велика, практически не ограничена. Следовательно, мощность электродвигателя по источнику не имеет ограничения.

Ограничение мощности электродвигателя происходит не по источнику энергии, а по условиям исправной и надежной работы отдельных частей конструкции электродвигателя.

Наибольшая кратковременно допустимая сила тока, а следовательно, наибольшая кратковременная мощность, которая может быть получена от тягового электродвигателя, ограничивается условиями коммутации, т. е. условием недопущения искрения щеток и избежания образования кругового огня на коллекторе и разрушения последнего. Тот наибольший ток, при незначительном увеличении которого появляется уже интенсивное искрение щеток, являясь как бы предупредительным в образовании кругового огня на коллекторе, называется максимальным током электродвигателя, а соответствующая ему мощность, — максимальной мощностью электродвигателя. Дальнейшие ограничения мощности при меньших величинах силы тока, но при увеличенной продолжительности действия их, определяются условиями нагревания обмоток полюсов и, главным образом, обмоток якоря электродвигателя. Как известно, прохождением тока по проводнику вызывается нагревание. Величина температуры нагрева зависит и от величины силы тока и от продолжительности действия его. Следовательно, ограничение мощности тяговых двигателей будет определяться не только величиной силы тока, но и продолжительностью действия его, т. е. продолжительностью развиваемой мощности.

По международным нормам установлены следующие виды мощностей электродвигателя:

а) длительная или, как часто называют, продолжительная мощность электродвигателя, которую он может развивать непрерывно достаточно продолжительное время, не превосходя допустимых по условиям изоляции пределов нагревания обмоток;

б) часовая, или нормальная, мощность, которую электродвигатель может развивать непрерывно в течение одного часа, не превосходя допустимых по условиям изоляции пределов нагревания обмоток.

в) мгновенная, или максимальная, мощность которую электродвигатель может развивать кратковременно без превышения допустимых пределов нагревания обмоток и не допуская искрообразования на коллекторе.

Величины этих мощностей устанавливаются заводом, изготовляющим электродвигатели на основании их испытания, и проверки на искрообразование коллектора и на нагревание обмоток якоря.

Наибольшая безопасно допустимая температура в обмотках зависит от рода изоляции, т. е. от прочности и стойкости против нагревания тех материалов, которые применяются для нее. Различаются по роду материалов два класса изоляции. Класс изоляции А, где в качестве материалов применяются хлопчатая бумага, шелк и обработанная бумага; класс изоляции В, где в качестве материалов применяются слюда, асбест и миканит.

Величина предельно допустимой температуры устанавливается также в зависимости от способа измерения ее: по термометру или на основании измерения сопротивления обмоток. Американским институтом инженеров-электриков установлены следующие нормы предельно допустимых температур, приведенные в таблицы 13.

Таблица 13

Класс изоляции материала	Температура (в градусах Цельсия) обмоток при длительной работе (не менее 10 часов)	
	По термометру	По сопротивл. обмотки якоря
А	85	110
В	100	130

У нас IX всесоюзным Электротехническим съездом установлены следующие нормы допустимого превышения температуры при температуре наружного воздуха 25°С, приведенные в таблице 14 (стр. 108).

В электродвигателях мощных электровозов применяется исключительно изоляция класса В.

Из приведенных данных видно, что величина допускаемого превышения температуры двигателя над температурой окружающего воздуха будет зависеть также от температуры последнего, с увеличением которого будет уменьшаться, и наоборот.

Величина допустимого превышения температуры в обмотках якоря над температурой окружающего воздуха называется сверхтемпературой.

Интенсивность повышения температуры обмоток двигателя помимо величины силы тока зависит также и от принятой для данного электродвигателя системы вентиляции, т. е. от отвода из кожуха электродвигателя тепла, получающегося вследствие нагревания обмоток якоря и других частей. Тяговые электродвигатели устраиваются как с естественной, так и с искусственной вентиляцией. В электродвигателях с естественной вентиляцией, называемых самовентилирующими, вентиляция осуществляется насаженным на валу якоря вентилятором, который засасывает воздух непосредст-

Таблица 14

Мощность	Часть двигателя	Изоляция	Методы измерения	Допускаемое превышение температуры при температуре воздуха в 25°Ц
Продолжительная мощность	Обмотка якоря и магнитов (полюсов)	Класс А {	по термометру по сопротивлению	65 85
		Класс В {	по термометру по сопротивлению	85 105
	Кольца и коллектор	Класс А и В	по термометру	85
Часовая мощность	Обмотка якоря и магнитов	Класс А {	по термометру по сопротивлению	75 100
		Класс В {	по термометру по сопротивлению	95 120
	Кольца и коллектор	Класс А и В	по термометру	90

венно снаружи через отверстия, устраиваемые в корпусе электродвигателя, и прогоняет потоки воздуха через каналы в железе якоря, а также между полюсами и якорем.

В электродвигателях с искусственной вентиляцией, называемой часто независимой, охлаждающий воздух, независимо от работы электродвигателя, поступает в электродвигатель от специального мотор-вентилятора, устанавливаемого в кузове электровоза, и с большой скоростью прогоняется через каналы в якоря и между полюсами и якорем.

Применение той или другой системы вентиляции влияет как на общую мощность электродвигателя, так и на величины отношений между различными мощностями длительной, часовой и мгновенной.

Кроме того, система вентиляции влияет также и на вес тяговых электродвигателей, приходящихся на единицу мощности.

Для характеристики влияния системы вентиляции на отношение мощностей часовой к длительной, а также и на вес электродвигателя, приходящейся на единицу мощности, в таблице 15 приводятся данные применительно к электродвигателям с часовой мощностью около 200 л. с. при напряжении на коллекторе 750 в.

Таблица 15

Система вентиляции	Без вентиляции	Самовентилируемая (естеств. вентиляция)	Искусственная вентил. Независимая
Отношение часовой мощности к длительной	от 2,5 до 3	От 1,9 до 2,1	От 1,15 до 1,25
Вес, приходящийся на 1 л. с. часовой мощности	15 — 17 кг	„ 14 — 15 кг	„ 11 — 13 кг
Вес, приходящийся на 1 л. с. длительной мощности	„ 43 — 48 „	28 — 32	13 — 16 „

Как видно из данных приводимой таблицы наименьшее соотношение между часовой и длительной мощностью, а также наименьший вес электродвигателя, приходящийся на единицу мощности, приходится для электродвигателей с искусственной независимой вентиляцией.

Так как тяговые электродвигатели, устанавливаемые на электро-возе, бывают большой мощности и работают в некоторых случаях с величиной мощности, находящейся между длительной и часовой, то в них, в целях уменьшения веса электродвигателя на единицу мощности с одной стороны, и уменьшения отношения между часовой и длительной мощностью,—с другой стороны, применяется исключительно искусственная независимая вентиляция.

В электродвигателях, применяемых в мотор-вагонной тяге, вследствие того, что наиболее тяжелыми условиями их работы являются при частых остановках трогания с места соответствующие режиму часовой и максимальной мощности, а также вследствие вообще меньшей их мощности, такой необходимости в устройстве искусственной вентиляции, как в электровозах, нет.

Поэтому, а также учитывая затруднительность по конструктивным соображениям в установке специального мотор-вентилятора при мотор-вагонной тяге, в электродвигателях применяется естественная вентиляция, т. е. электродвигатели самовентилирующиеся.

§ 18. Пуск в ход электродвигателя сериес и регулирование его скорости

При работе электродвигателя потребляемая им сила тока может быть определена из следующего основного уравнения:

$$J = \frac{E - E_{np}}{R}.$$

В начальный момент пуска электродвигателя, якорь которого находится в состоянии покоя, величина противодействующей

электродвижущей силы $E_{np}=0$, следовательно сила тока равнялась бы $J = \frac{E}{R}$.

Величина R сопротивления обмоток полюсов и якоря незначительна, вследствие чего величина силы тока J получилась бы очень большой и недопустимой ни по условиям нагревания, ни по условиям коммутации. Поэтому, в целях избежания недопустимого нагрева обмоток электродвигателя и предотвращения искрообразования в щетках коллектора, при пуске электродвигателя в цепь якоря включаются добавочные пусковые сопротивления, называемые пусковым реостатом. Обозначив величину сопротивлений пускового реостата через R_p , сила тока при пуске двигателя в этом случае определится из выражения

$$J = \frac{E}{R + R_p}.$$

Величина R_p для данного типа электродвигателя подбирается и устанавливается такой, чтобы сила тока не превышала предельных значений как в отношении коммутации, так и в отношении нагрева обмоток.

В последующий момент после пуска, когда якорь начнет вращаться вследствие пересечения проводником его магнитного поля полюсов, появляется противодействующая электродвижущая сила и сила тока будет уже определяться из выражения:

$$J = \frac{E - E_{np}}{R + R_p}.$$

С увеличением скорости вращения, будет увеличиваться E_{np} , а следовательно будет уменьшаться величина силы тока J , которая в свою очередь повлечет за собой уменьшение вращающего момента. Для сохранения постоянной величины силы тяги следует постепенно и непрерывно уменьшать сопротивление R_p до полного его выключения, когда величина силы тока не вызывает опасения со стороны перегрева обмоток и искрообразования в щетках коллектора.

Устройство такого пускового реостата, который обеспечил бы постепенное и непрерывное изменение сопротивления сложно и в конструктивном отношении представляет большие затруднения. Вследствие этого на практике выключение сопротивлений реостата происходит ступенями, но с тем, чтобы колебания в изменении силы тока не были значительны, так как большие колебания вызывают резкие толчки и чтобы среднее значение силы тока соответствовали нужной величине. Выключение сопротивлений реостата скачками (ступенями) вызывает колебательное изменение силы тока, представленное на рис. 69.

В начальный момент включения сила тока, проходя через полное сопротивление R_p при $E_{np}=0$, имеет величину oa . В после-

дующий момент с появлением величины E_{np} и ее увеличении, сила тока уменьшается по кривой ab' . В целях поддержания величины вращающего момента, выключается одна ступень сопротивления и сила тока принимает снова значение $o'a' = oa$ и так далее, по мере роста с числом оборотов величины E_{np} , выводятся ступенями сопротивления реостата. Как только выключатся все ступени сопротивления реостата, электродвигатель работает в соответствии с его тяговыми характеристиками, и начальный момент этого перехода называют выходом на автоматическую характеристику.

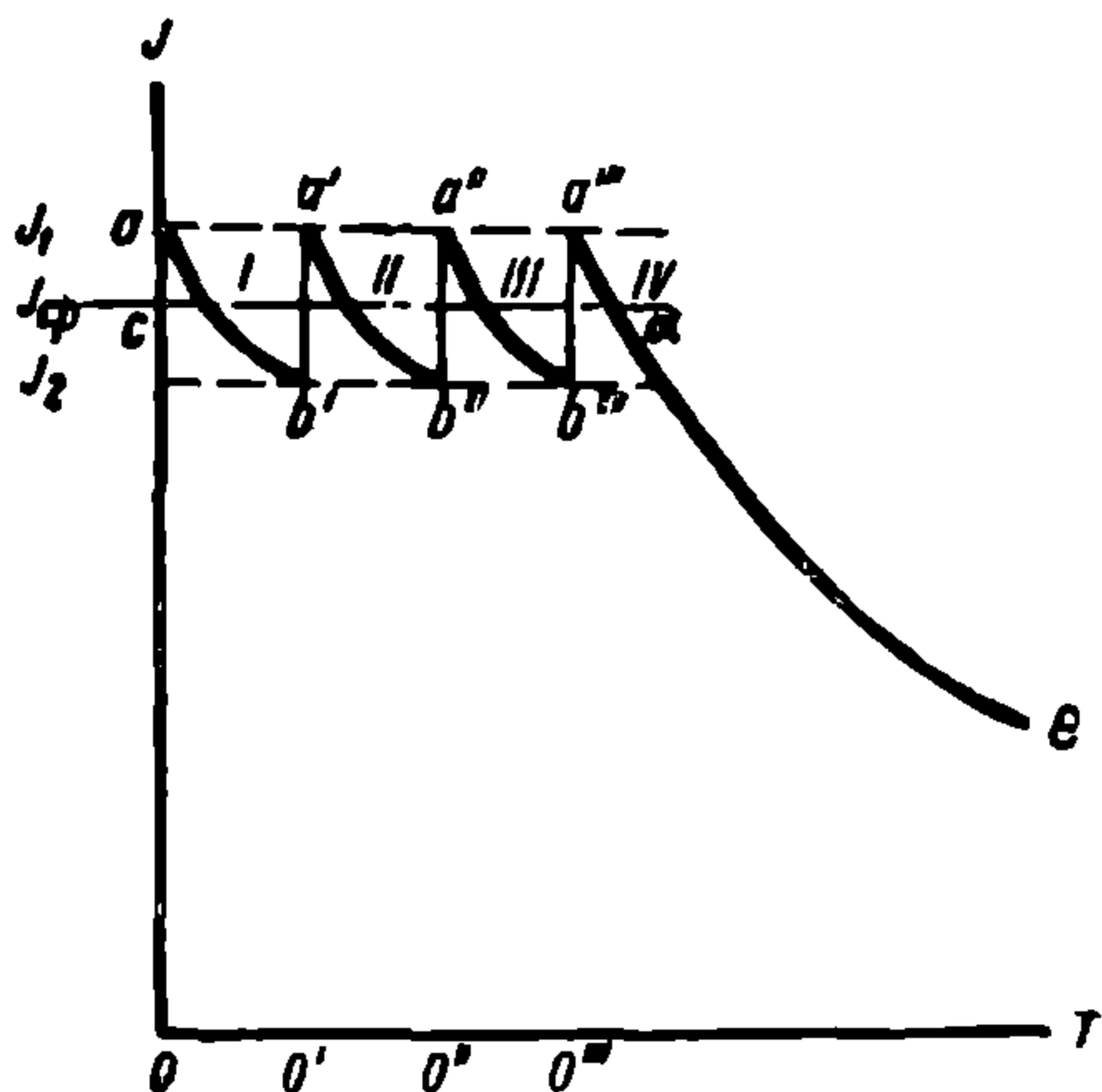


Рис. 69.

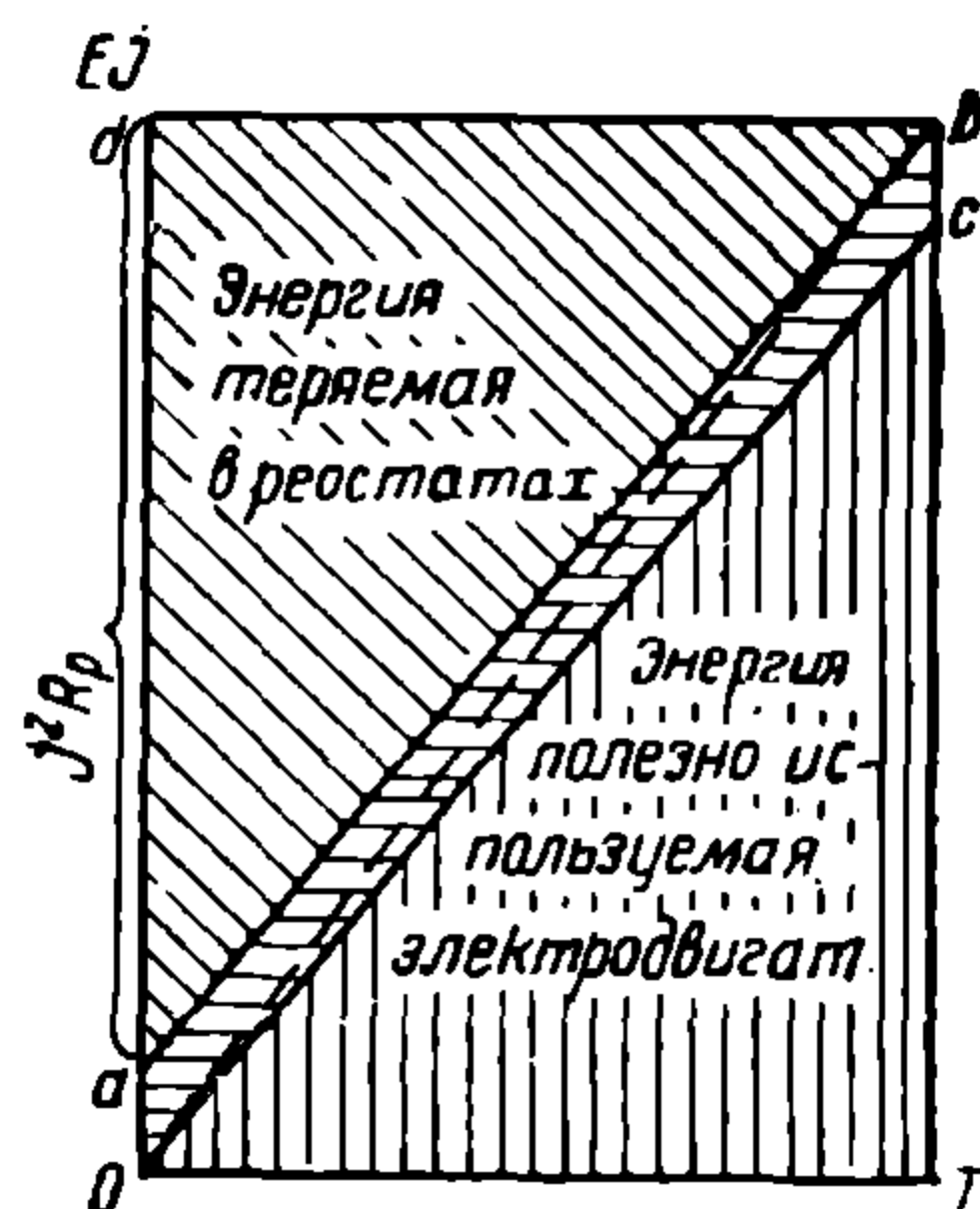


Рис. 70.

При выключенных пусковых сопротивлениях сила тока будет изменяться, в зависимости от изменения числа оборотов, а следовательно и от изменения E_{np} , уменьшаясь с увеличением последней и подчиняясь уравнению:

$$J = \frac{E - E_{np}}{R}.$$

Принимая за время выключения пусковых сопротивлений среднее значение силы тока, соответствующее на рис. 69 ординате OC , характер изменения силы тока в тяговых расчетах, с достаточной для них степенью точности, принимается по ломаной кривой cde , где точка d есть момент выхода на автоматическую характеристику.

Применение пусковых сопротивлений в момент пуска электродвигателя до выхода его на характеристическую кривую, вызывает потерю энергии в этих сопротивлениях, определяемую величиной $J^2 R_p$. Величина потери энергии в реостате, по мере выключения ступеней сопротивления, т. е. уменьшения R_p , уменьшается и при выходе на автоматическую характеристику $R_p = 0$, следовательно, и $J^2 R_p$ равно 0.

Количество же полезно израсходованной энергии будет изменяться в обратном отношении, увеличиваясь по мере выключения пусковых сопротивлений и достигая полного использования затрачиваемой энергии при выходе на характеристическую кривую. На рис. 70 приведена диаграмма, показывающая потери энергии в реостатах и полезно используемой электродвигателем.

Из диаграммы видно, что за время пуска T секунд, общая затрата энергии выражается площадью $OdbT$, из которой площадь adb выражает потерю энергии в реостатах, а площадь $OabT$ — полезную затрату энергии на электродвигатель, в которой затраты на внутренние сопротивления электродвигателя, равные $J^2 R$, выражаются площадью $Oabc$ и по своей величине не превосходят 10% от общей, т. е. $Oa \leq 0,1 E \cdot J$.

Беря отношение площади трапеции $OabT$, выражающей полезную затрату энергии электродвигателем, к площади $OdbT$, выражающей полную затрату энергии во время пуска, получаем

$$\frac{\text{площ } OabT}{\text{площ } OdbT} = \frac{1,1 E \cdot J \cdot T}{2 E \cdot J \cdot T} = 0,55,$$

т. е. полезно использованная энергия при пуске около 55% от полной затраты энергии. В условиях частых пусков, что имеет место при частых остановках и когда время под пуском по отношению ко времени работы электродвигателя по автоматической кривой, имеет сравнительно не малую величину, потеря энергии в реостатах может иметь от общего расхода энергии значительный процент. На магистральных железных дорогах, где остановки на отдельных пунктах находятся на большом расстоянии, время пуска электродвигателя, по сравнению с временем хода между отдельными пунктами, мало и процент потери энергии в пусковых реостатах представляет незначительную величину. На электровозах и мотор-вагонах при трамвайной подвеске электродвигателей, последние применяются в количестве кратном двум. Это позволяет в момент трогания применять различные схемы последовательного и параллельного включения электродвигателей при пуске, что дает общую экономию энергии на трогание, с одной стороны, и условия более плавного разгона, — с другой.

Рассмотрим сначала условия пуска при наличии двух электродвигателей.

При наличии двух электродвигателей и пускового реостата имеется возможность осуществить следующие четыре положения соединения электродвигателей и пускового реостата, приведенных на рис. 71.

Первый момент пуска: электродвигатели соединены последовательно (схема 1) и в цепь тока включен реостат R_p , сопротивления которого после момента пуска, аналогично рассмотренному ранее случаю, постепенно выключаются. Примерно к половине времени от всего периода пуска реостат оказывается выключен-

ным,—имеем второе положение (схема II): электродвигатели соединены последовательно без сопротивлений реостата. Третье положение, которое получается в начале второго периода времени пуска — это одновременное переключение электродвигателей с последовательного на параллельное и включение реостата (схема III), сопротивления которого также постепенно выключаются до четвертого положения, когда электродвигатели оказываются соединенными параллельно без сопротивлений реостата (схема IV). Все четыре положения осуществляются непрерывно. Такое применение последовательно-параллельного включения электродвигателей дает экономию в затрате энергии на реостаты.

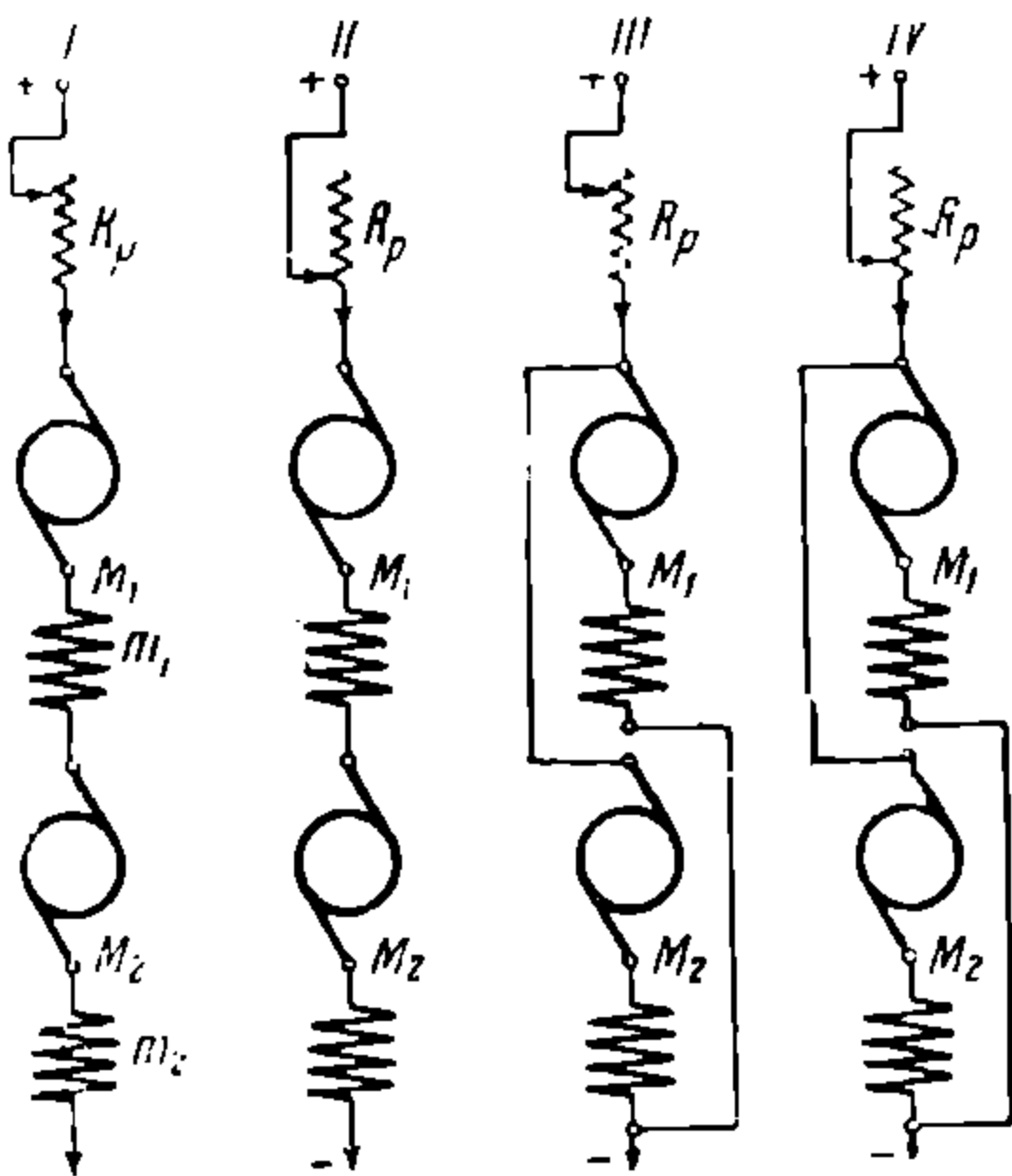


Рис. 71.

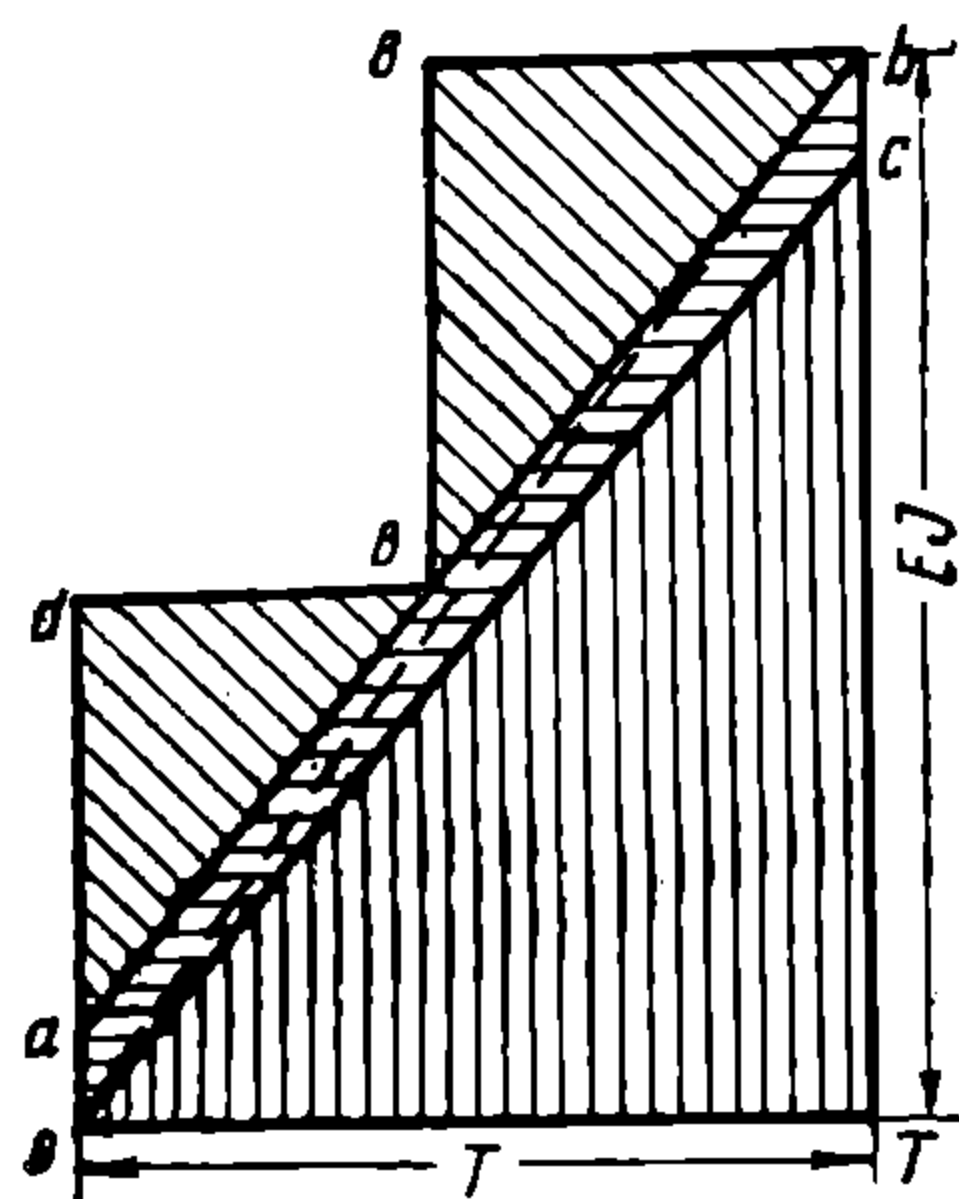


Рис. 72.

Действительно, благодаря последовательному соединению электродвигателей в первый период пуска, оба электродвигателя потребляют от сети ток I , и только во втором периоде пуска, при параллельном их соединении, они потребляют ток, равный $2I$. Диаграмма потребления энергии на пуск при этой схеме включения электродвигателей приведена на рис. 72.

Процент использования от затрачиваемой энергии в период пуска на полезную работу в этом случае составляет около 70. В мотор-вагонной тяге, применяемой в пригородном движении, количество электродвигателей, устанавливаемых в одном мотор-вагоне, преимущественно бывает равно четырем. Следовательно в этом случае возможно было бы применять следующие схемы включения электродвигателей:

- 1) все четыре электродвигателя соединены последовательно;
- 2) две параллельные группы по два последовательно соединенных электродвигателя;
- 3) все четыре электродвигателя соединены параллельно.

Применение указанных трех схем включения электродвигателей, с одной стороны, повышая незначительно процент утилизации энергии на пуск, с другой,—вызывает усложнения и удорожание в проводке и пусковой аппаратуре, вследствие чего в мотор-вагонах применяются лишь следующие две схемы включения:

- 1) все электродвигатели соединены последовательно.
- 2) две параллельные группы по два последовательно соединенных электродвигателя.

Также, как и в случае пуска при двух электродвигателях, в этих схемах соединения вводится пусковой реостат, который в начале каждой схемы включается и затем постепенно выключается. Все включения электродвигателей и реостата производятся непрерывно.

После выключения пускового реостата электродвигатели выходят на автоматическую характеристику, где изменение скорости вращения якоря электродвигателя происходит в соответствии с изменением вращающего момента и эта взаимная регулировка происходит автоматически.

Если по условиям работы электродвигателя необходимо увеличение вращающего момента, то изменение происходит автоматически с одновременным изменением числа оборотов якоря.

Допустим, что мотор-вагонная секция переходит с площадки на подъем. В этом случае мотор-вагон должен дать большую силу тяги и электродвигатели, установленные в мотор-вагоне, автоматически увеличивая потребление тока, развивают на валу больший вращающий момент, но скорость вращения якоря в этом случае уменьшается. В некоторых случаях движения может возникнуть необходимость регулирования скорости в определенных пределах. Это изменение скорости может быть достигнуто посредством переключения электродвигателей.

Ранее было установлено, что число оборотов якоря электродвигателя определяется следующим уравнением

$$n = \frac{E - JR}{k \cdot \Phi}.$$

Из этого уравнения видно, что изменение числа оборотов якоря электродвигателя может быть получено изменением напряжения E на зажимах электродвигателя, что достигается применением иной схемы включения их.

Рассмотрим изменение n при переходе с нормального рабочего включения четырех электродвигателей, соединенных в две параллельные группы по два последовательно, на последовательное соединение всех четырех электродвигателей. Если при первой схеме включения напряжение на зажимах каждого электродвигателя было E и число оборотов якоря $n = \frac{E - JR}{k \Phi}$, то при последо-

вательном соединении всех электродвигателей напряжение на зажимах каждого из них будет равно $\frac{E}{2}$ и число оборотов

$$n_1 = \frac{\frac{E}{2} - JR}{k\Phi}$$

Отношение числа оборотов при I схеме к числу оборотов якоря при II схеме равно

$$\frac{n}{n_1} = \frac{E - JR}{\frac{E}{2} - JR}$$

Так как величина JR относительно незначительна, то, пренебрегая ее значением, получаем

$$\frac{n}{n_1} = \frac{E}{\frac{E}{2}} = 2,$$

т. е. число оборотов якоря, а следовательно и скорости движения, при второй схеме — последовательного соединения всех электродвигателей, получается в два раза меньше.

При наличии шести электродвигателей на электровозах, применяемых на наших электрифицированных железных дорогах, могут быть осуществлены три схемы включения их и получение 3-х ступеней изменения скорости движения. Нормальной рабочей схемой включения электродвигателей в электровозе является соединение их в три параллельные группы по два последовательно соединенных электродвигателя. В этом случае напряжение на зажимах каждого электродвигателя E_{∂} равно 1 500 в, при напряжении в контактом проводе $E_k = 3 000$ в.

Рассмотрим изменение числа оборотов при следующих трех схемах соединения электродвигателей (рис. 73)¹:

- 1) все шесть электродвигателей соединены последовательно;
- 2) две параллельные группы, по три последовательно соединенных электродвигателя в каждой группе;
- 3) три параллельные группы, по два последовательно соединенных электродвигателя.

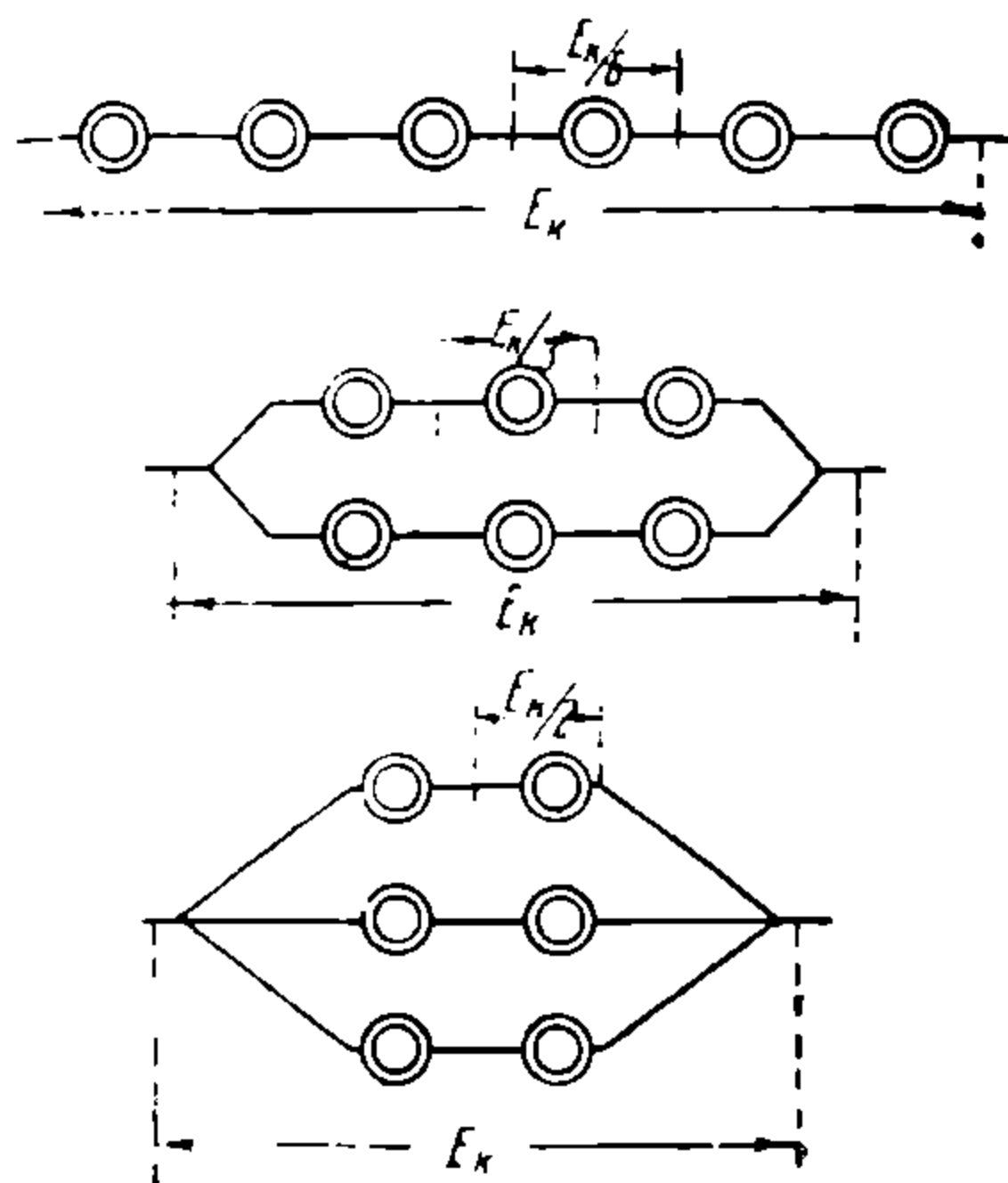


Рис. 73.

¹ Ради упрощения на рис. 73 во всех схемах соединения электродвигателей не показано включения пусковых реостатов и не дано после каждого якоря электродвигателя обмотки возбуждения.

Для первой схемы соединения электродвигателей число оборотов

$$n_1 = \frac{\frac{E_k}{6} - JR}{k\Phi}$$

Для второй схемы

$$n_2 = \frac{\frac{E_k}{3} - JR}{k\Phi}$$

Для третьей схемы

$$n_3 = \frac{\frac{E_k}{2} - JR}{k\Phi}$$

Пренебрегая, по малости значения, величиной JR и беря отношения приведенных выражений, получаем:

$$\frac{n_1}{n_3} = \frac{1}{3} \text{ или } n_1 = \frac{1}{3} n_3; \quad \frac{n_2}{n_3} = \frac{2}{3} \text{ или } n_2 = \frac{2}{3} n_3,$$

т. е. число оборотов, а следовательно и скорость движения при первой схеме соединения электродвигателя составляет одну треть, при второй схеме—две трети от скорости при нормальной рабочей схеме соединения электродвигателей.

Такие схемы последовательно-параллельного включения электродвигателей, как правило, применяются в момент трогания поезда с места, так как при этом обеспечивается плавный пуск и разгон и в то же время (что очень важно в эксплуатационном отношении) сохраняется неизменным при всех схемах включения электродвигателей вращающий момент на валу якоря, а следовательно и сила тяги. Последнее объясняется тем, что величина силы тока, потребляемая каждым электродвигателем, остается без изменения. Потребление же тока электровозом, при переходе с последовательного на последовательно-параллельное и на условно параллельное (при двух последовательно соединенных) соединение увеличивается. Потери же энергии в пусковых реостатах уменьшаются и составляют всего лишь 25%, а остальные 75% затрачиваемой во время пуска энергии расходуются на полезную работу.

В условиях движения регулирование скорости указанным способом последовательно-параллельного переключения электродвигателей, во-первых, дает ограниченное количество ступеней изменения скорости, что во многих условиях эксплуатации не является достаточным, и, во-вторых, позволяет только лишь уменьшать скорость по сравнению со скоростью при нормальном напряжении.

В целях получения большего количества ступеней изменения скорости с одной стороны, и возможности повышения скорости по сравнению со скоростью при нормальном напряжении на зажимах электродвигателей, с другой,—применяется еще способ изменения скорости путем изменения магнитного силового потока.

Из выражения

$$n = \frac{E - JR}{k \Phi}$$

видно, что при уменьшении магнитного потока Φ , число оборотов n увеличится.

Уменьшение величины магнитного потока может быть получено различными способами, из которых два способа, наиболее простые, приведены на рис. 74 и 75.

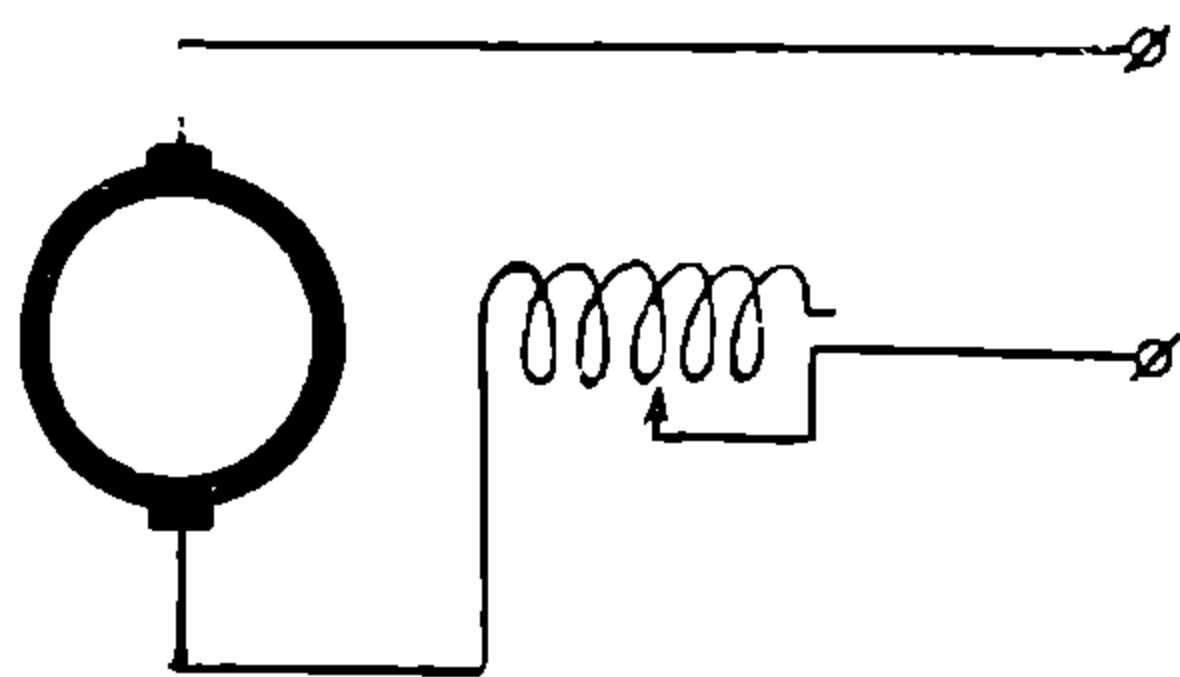


Рис. 74.

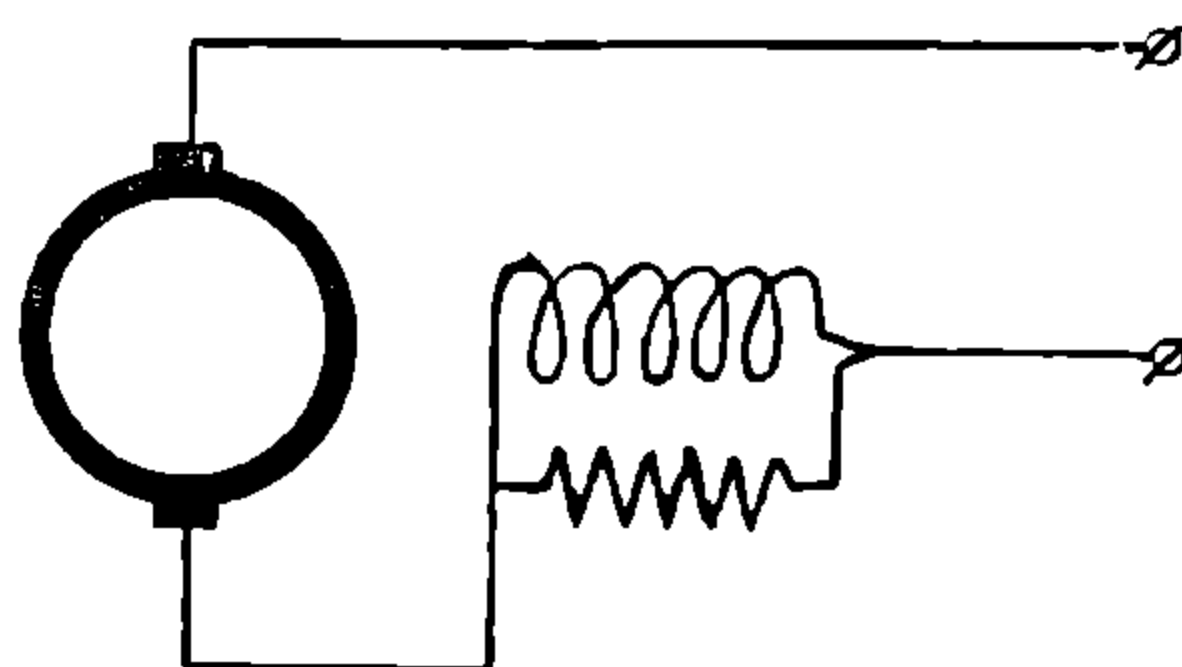


Рис. 75.

1) секционирование обмотки возбуждения и отключение части витков,

2) включение параллельно обмотке возбуждения шунта.

Преимущественное распространение (как наиболее простой) получил второй способ, так как при первом способе получается сложное устройство ответвлений от секций к контроллеру. Шунтирование обмотки возбуждения может применяться при всех схемах последовательно-параллельного соединения электродвигателей, что таким образом увеличивает общее количество ступеней изменения скорости. Для наглядного представления на рис. 76 для двух электродвигателей приведены все схемы переключения от момента пуска до достижения наибольшей скорости при применении последовательного и параллельного включения и шунтирования обмоток возбуждения.

Включение шунта параллельно обмоткам возбуждения, уменьшая магнитный силовой поток, увеличивает число оборотов якоря.

При выключенном шунте, т. е. при полном магнитном поле, число оборотов якоря

$$n = \frac{E - J'R}{k \Phi},$$

при включенном шунте, т. е. при ослабленном поле

$$n_{ш} = \frac{E - JR'}{k\Phi'}.$$

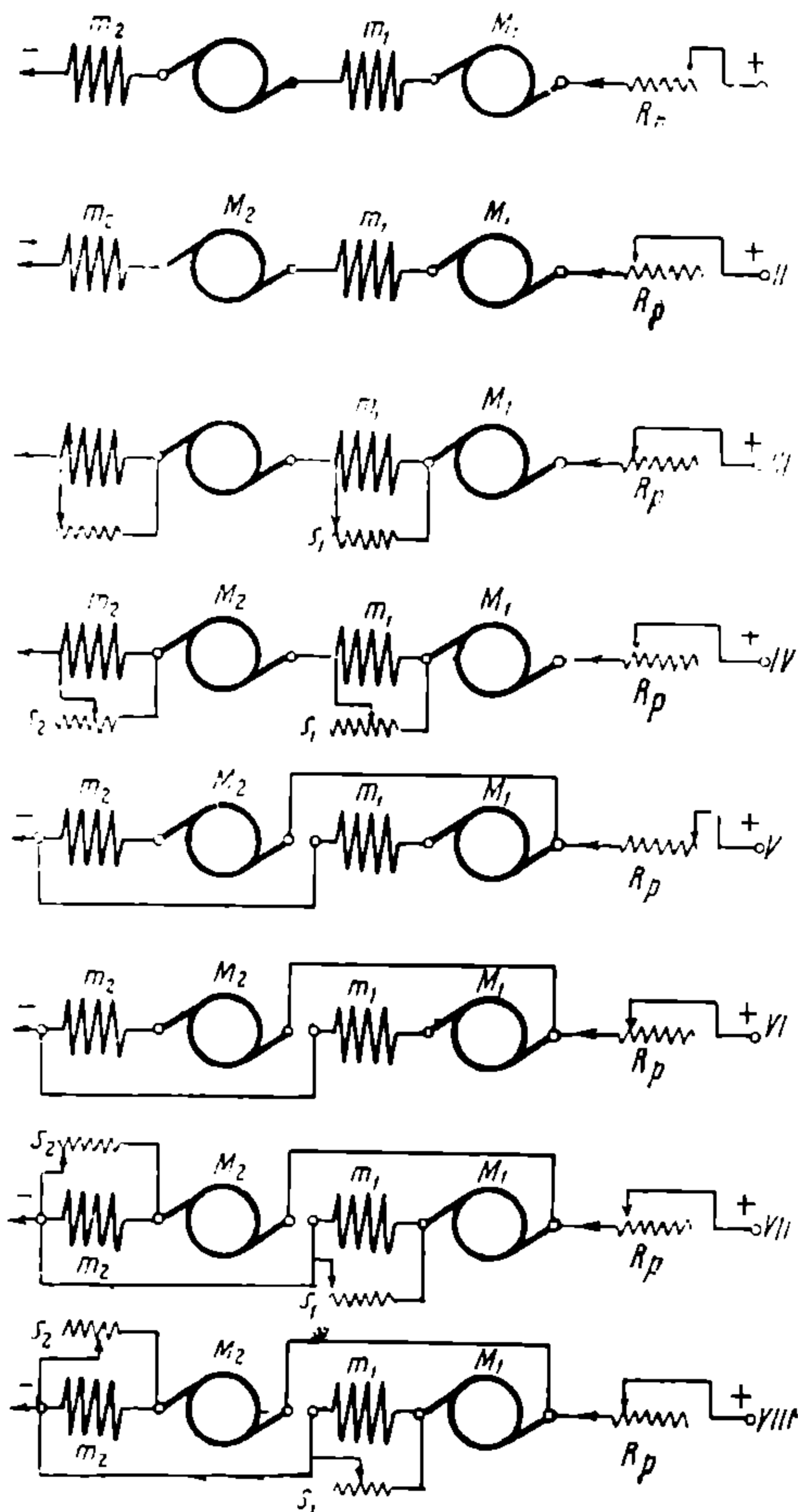


Рис. 76.

центах силы тока в обмотках возбуждения при ослабленном поле, к силе тока в якоре.

При отношении

$$\frac{J_{\theta}}{J} = \alpha; \quad \frac{J_{ш}}{J} = \frac{J - J_{\theta}}{J} = 1 - \alpha.$$

Обозначая через:

J_{θ} — силу тока, протекающую в обмотках возбуждения,

$J_{ш}$ — силу тока протекающую по шунту, имеем, что сила тока в проводниках якоря электродвигателя равна

$$J = J_{\theta} + J_{ш}.$$

Отношение $\frac{J_{\theta}}{J} = \alpha$, будучи выражено в процентах, называется степенью шунтирования поля.

Следует отметить, что способ выражения шунтировки в процентах, как отношение тока возбуждения при ослабленном поле к току якоря, к сожалению, не является общепринятым в международном масштабе. Так, например, в тяговых электродвигателях, установленных на электровазах южно-французских жел. дор., степень шунтировки выражена в процентах уменьшения силы тока в обмотках возбуждения при ослабленном поле по сравнению с силой тока в якоре.

В СССР, и в Германии степень шунтировки поля выражается, как отношение в про-

В том случае, когда величина силы тока в обмотке возбуждения при ослабленном поле

$$J_s = J',$$

магнитный силовой поток ослабленного поля Φ' будет равен магнитному силовому потоку Φ при полном поле и величине силы тока

$$J' = J_s = \alpha J.$$

Тогда отношение

$$\frac{n_{ш}}{n} = \frac{E - JR'}{E - \alpha JR'}$$

где

$n_{ш}$ —число оборотов якоря при включенном шунте и силе тока в якоре J ,

n —число оборотов якоря при выключенном шунте и силе тока αJ ,

R —сопротивление всех обмоток электродвигателя при выключенном шунте,

R' —сопротивление всей цепи электродвигателя с включенным шунтом, равное

$$R' = r_{я} + R_{ш},$$

где $r_{я}$ — сопротивление проводников якоря,

$R_{ш}$ обмотки возбуждения и шунта,

Из условия проводимости разветвления обмотки возбуждения и шунта имеем:

$$\frac{1}{R_{ш}} = \frac{1}{r_s} + \frac{1}{r_{ш}}.$$

Ток в обмотках возбуждения и в шунте распределяется обратно пропорционально сопротивлению, следовательно

$$\frac{r_{ш}}{r_s} = \frac{J_s}{J_{ш}} = \frac{\alpha J}{(1-\alpha)J} = \frac{\alpha}{(1-\alpha)}$$

и сопротивление $r_{ш}$ шунта равно

$$r_{ш} = r_s \frac{\alpha}{(1-\alpha)}.$$

Подставляя значение $r_{ш}$ в выражение, получим

$$\frac{1}{R_{ш}} = \frac{1}{r_s} + \frac{1}{r_{ш}} = \frac{1}{r_s} + \frac{1-\alpha}{\alpha r_s} = \frac{1}{\alpha r_s}.$$

Откуда

$$R_{ш} = \alpha r_s$$

и

$$R' = r_{я} + R_{ш} = r_{я} + \alpha r_s.$$

НТБ
ДНУЖТ

Подставляя полученное значение R' в выражение,

имеем
$$\frac{n_{ш}}{n} = \frac{E - J(r_{я} + \alpha r_{в})}{E - \alpha J R}$$

или
$$n_{ш} = n \frac{E - J(r_{я} + \alpha r_{в})}{E - \alpha J R}.$$

Нужно отметить, что из условия надежной работы электродвигателя и избежания образования кругового огня на коллекторе, применять степень шунтировки ($\alpha \cdot 100$) менее 50% не рекомендуется.

§ 19. Тяговые характеристики электродвигателя

Тяговые характеристики электродвигателя выражают значения силы тяги в кг на ободу ведущего колеса электровоза, скорости в км/час и коэффициента полезного действия электродвигателя и передачи в функции силы тока. По имеющимся электро-механическим характеристикам электродвигателя при определенной системе передачи и диаметре ведущих колес электровоза можно построить тяговые характеристики электродвигателя.

Установим зависимость между тяговыми и электро-механическими характеристиками электродвигателя при индивидуальной зубчатой передаче. Схема расположения

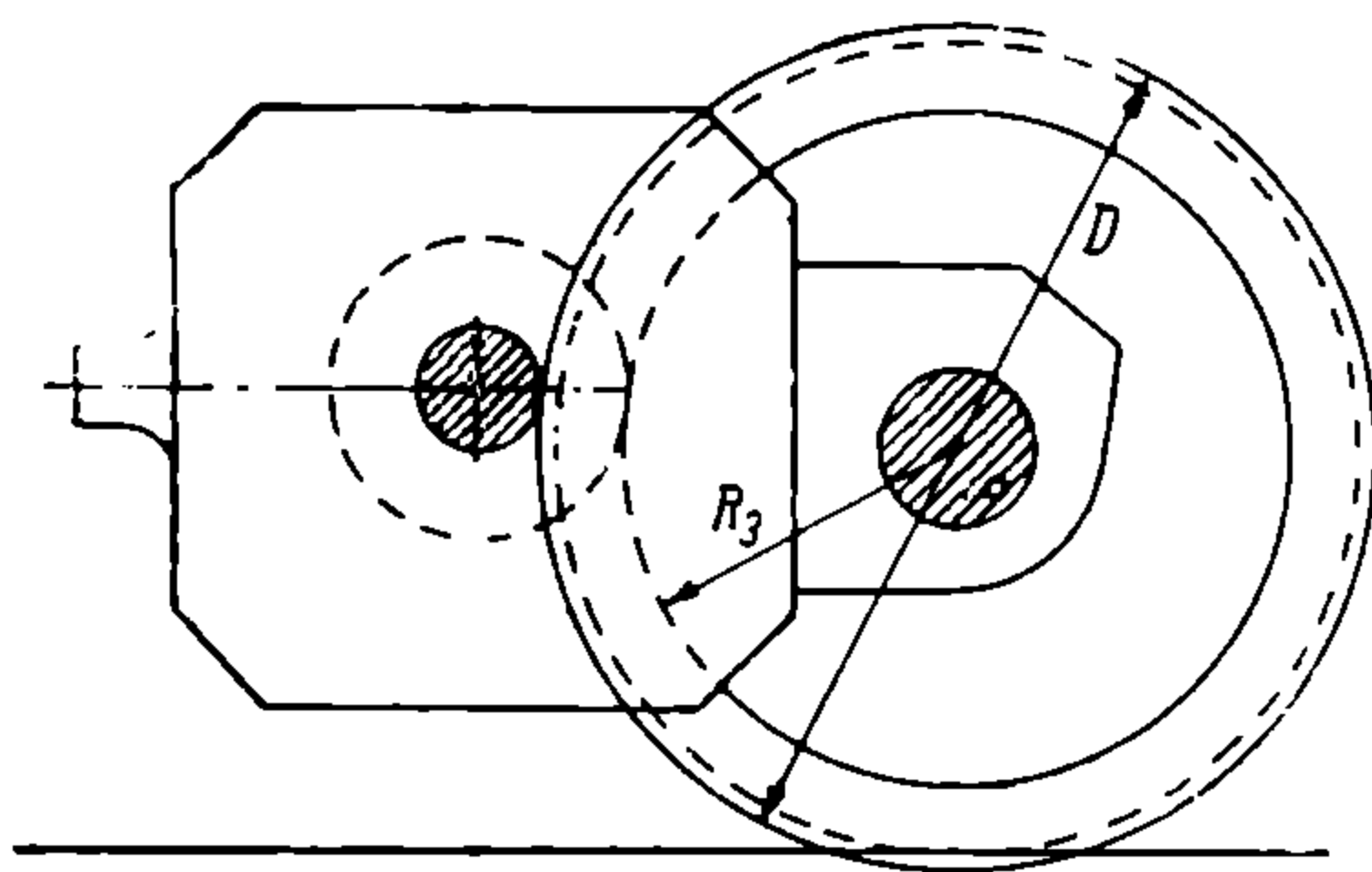


Рис. 77.

тягового электродвигателя по отношению к ведущему колесу при индивидуальной зубчатой передаче приведена на рис. 77.

Примем следующие обозначения:

D — диаметр ведущего колеса электровоза в м,

n_k — число оборотов " " в мин.,

Z_k^{18} — касательная сила тяги от электродвигателя на ободу колеса в кг,

R_3 — радиус большой зубчатки на оси ската в м,

Z_k^3 — касательная сила тяги на окружности большой зубчатки в кг,

n — число оборотов якоря электродвигателя в мин.,

M — вращающий момент на валу электродвигателя в кгм.

Ранее было установлено (§ 17), что мощность на валу электродвигателя

$$N^в = \frac{M \cdot n}{716},$$

мощность на ободе ведущего колеса

$$N^k = N^s \eta_z = \frac{M \cdot n}{716} \eta_z,$$

де η_z — коэффициент полезного действия зубчатой передачи. Потери мощности в зубчатой передаче изменяются в зависимости от нагрузочных токов.

На рис. 78 приводится кривая изменения потери в зубчатой передаче в зависимости от нагрузочных токов по данным Института американских инженеров.

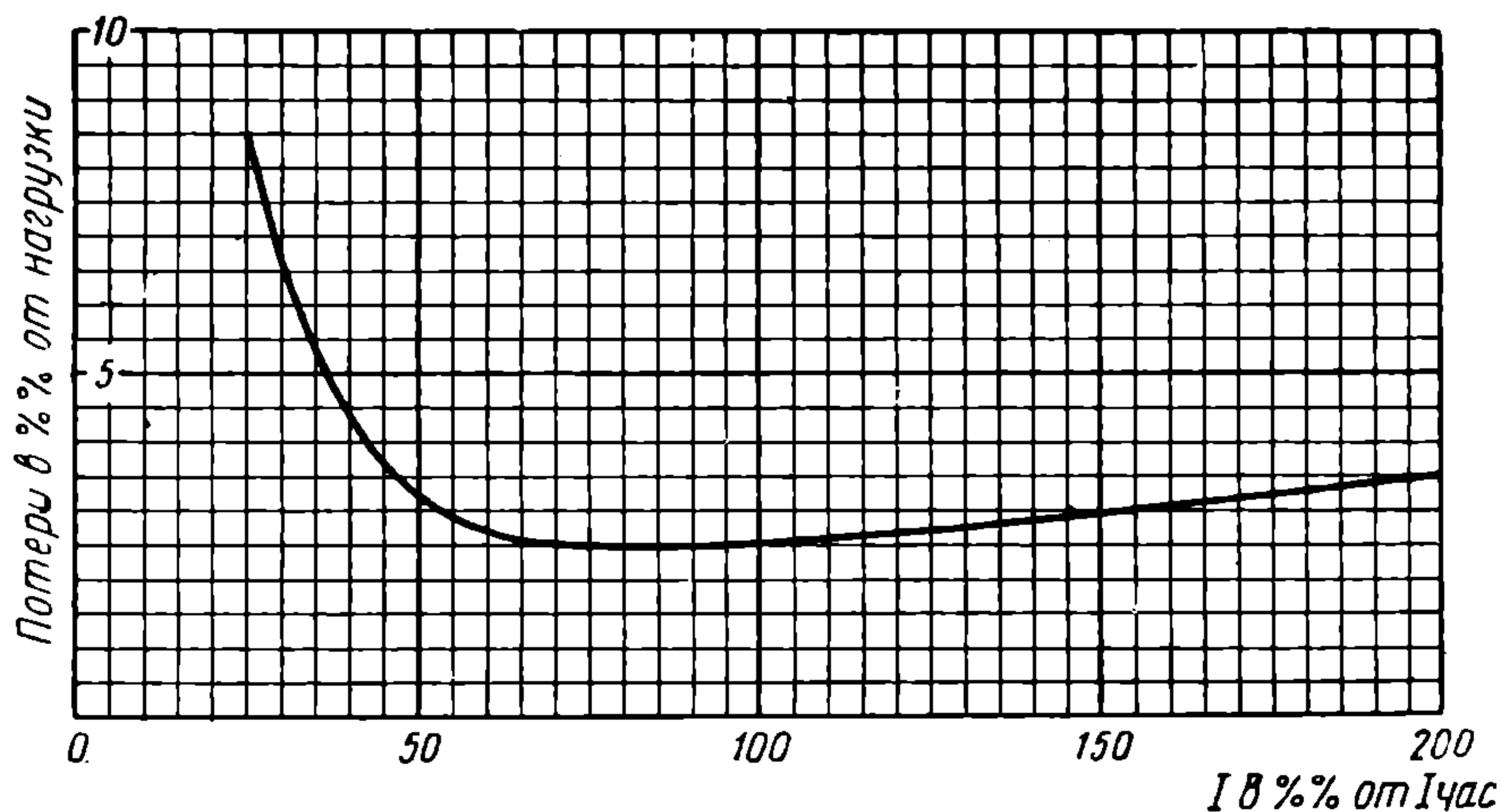


Рис. 78. Потери в зубчатой передаче в зависимости от нагрузочных токов по данным Института американских инженеров.

С другой стороны, величина той же мощности может быть выражена следующим уравнением

$$N^k = \frac{Z_k^3 R_z \cdot n_k}{716}.$$

На основании приведенного выше, можно написать

$$Z_k^3 = \frac{M \cdot n \cdot \eta_z}{R_z \cdot n_k}$$

Отношение $\frac{n}{n_k}$, называемое передаточным числом, обозначим через φ , тогда

$$Z_k^3 = \frac{M \cdot \eta_z \cdot \varphi}{R_z}.$$

Сила тяги на ободу колеса $Z_{\kappa}^{\partial\theta}$ может быть выражена следующим уравнением:

$$Z_{\kappa}^{\partial\theta} = \frac{Z_{\kappa}^3}{D} \frac{R_3}{2};$$

подставляя в данное выражение вместо Z_{κ}^3 значение его, получаем

$$Z_{\kappa}^{\partial\theta} = \frac{2}{D} \frac{M \cdot \varphi \cdot \eta_3}{1}.$$

Сила тяги от электродвигателя на ободу ведущего колеса электровоза пропорциональна вращающему моменту электродвигателя, передаточному числу зубчаток, к. п. д. зубчатой передачи и обратно пропорциональна диаметру ведущего колеса.

Установление зависимости между скоростью движения v км/час и числом оборотов якоря электродвигателя может быть произведено, исходя из следующих положений:

скорость v м/сек. = $\frac{\pi \cdot D \cdot n_{\kappa}}{60}$

но $\frac{n}{n_{\kappa}} = \varphi$ и $n_{\kappa} = \frac{n}{\varphi}$.

Подставляя вместо n_{κ} значение $\frac{n}{\varphi}$

имеем v м/сек = $\frac{\pi \cdot D \cdot n}{60 \cdot \varphi}$.

Скорость же v км/час = $3,6 v$ м/сек = $\frac{3,6 \cdot \pi \cdot D \cdot n}{60 \cdot \varphi} = 0,1884 \frac{D \cdot n}{\varphi}$.

Следовательно, скорость движения электровоза пропорциональна числу оборотов якоря электродвигателя, диаметру ведущего колеса и обратно пропорциональна передаточному числу зубчаток.

На основании полученных уравнений, по электромеханическим характеристикам $M = f(J)$ и $n = f(J)$, могут быть построены тяговые характеристики электродвигателя:

$$Z = f(J), v = f(J) \text{ и } \eta = f(J).$$

Значение полного коэффициента полезного действия определится, как произведение коэффициента полезного действия электродвигателя, приводимого в электромеханической характеристике, и коэффициента полезного действия зубчатой передачи

$$\eta = \eta_{эм} \cdot \eta_3.$$

Установленные тяговые характеристики $Z = f(J)$ и $v = f(J)$ относятся к полному полю возбуждения. Построение их при ослаблен-

ном магнитном поле может быть произведено на основании следующей зависимости, установленной ранее

$$\frac{n_{ш}}{n} = \frac{E - J(r_{я} + \alpha r_{в})}{E - \alpha J R};$$

но

$$\frac{n_{ш}}{n} = \frac{v_{ш}}{v}$$

откуда

$$v_{ш} = v \frac{E - J(r_{я} + \alpha r_{в})}{E - \alpha J R}$$

и

$$\eta_{ш} = \eta \frac{E - J(r_{я} + \alpha r_{в})}{E - \alpha J R}$$

Наконец, сила тяги при шунте будет равна

$$Z_{ш} = \frac{v}{v_{ш}} \cdot \frac{\eta_{ш}}{\eta} Z.$$

Приведенные выражения для определения тяговых характеристик при ослабленном поле относятся к электродвигателям серий с постоянного тока.

Тяговые характеристики электродвигателей, применительно к определенному электровозу, устанавливаются заводом, изготовляющим электровозы.

На диаграмме тяговых характеристик электродвигателя серий с постоянного тока, помимо кривых $Z = f(J)$, $v = f(J)$, $\eta = f(J)$, приводятся обычно следующие данные:

- 1) мощность электродвигателя, преимущественно часовая,
- 2) сила тока при режиме часовой мощности,
- 3) " " " " длительной мощности,
- 4) величина нормального напряжения на зажимах электродвигателя,
- 5) диаметр ведущих колес электровоза,
- 6) передаточное число,
- 7) степень шунтировки в процентах и кривые $Z_{ш} = f(J)$, $v_{ш} = f(J)$, $\eta_{ш} = f(J)$ при ослабленном поле.

На рис. 79, 80, 81 приведены тяговые характеристики электродвигателей серий с постоянного тока, установленных на электровозах В. Л. С_с, С_с', С_с", находящихся в эксплуатации на Сурамском перевале Закавказской жел. дор., а на рис. 82 — тяговые характеристики электродвигателя ДПИ-150 моторных вагонов пригородных жел. дор.

При тяговых характеристиках электродвигателей переменного тока — однофазных последовательных коллекторных и трехфазных

асинхронных на диаграмме, помимо величин, указываемых в характеристиках электродвигателя постоянного тока, приводятся частота переменного тока и кривые $\cos \varphi = f(I)$.

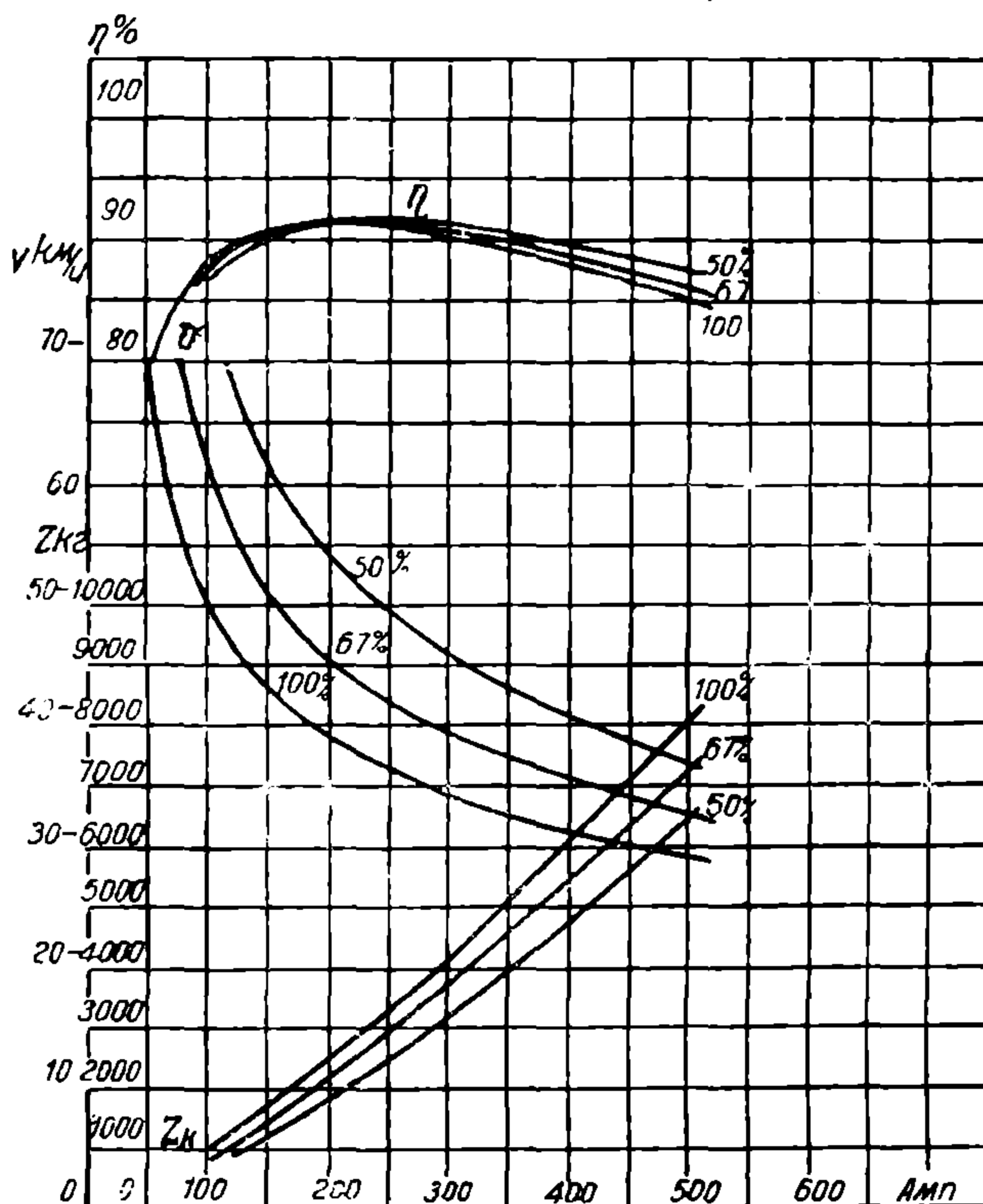


Рис. 79. Тяговые характеристики электродвигателя серии постоянного тока типа ДПЭ-340, отнесенные к ободу колес электровоза ВЛ-19.

Диаметр колес—1 220 мм; передаточное число— $\phi=3,74$; скорость— $V_{\text{час}}=36,5$ км/час; мощность электродвигателя $N_{\text{час}}=340$ кВт; напряжение $E_H=1\,500$ в; сила тока $I_{\text{час}}=250$ амп; $I_{\text{д.1}}=220$ амп; ослабление поля $ОП_1=67\%$, $ОП_2=50\%$. Независимая вентиляция.

На рис. 83 и 84 приводятся тяговые характеристики однофазных коллекторных электродвигателей, а на рис. 85 и 86—трехфазных асинхронных электродвигателей.

§ 20. Перестроение тяговых характеристик электродвигателей постоянного тока

Тяговые характеристики электродвигателя зависят от диаметра ведущих колес и от передаточного числа зубчаток электровоза, на котором применяется данный электродвигатель.

При применении электродвигателя на другом электровозе, у которого или диаметр ведущих колес или зубчатая передача

иная, изменяются и тяговые характеристики электродвигателя, так как таковые относятся к ободу сцепных колес.

В этом случае, в связи с изменением передаточного числа зубчатой передачи или диаметра сцепных колес, необходимо перестроить тяговые характеристики.

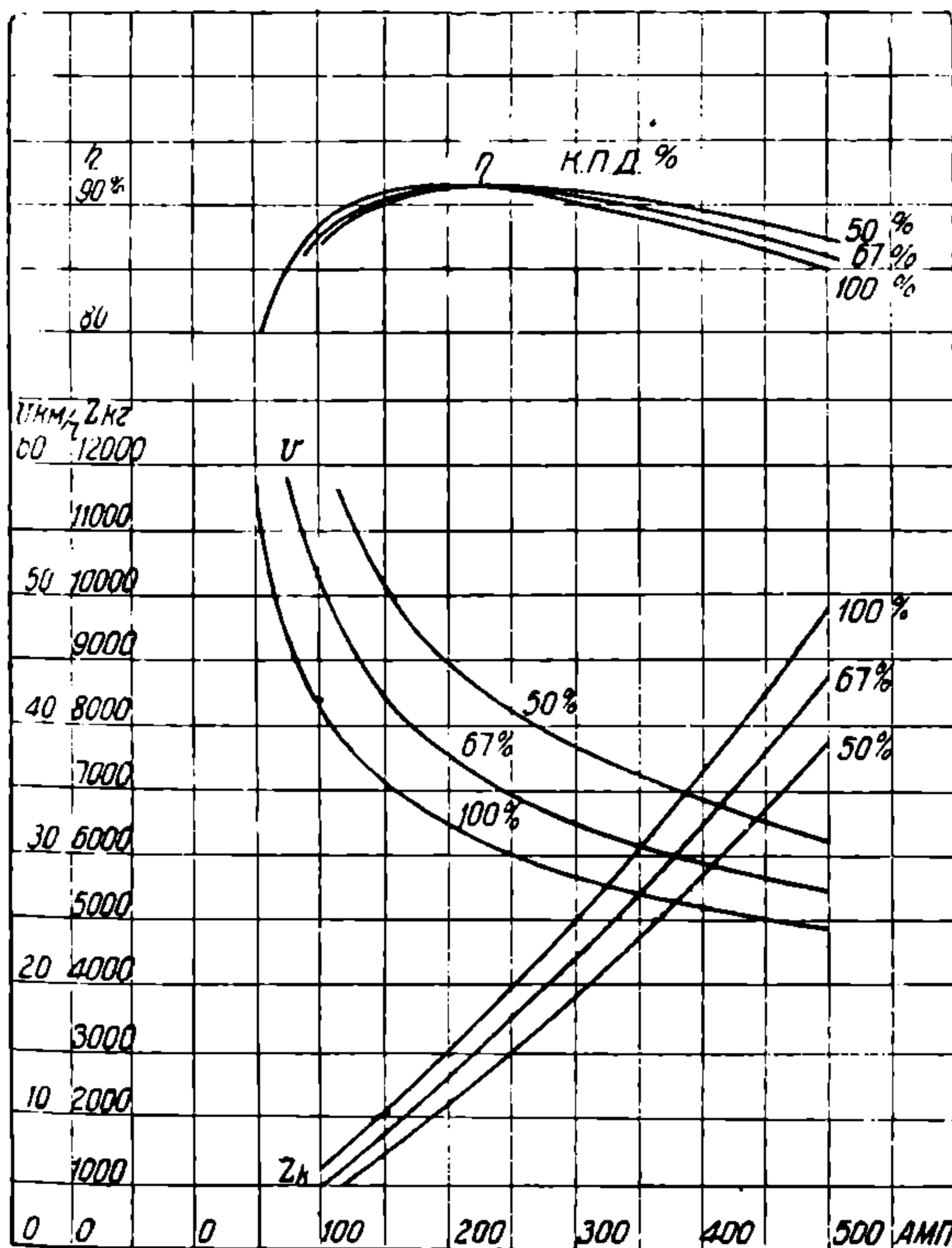


Рис. 80. Тяговые характеристики электродвигателя серий постоянного тока типа ДПЭ-340, отнесенные к ободу колес электровоза Сс-11.

Диаметр колес — 1200 мм; передаточное число — $\varphi = 4.45$, скорость $V_{\text{час}}$ — 30,5 км/час; мощность электродвигателя $N_{\text{час}}$ — 340 квт. напряжение E_H — 1500 в, сила тока $J_{\text{час}}$ — 250 амп; $J_{0.1}$ — 220, ослабление поля ОП₁ — 67%, ОП₂ — 50%. Независимая пентилиация.

При изменении передаточного числа зубчаток, новые кривые $Z' = f(J)$ и $v' = f(J)$ определяются из следующих соотношений.

Кривая сила тяги $Z' = f(J)$ перестроится на основании следующих соотношений

$$\frac{Z'}{Z} = \frac{2 \cdot \eta_z}{L} \frac{\varphi' \cdot M \cdot D}{2 \eta_z \varphi \cdot M} = \frac{\varphi'}{\varphi},$$

где φ' — новое передаточное число зубчаток,
 φ — прежнее
 тяговые характеристики.

при котором даны

Кривая скорости $v' = f(J)$ определится из отношения:

$$\frac{v'}{v} = \frac{0,188 \cdot D \cdot n \cdot \varphi}{\varphi' \cdot 0,188 \cdot D \cdot n} = \frac{\varphi}{\varphi'}$$

При изменении диаметра ведущих колес, но при том же передаточном числе зубчаток, кривые $Z' = f(J)$ и $v' = f(J)$ перестроятся на основании следующих соотношений:

$$\frac{Z'}{Z} = \frac{D}{D'} \text{ и } \frac{v'}{v} = \frac{D'}{D}$$

В том случае, когда электродвигатель устанавливается на электроваз с другим диаметром ведущих колес и передаточным числом зубчаток, тяговые характеристики электродвигателя могут быть перестроены на основании следующих соотношений:

$$\frac{Z'}{Z} = \frac{\varphi' D}{\varphi D'} \text{ и } \frac{v'}{v} = \frac{\varphi \cdot D'}{\varphi' \cdot D}$$

Коэффициент полезного действия электродвигателя и зубчатой передачи $\eta' = f(J)$ незначительно изменится и практически может быть принят тем же, т. е. $\eta' = \eta$.

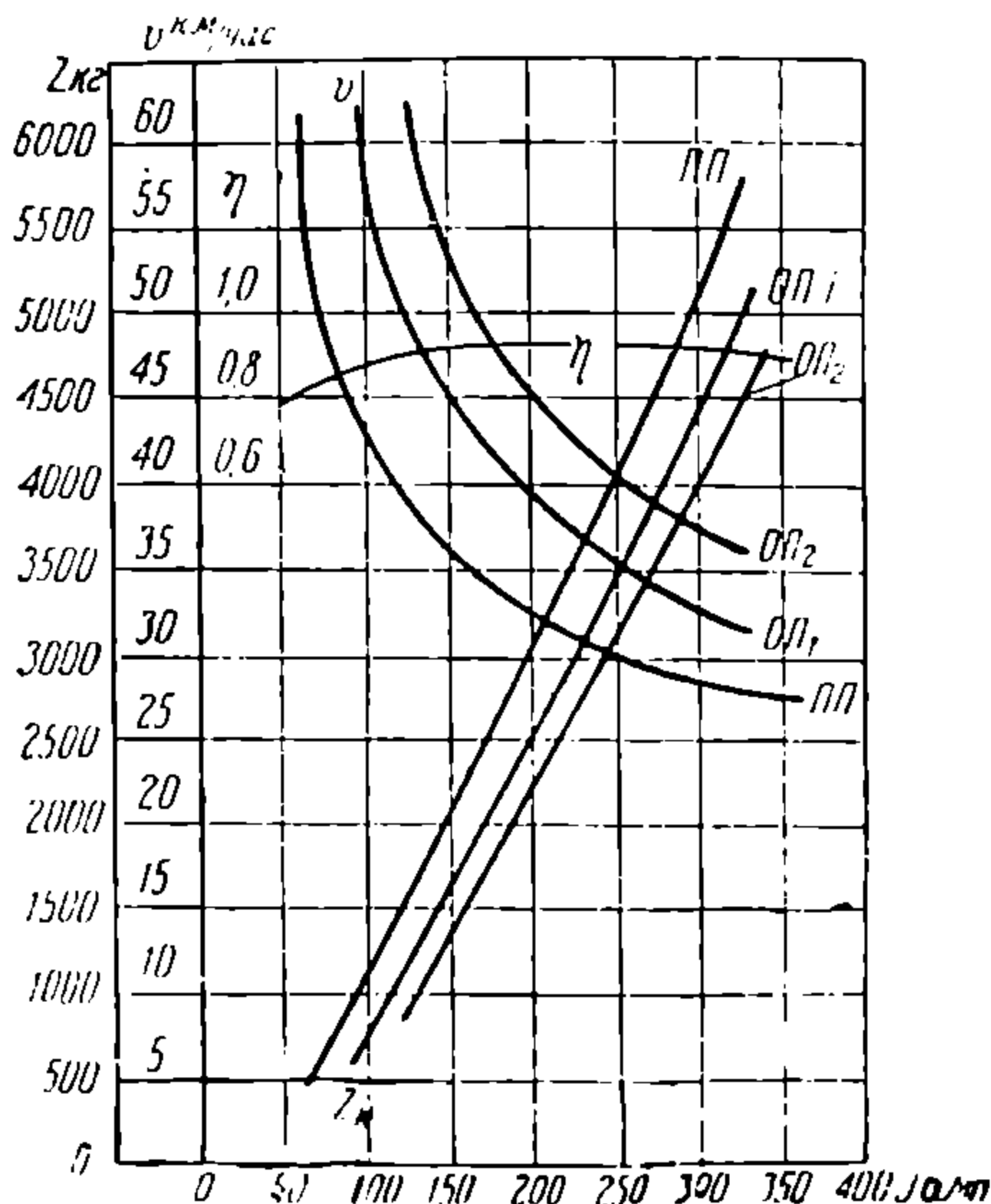


Рис. 81. Тяговые характеристики электродвигателя типа GDTM-665, отнесенные к ободу колес электроваза Сч-10.

Диаметр колес $D=1200$ мм; передаточное число $\varphi=4,45$, скорость $V_{\text{час}}=29,5$ км/час; мощность электродвигателя $N_{\text{час}}=380$ кВт, напряжение $E_k=1500$ в; сила тока $J_{\text{час}}=275$ ампер, $J_{\text{дл}}=232$ ампер, ослабление поля $ОП_1=67\%$, $ОП_2=52\%$. Независимая вентиляция.

§ 21. Универсальные характеристики электродвигателей постоянного тока

Тяговые характеристики электродвигателей постоянного тока соответствующего типа различных мощностей, если выразить значение характеристик в процентах по отношению к величине при часовой мощности, принятой за 100%, подобны между собой и имеют лишь незначительное отклонение (в пределах от 3 до 5% в ту или другую сторону). Средние тяговые характеристики, выраженные в процентах, из серии значительного количества тяговых характеристик соответствующего типа электродвигателей, называются универсальными характеристиками.

На рис. 87 приведены сводные характеристики, предложенные Richey, из которых средняя (1) является универсальной расчетной, а крайние (2 и 3) являются теми предельными кривыми, которые могут быть при данном типе электродвигателя.

На основании исследования значительного количества тяговых характеристик электродвигателей постоянного тока (преимущественно типа завода General Electric Company) инж. Лучай установил, что зависимость между силой тока и силой тяги в процентах для электродвигателей мощностью от 100 до 400 *квт*, может быть выражена следующим уравнением:

$$Z_x = 1,17 (J_x - 15),$$

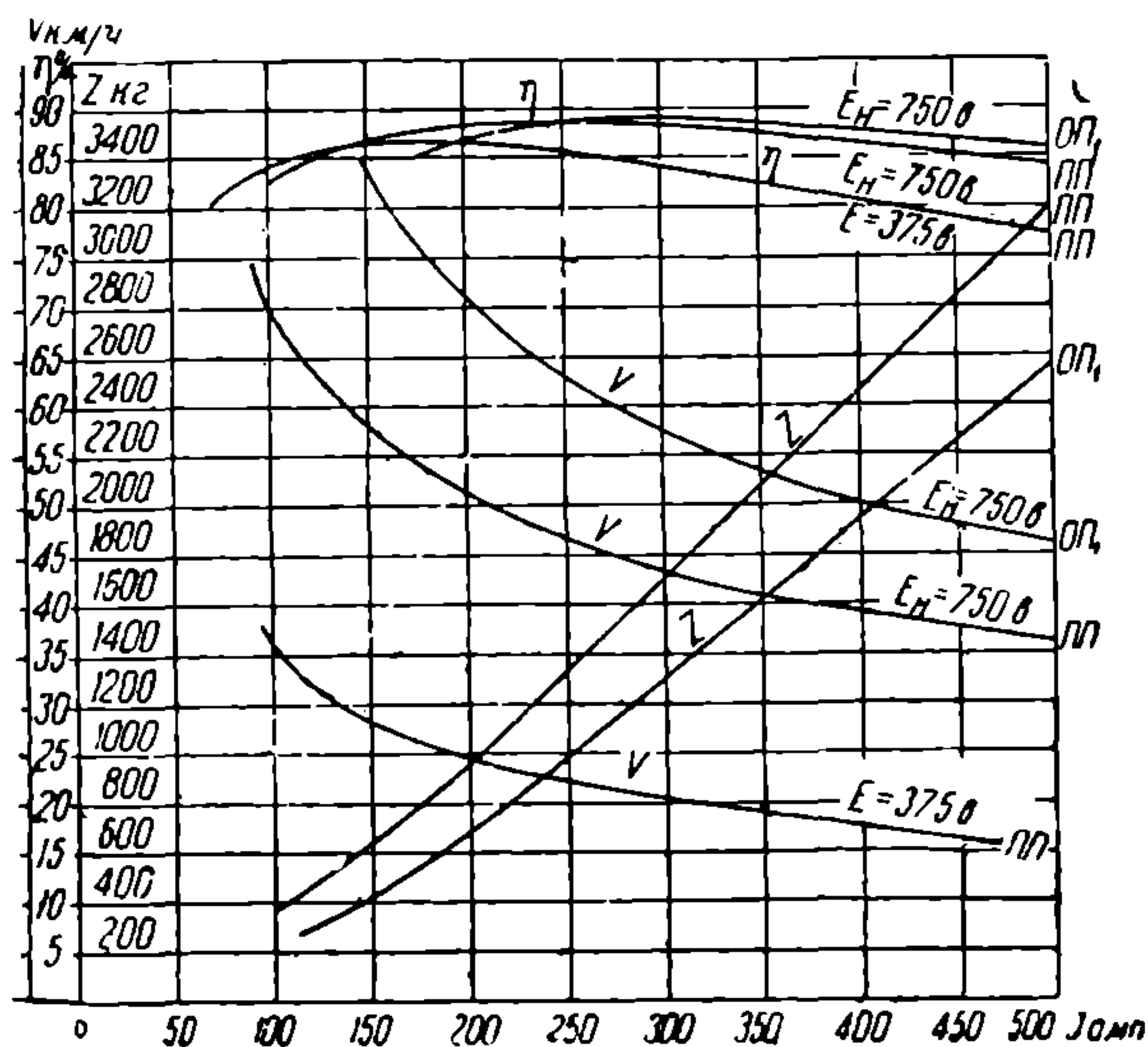


Рис. 82. Тяговые характеристики электродвигателя серии постоянного тока тип ДПН-150.

Диаметр колес D — 1 050 мм; передаточное число φ — 3,69; напряжение E_H — 750 в; сила тока $J_{час}$ — 250 ампер; $J_{дл}$ — 185 ампер; ослабление поля ОП₁ — 57,5%; самовентиляция.

где J_x — сила тока в процентах по отношению к часовому току, принятому за 100%,

Z_x — сила тяги в процентах по отношению к силе тяги, принятой за 100% при часовой мощности электродвигателя.

На основании этого уравнения, зная величину часового тока электродвигателя и развиваемую им силу тяги на ободу сцепных колес при режиме часовой мощности, может быть построена характеристика силы тяги в функции силы тока. Величина часового тока и соответствующая ему сила тяги электродвигателя определяются, исходя из условия заданных необходимых тяговых свойств электровоза.

Предположим, что необходимо построить тяговые характеристики электродвигателей, которыми должен быть оборудован 6-осный электровоз с индивидуальной зубчатой передачей с тем

чтобы он имел при режиме часовой мощности силу тяги 24 000 кг при скорости 35 км/час. Тогда сила тяги, развиваемая каждым электродвигателем, должна быть равна

$$Z = \frac{24\,000}{6} = 4\,000 \text{ кг.}$$

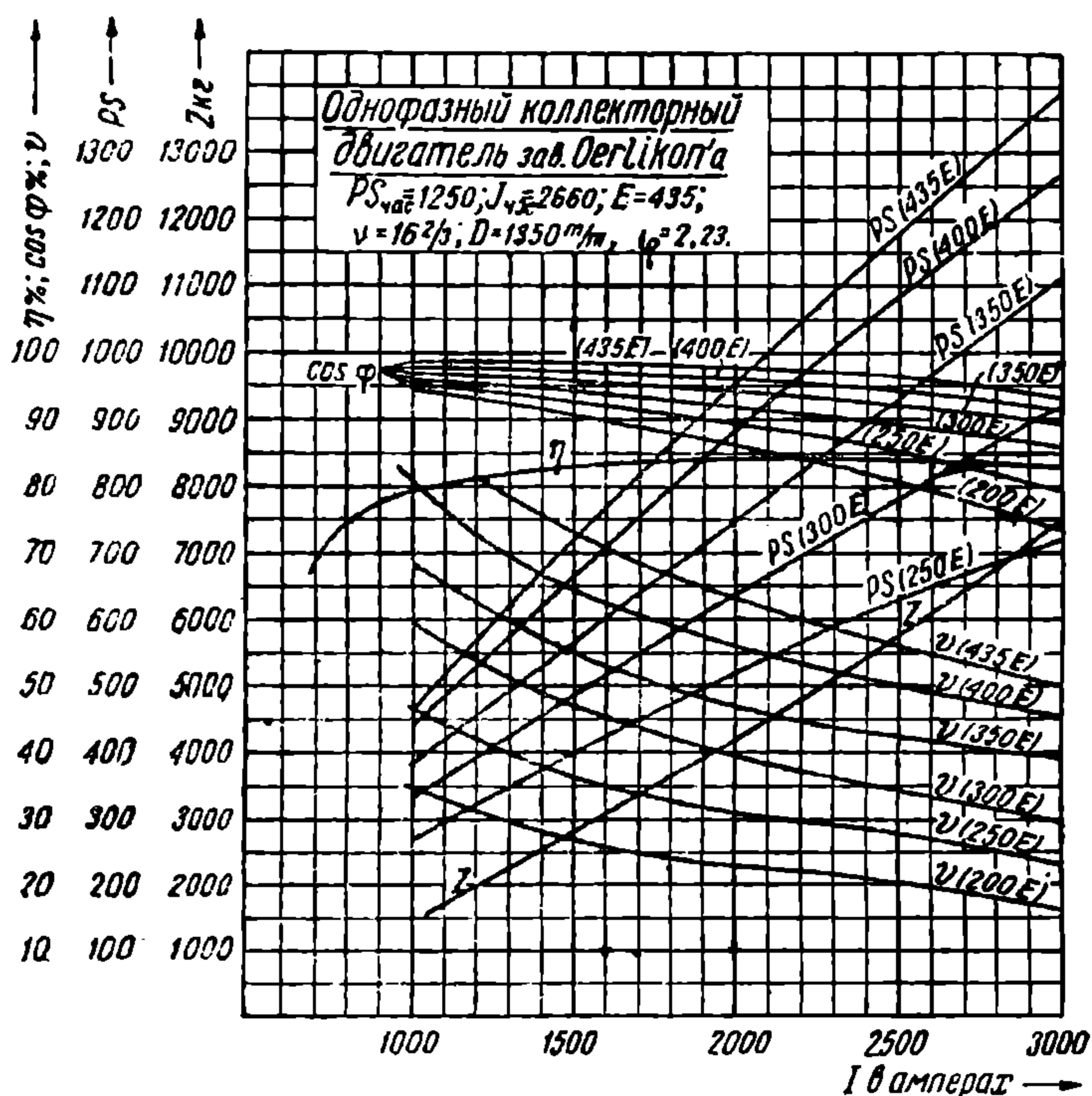


Рис. 83. Однофазный последовательный коллекторный электродвигатель зав. Oerlikon'a, мощностью $PS_{\text{час}}$ — 1 250 л. с. с независимой вентиляцией. Характеристики даны с учетом потерь в трансформаторе.

Часовая мощность электродвигателя равна:

$$N_{\text{час}} = \frac{Z \cdot v}{367} = \frac{4000 \cdot 35}{367} = 380 \text{ кВт.}$$

Сила тока при часовой мощности при данном напряжении на зажимах электродвигателя определится из выражения:

$$J_{\text{час}} = \frac{N_{\text{час}} \cdot 1\,000}{E \cdot \eta}.$$

Принимая нормальное напряжение на зажимах электродвигателя $E = 1500$ в (при напряжении в контактном проводе 3000 в) и коэффициент полезного действия

$$\eta = \eta_{\text{эм}} \quad \eta_{\text{т}} = 0,96 \quad 0,94 = 0,90$$

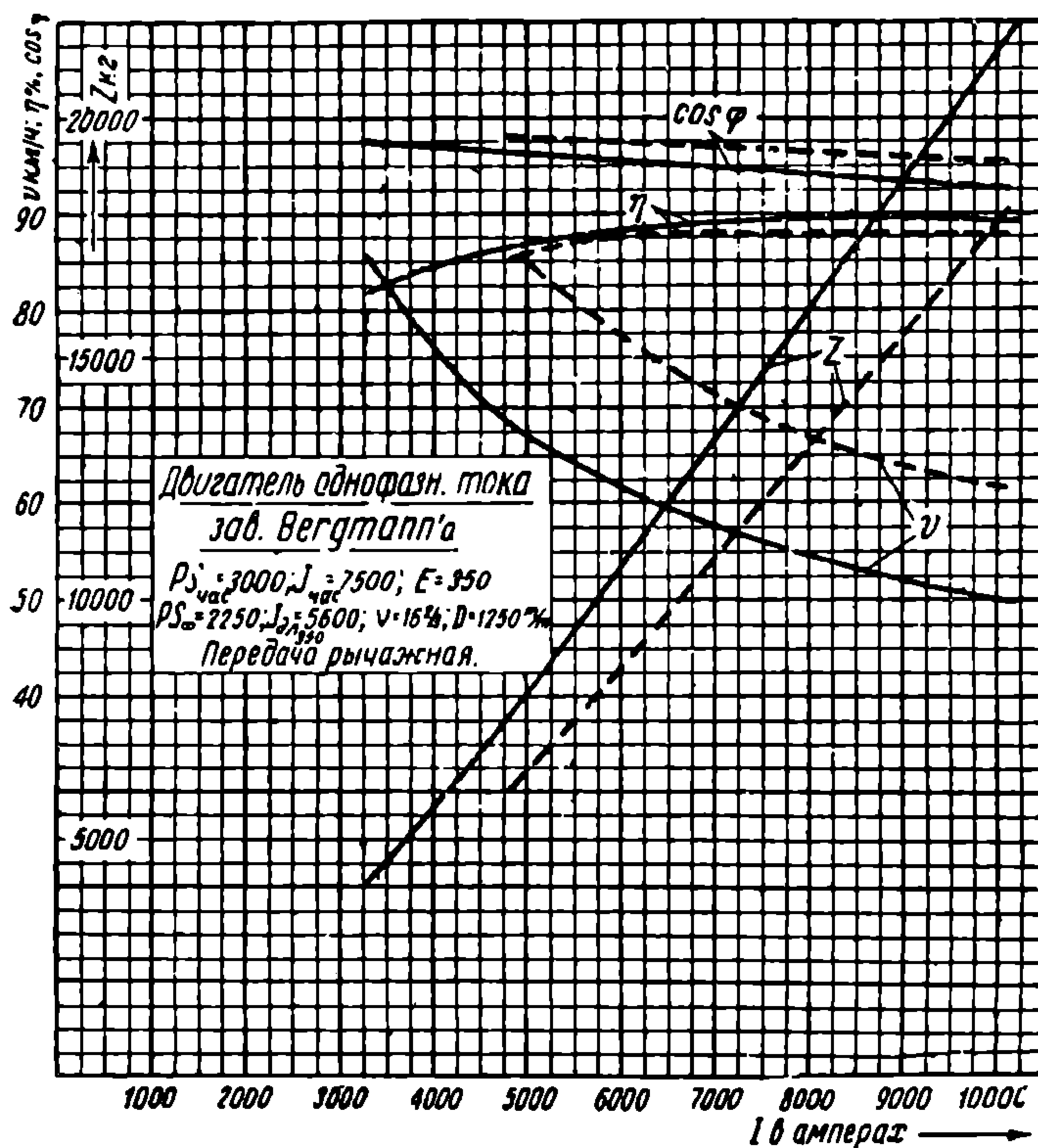


Рис. 84. Однофазный последовательный коллекторный электродвигатель зав. Bergmann'a мощностью $PS_{\text{час}} = 3000$ л. с. с независимой вентиляцией и регулированием скорости сдвигом щеток. Сплошные линии соответствуют положению щеток при наименьших, а пунктирные—при наивысших скоростях.

величина часового тока равна

$$J_{\text{час}} = \frac{380 \cdot 1000}{1500 \cdot 0,90} = 280 \text{ амп.}$$

Имея значения $Z_{\text{час}}$ и $J_{\text{час}}$, соответствующие $Z_x = 100\%$ и $J_x = 100\%$ и задаваясь различными процентами силы тока J_x , из уравнения универсальной характеристики определяются соответствующие значения в процентах Z_x , на основании которых может быть пост-

роена характеристика $Z = f(J)$. Величины скорости при различных значениях силы тока и силы тяги определяются на основании уравнения, устанавливаемого из следующего равенства:

$$N_{\text{час}} = \frac{Z \cdot v}{367} = \frac{E \cdot J \cdot \eta}{1000},$$

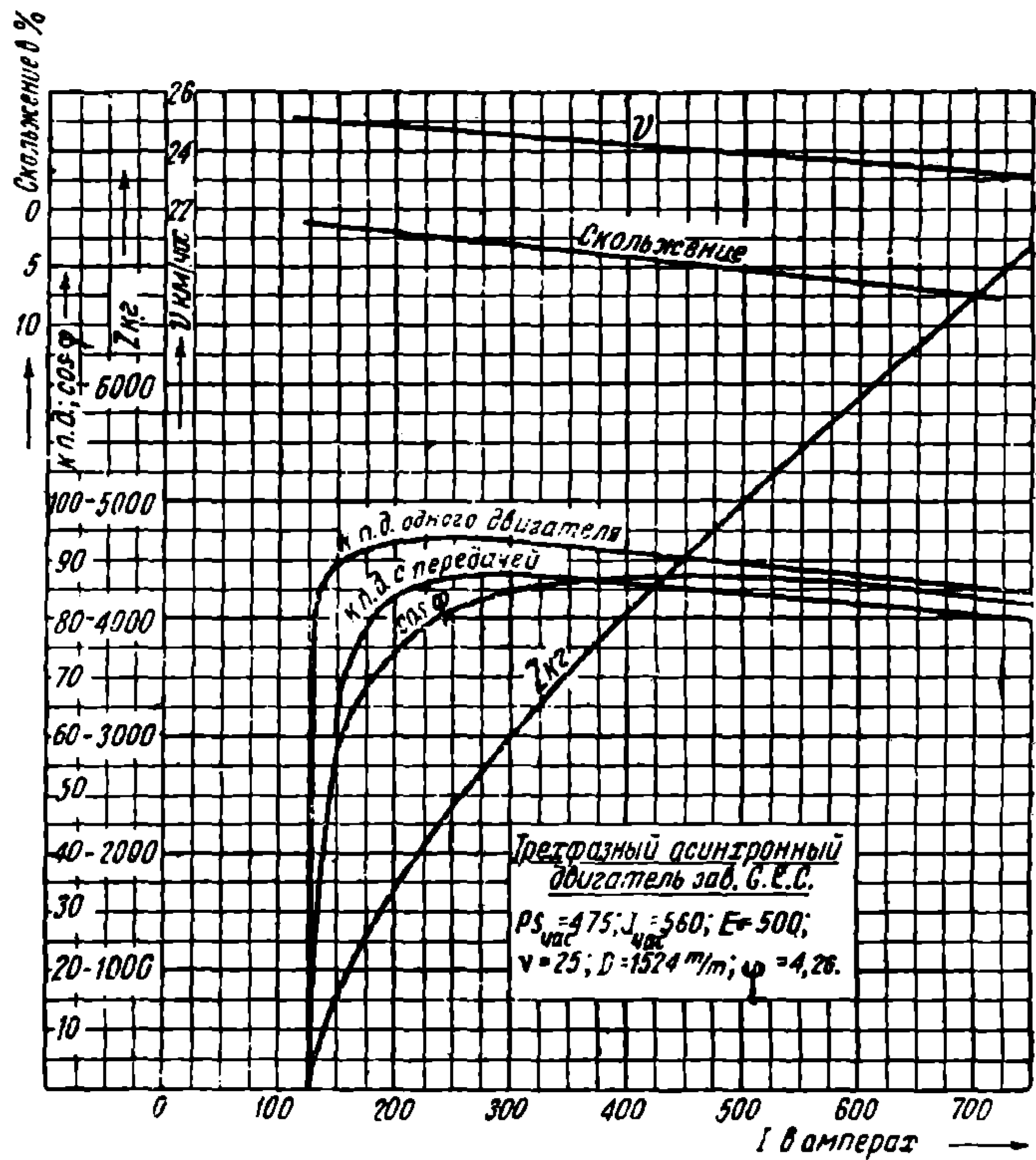


Рис. 85. Трехфазный асинхронный электродвигатель, мощность — $P_{с\text{час}}475$ л. с. с независимой вентиляцией, зав. ГЕС.

откуда

$$v = 0,367 \frac{E \cdot J \cdot \eta}{Z}.$$

Значения коэффициента полезного действия при различных силах тока могут быть в среднем приняты следующие:

J_s —	40%	60%	80%	100%	120%	140%
η —	0,86	0,89	0,90	0,90	0,89	0,87

На основании приведенных данных, ниже, в таблице 16, приводятся установленные значения силы тяги, скорости и коэффициента

полезного действия в зависимости от силы тока, по которым могут быть построены искомые тяговые характеристики электродвигателя.

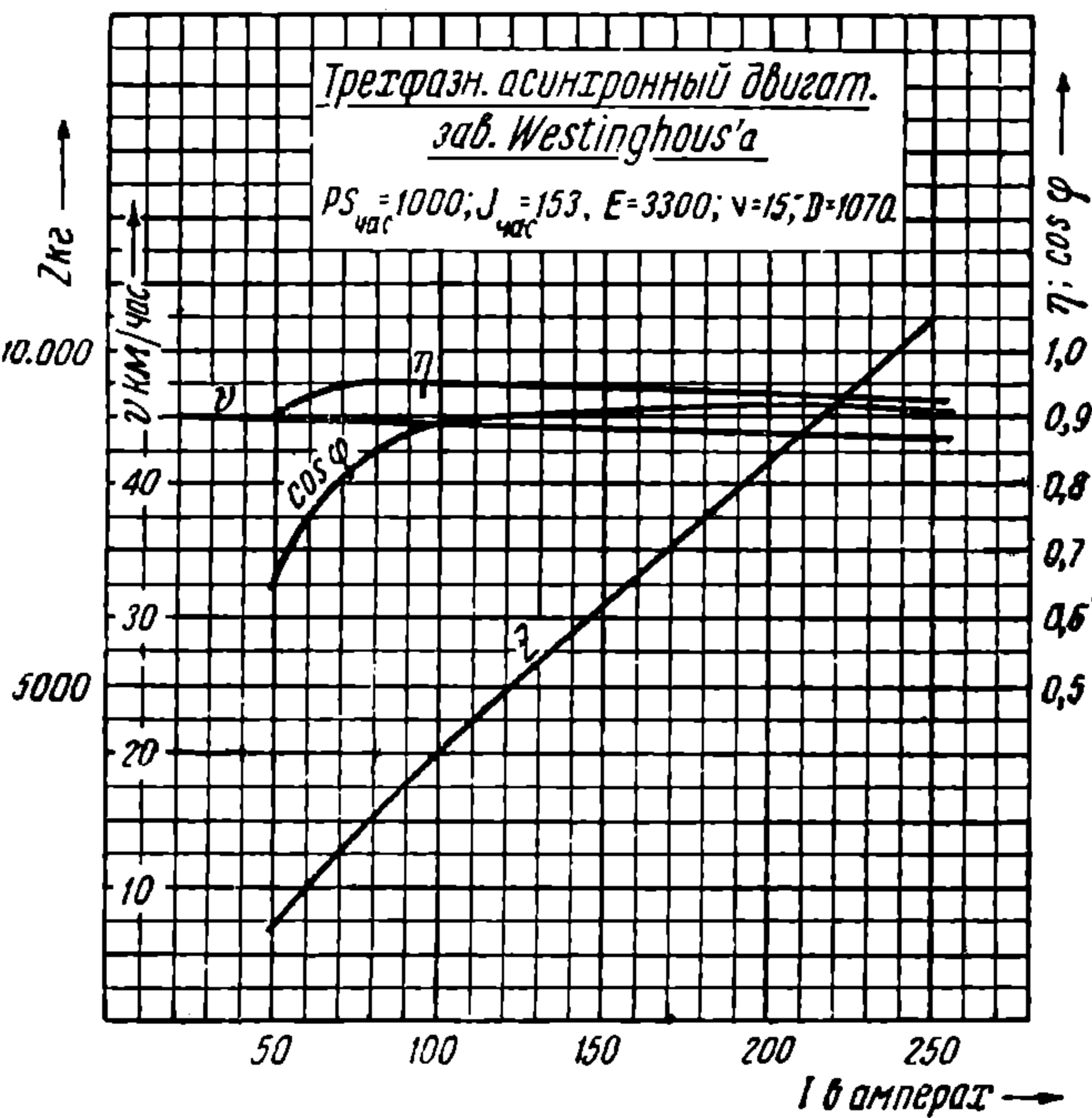


Рис. 86. Трехфазный электродвигатель зав. Westinghouse'a
Мощность $PS_{\text{час}}$ — 1 000 л. с. с независимой вентиляцией. Характеристики даны без учета потерь в передаче.

Таблица 16

Из уравнения		Тяговые характеристики			
J_x	Z_x	$J_{амп}$	$Z_{кг}$	η	$v \text{ км/час}$
40	29,2	112	1 170	0,86	45,3
60	52,6	168	2 100	0,89	39,0
80	76	224	3 040	0,90	36,4
100	100	280	4 000	0,90	35,0
120	122,8	336	4 900	0,89	33,6
140	146,2	392	5 850	0,87	32,0

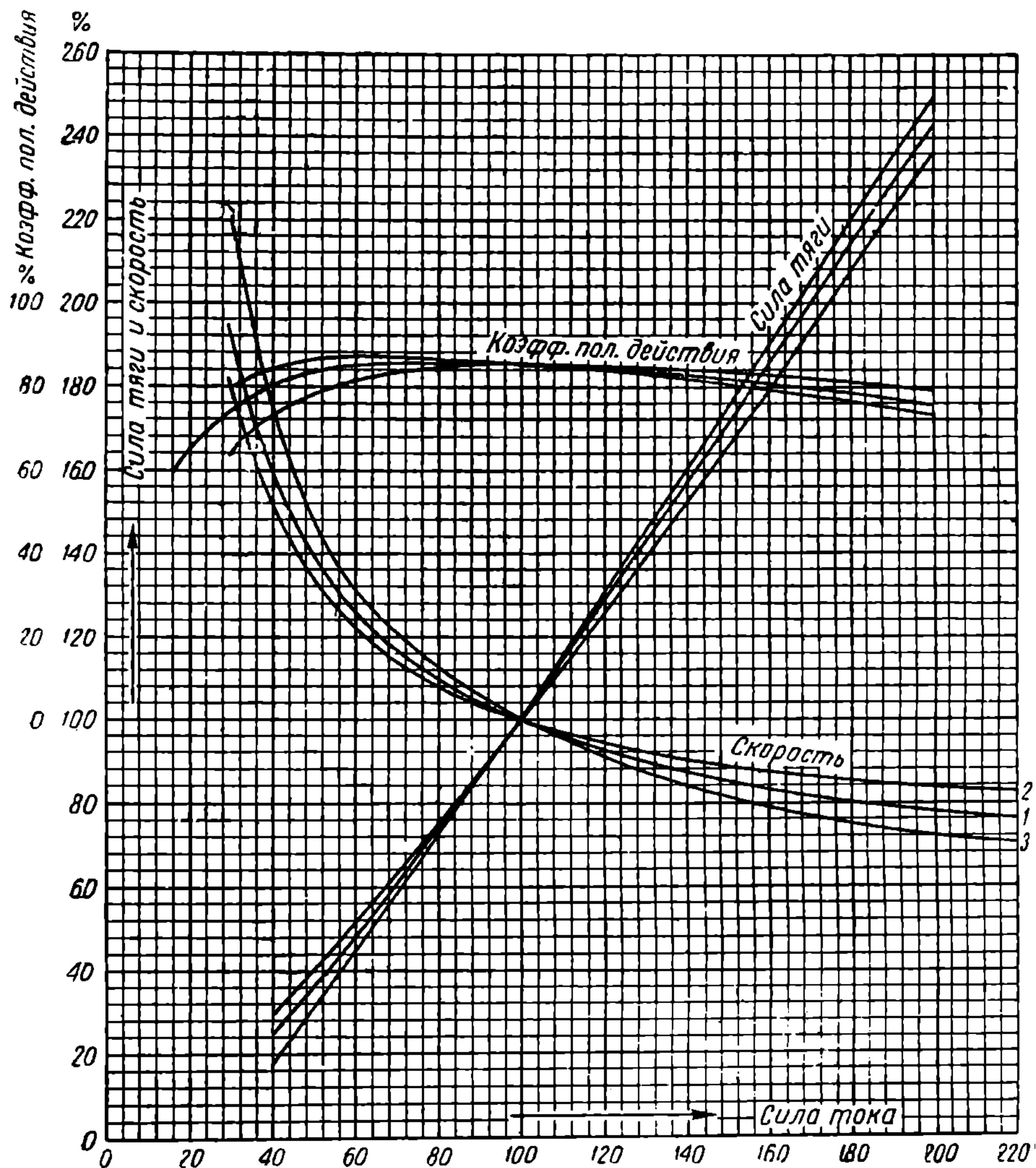


Рис. 87. Сводные характеристики для электродвигателей постоянного тока по Richey'у.

§ 22. Диграмма касательных сил тяги электровоза в функции скорости

В электровозах постоянного тока с индивидуальной зубчатой передачей от тяговых электродвигателей на ведущие оси число электродвигателей равно числу ведущих сцепных осей. Для того, чтобы иметь возможность регулировать скорость путем применения различных схем последовательного и параллельного включения

электродвигателей, число их, а следовательно и число сцепных осей электровоза, должно быть кратно двум.

Для каждой схемы включения электродвигателей, ввиду изменения напряжения на зажимах электродвигателя, скорость движения электровоза изменяется и создается отдельная кривая касательной силы тяги электровоза в функции скорости.

Отсюда диаграмма касательных сил тяги электровоза будет состоять из нескольких кривых, каждая из которых соответствует определенной схеме включения электродвигателей.

Наибольшие скорости, которые имеет электровоз, соответствуют той схеме включения электродвигателей, при которой получается полное нормальное напряжение на зажимах электродвигателя.

Тяговые характеристики электродвигателя, устанавливаемые заводом, обычно приводятся для нормального напряжения на зажимах электродвигателя. Таким образом диаграмма касательных сил тяги электровоза в функции скорости может быть построена на основании тяговых характеристик электродвигателя, количества электродвигателей и применяемых схем включения последних.

Сила тяги электровоза, при любой схеме включения электродвигателей, определяется из выражения

$$Z_{\kappa}^{\partial\lambda} = b \cdot c \cdot Z_{\kappa}^{\partial\theta},$$

где $Z_{\kappa}^{\partial\lambda}$ — касательная сила тяги электровоза,

b — число параллельных групп схемы включения электродвигателей,

c — число последовательно соединенных электродвигателей в группе,

$Z_{\kappa}^{\partial\theta}$ — сила тяги от одного электродвигателя.

Так как произведение $b \cdot c$ равно числу электродвигателей d , то сила тяги электровоза при любой схеме включения электродвигателей равна сумме сил тяги всех электродвигателей:

$$Z_{\kappa}^{\partial\lambda} = d \cdot Z_{\kappa}^{\partial\theta}.$$

Скорость хода электровоза v , при каждой схеме включения электродвигателей, определится из выражения

$$v = \frac{E^{\kappa}}{E_{\kappa}^{\partial\theta} c} v_{\kappa},$$

где E^{κ} — напряжение в контактном проводе,

$E_{\kappa}^{\partial\theta}$ — нормальное напряжение на зажимах электродвигателя,

v_{κ} — скорость хода электровоза, приводимая в тяговых характеристиках электродвигателя, при нормальном напряжении на зажимах.

Если нормальное напряжение на зажимах электродвигателя

$$E_{\kappa}^{\partial\theta} = \frac{E^{\kappa}}{2},$$

то нормальная схема включения представляет по два последовательно соединенных электродвигателя в каждой параллельной группе, т. е.

$$c = 2.$$

В том случае, когда в схеме включения имеется большее число последовательно соединенных электродвигателей, положим $c_1 = 6$ или $c_2 = 3$ скорости соответственно будут равны $v_1 = \frac{1}{3} v_n$ и

$$v_2 = \frac{2}{3} v_n$$

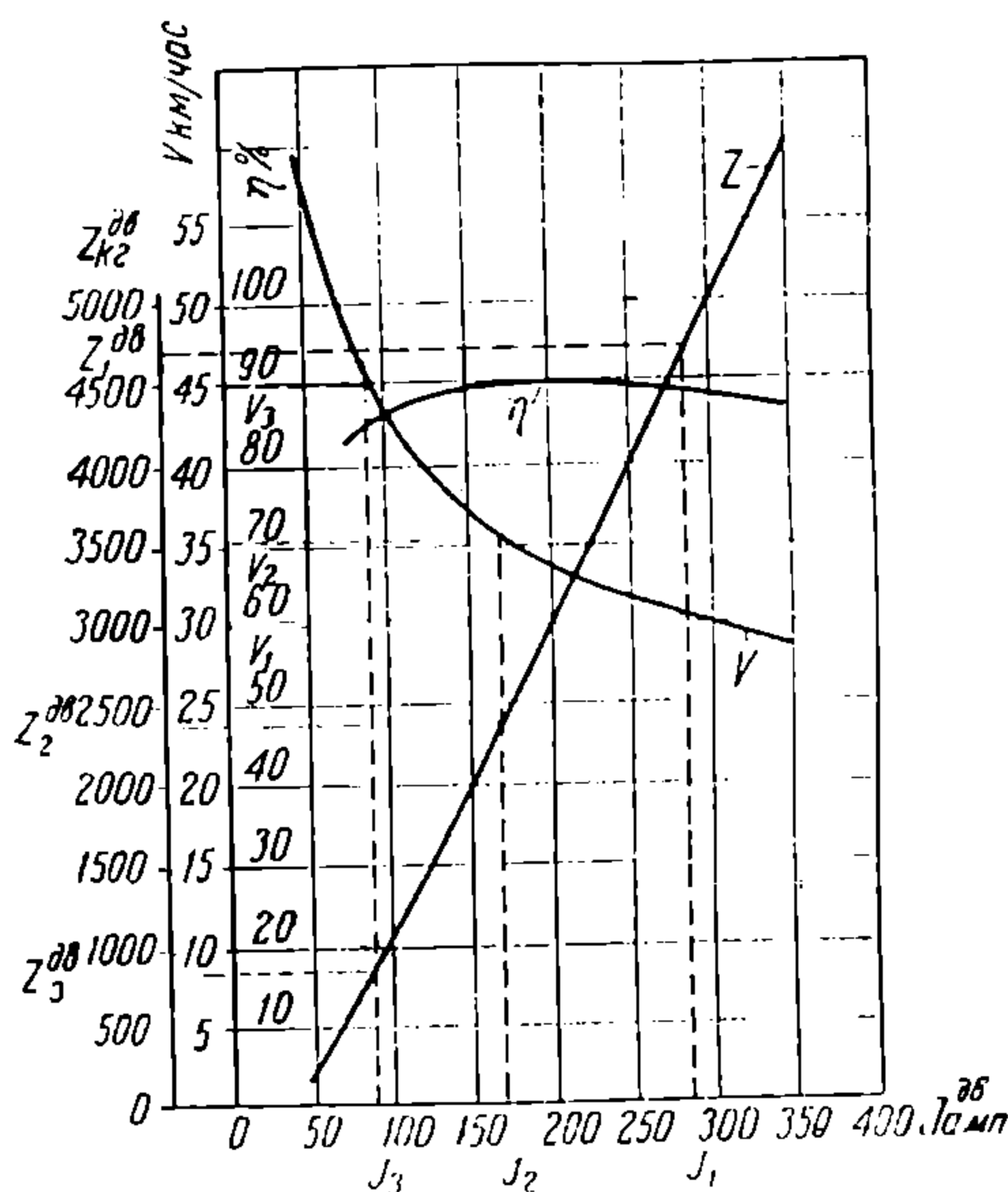


Рис. 88.

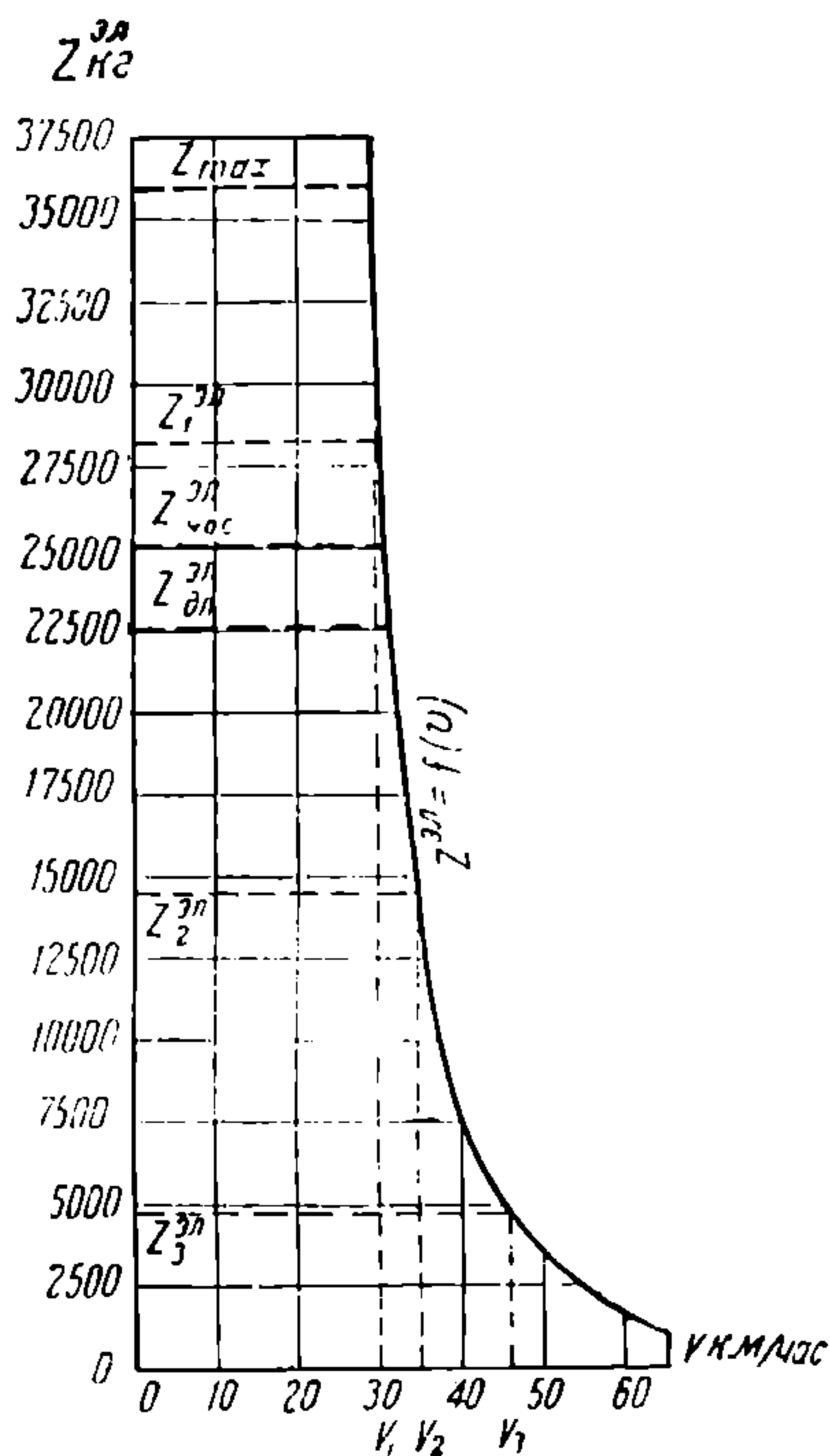


Рис. 89.

Сила тока, потребляемая электровозом $J^{эл}$, равна

$$J^{эл} = b J^{дв},$$

где $J^{дв}$ — потребление тока одним электродвигателем.

Имея тяговые характеристики электродвигателя, построение по ним кривой силы тяги электровоза в функции скорости осуществляется просто.

Для примера возьмем тяговые характеристики электродвигателя, приведенные на рис. 88.

Известно, что электровоз имеет d электродвигателей. По тяговым характеристикам электродвигателя для любой скорости v_1 можно определить соответствующие этой скорости силу тяги $Z_1^{дв}$ и потребление тока электродвигателем $J_1^{дв}$.

Зная, что сила тяги электровоза,

$$Z^{\text{эл}} = d Z^{\text{дв}},$$

может быть построена кривая $Z^{\text{эл}} = f(v)$, приведенная на рис. 89.

Аналогично кривой $Z^{\text{эл}} = f(v)$ может быть построена кривая расхода тока электровозом в функции скорости, т. е. $J^{\text{эл}} = f(v)$ на основании уравнения $J^{\text{эл}} = b J^{\text{дв}}$.

Ограничение силы тяги электровоза по мощности электродвигателей будет определяться режимом работы электродвигателя и соответствующей величиной: длительной, часовой и максимальной мощности.

В соответствии с этим электровоз имеет три предельных значения силы тяги по мощности электродвигателей:

$Z_{\text{дл}}^{\text{эл}}$ — сила тяги электровоза, соответствующая режиму длительной мощности электродвигателей,

$Z_{\text{час}}^{\text{эл}}$ — сила тяги электровоза, соответствующая режиму часовой мощности электродвигателей,

$Z_{\text{макс}}^{\text{эл}}$ — сила тяги электровоза, соответствующая режиму максимальной мощности электродвигателя.

Имея на диаграмме тяговых характеристик значения силы тока электродвигателя, соответствующие величинам длительной, часовой и максимальной мощности электродвигателя, по кривым тяговых характеристик (рис. 88) определяются соответствующие им значения: силы тяги электродвигателя $Z_{\text{дл}}^{\text{дв}}$, $Z_{\text{час}}^{\text{дв}}$, $Z_{\text{макс}}^{\text{дв}}$, и скорости $v_{\text{дл}}$, $v_{\text{час}}$, $v_{\text{макс}}$, а по ним, аналогично предыдущему, может быть построено (на рис. 89) ограничение силы тяги электровоза

$$Z_{\text{дл}}^{\text{эл}}, Z_{\text{час}}^{\text{эл}}, Z_{\text{макс}}^{\text{эл}}.$$

Построение кривой $Z^{\text{эл}} = f(v)$, приведенное на рис. 89, соответствует одной определенной схеме включения электродвигателей, называемой нормальной рабочей, так как при ней получается нормальное напряжение на зажимах электродвигателей.

Для каждой другой схемы включения электродвигателей будет соответствовать своя кривая $Z^{\text{эл}} = f(v)$, построение которой может быть произведено на основании приведенных ранее уравнений.

В электровозах, находящихся в эксплуатации на электрифицируемых магистральных жел. дор. СССР, при наличии на каждом из них шести электродвигателей, существуют три схемы включения электродвигателей. Следовательно при полном поле (без применения шунтирования) на диаграмме касательных сил тяги электровоза имеем три кривых

$$Z^{\text{эл}} = f(v).$$

Для примера определим при шести электродвигателях значения силы тяги электровоза и силы тока в функции скорости, для каж-

дой из трех схем включения электродвигателей, тяговые характеристики которых приведены ранее в § 21.

I. Схема включения: все шесть электродвигателей соединены последовательно, т. е. $b = 1, c = 6$

Сила тяги кг	35 100	29 400	24 000	16 240	12 600	7 020
Сила тока амп	392	336	280	224	168	112
Скорость хода км/час	10,7	11,2	11,7	12,1	13,0	15,1

II. Схема включения: две параллельные группы по три последовательно-соединенных электродвигателя в каждой группе, т. е. $b = 2, c = 3$.

Сила тяги кг	35 100	29 400	24 000	18 240	12 600	7 020
Сила тока амп	784	672	560	448	336	224
Скорость хода км/час	21,3	22,4	23,3	24,3	26,6	30,2

III. Нормальная рабочая схема включения: три параллельные группы по два последовательно соединенных электродвигателя в каждой группе, т. е. $b = 3, c = 2$.

Сила тяги кг	35 100	29 400	24 000	18 240	12 600	7 020
Сила тока амп	1 176	1 008	840	672	504	336
Скорость хода км/час	32,0	33,6	35	36,4	39,0	45,3

На основании полученных данных могут быть построены кривые силы тяги и силы тока электровоза в функции скорости для каждой схемы включения электродвигателей.

В том случае, когда при каждой схеме включения электродвигателей применяется шунтировка, в зависимости от числа степеней ослабления магнитного потока, соответственно увеличится количество кривых сил тяги электровоза для каждой схемы включения электродвигателей.

При двух степенях ослабления магнитного потока, равных 67 и 50% (что имеет место в электровозах, применяемых на электрифицируемых жел. дор СССР), для каждой схемы включения электродвигателей будут три кривых касательных сил тяги электровоза в функции скорости. Для трех схем включения электродвигателей на диаграмме касательных сил тяги электровоза получатся девять кривых. Построение кривых сил тяги электровоза при шунтировке поля производится на основании тяговых характеристик электродвигателя с шунтированным полем аналогично изложенному ранее.

На рис. 90 приведена диаграмма касательных сил тяги электровоза ВЛ-19-01 в зависимости от скорости при различном соединении электродвигателей.

§ 23. Общие сведения об электрооборудовании электровозов постоянного тока

На электровозах постоянного тока, применяемых на жел. дор. СССР, кроме тяговых электродвигателей, расположенных под полом кузова, внутри последнего находится вспомогательное электрооборудование, состоящее из следующих основных машин:

1) двух мотор-вентиляторов, которые служат для создания независимой вентиляции тяговых электродвигателей;

2) двух мотор-компрессоров, служащих для получения сжатого воздуха;

3) одного мотор-генератора, необходимого для питания обмоток возбуждения электродвигателей при рекуперативном торможении;

4) одного генератора цепи управления, служащего для питания цепей управления и цепей внутреннего и сигнального освещения электровоза.

Кроме этого основного оборудования на электровозе, в силу сложности устройства указанных вспомогательных машин на непосредственное питание их током при напряжении 3 000 в, устанавливается дополнительная машина—динамомотор, который осуществляет питание вспомогательных машин током при напряжении 1 500 в. Следует отметить, что устройство вспомогательных машин на напряжение 3 000 в не представляет непреодолимым препятствием, и установка на электровозе динамомотора не является исключительно необходимой. На электровозах, построенных для Сурамского перевала итальянской фирмой Тес-томасиа Italiano, отсутствует динамомотор и питание вспомогательных машин осуществляется непосредственно при напряжении 3 000 в.

Для улучшения условий рекуперации и обеспечения устойчивого режима торможения на итальянских электровозах, кроме указанных ранее вспомогательных машин, установлена еще дополнительная машина—мотор-стабилизатор. На электровозах, построенных в СССР и по заказу в Америке, находящихся в эксплуатации на Сурамском перевале, устойчивость рекуперативного торможения достигается путем включения в цепь якорей электродвигателей стабилизирующих сопротивлений.

Стабилизирующие сопротивления, включенные в цепь якорей тяговых электродвигателей, выравнивают распределение нагрузок между отдельными группами электродвигателей и обеспечивают устойчивый режим рекуперативного торможения при различных колебаниях напряжения в контактном проводе.

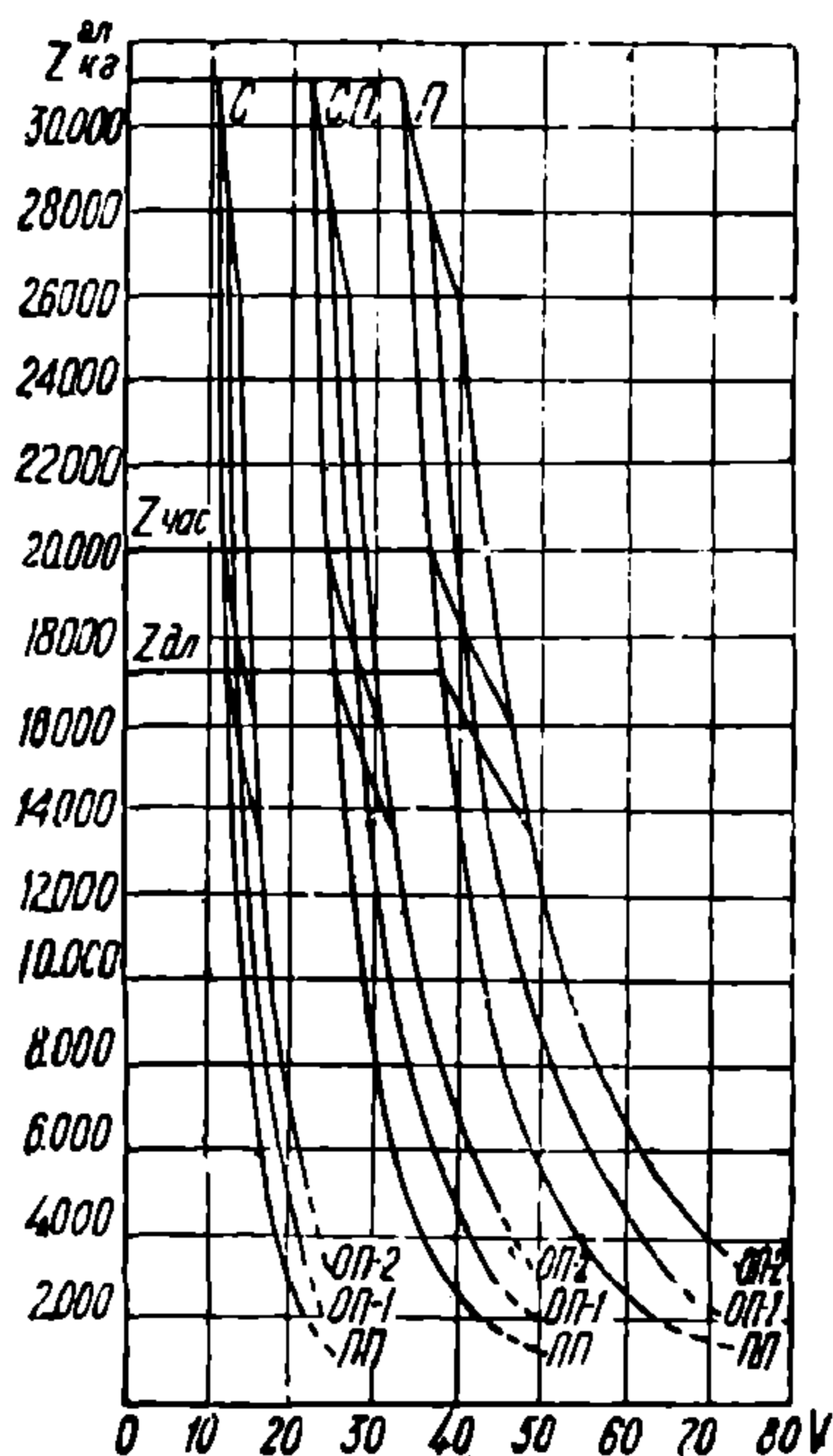


Рис. 90. Диаграмма касательных сил тяги электровоза ВЛ-19-01 в зависимости от скорости при различном соединении электродвигателей. Напряжение в контактной сети 3 000 вольт.

Вследствие сложности и опасности в применении контроллеров непосредственного управления при больших мощностях электродвигателей и высоком напряжении, на электровозах применяется аппаратура управления, состоящая из двух цепей: силовой высоковольтной электрической цепи и низковольтной цепи управления напряжением 50 в, что создает условия безопасности для машиниста, соприкасающегося с ней.

Аппаратура управления тяговыми электродвигателями высоковольтной электрической цепи состоит из контакторов с групповым и индивидуальным электропневматическим или электромагнитным приводом, и, кроме того, для целей изменения направления движения в этой цепи находятся реверсор и несколько реле.

Групповые контакторы служат для переключения тяговых электродвигателей с последовательного соединения на последовательно-параллельное и параллельное, которое может быть произведено как при работе электродвигателей с потреблением тока, так и при рекуперации. Индивидуальные контакторы служат для включения пусковых сопротивлений и необходимых переключений в силовой цепи.

Реверсор производит переключение обмоток главных полюсов и тем изменяет направление вращения тяговых электродвигателей.

Изменение вращения в ту или другую сторону тяговых электродвигателей, а следовательно и направления движения, осуществляется соответственно тем или другим рабочим положением реверсора.

Для защиты тяговых электродвигателей и аппаратуры силовой цепи от токов короткого замыкания и перегрузок как при работе электродвигателей с потреблением энергии, так и при рекуперации на электровозе устанавливаются быстродействующий автоматический выключатель, реле перегрузки и реле перенапряжения.

Помимо главной силовой цепи высокого напряжения имеется еще вспомогательная электрическая цепь высокого напряжения, к которой тем или иным способом, в зависимости от напряжения, присоединяются указанные ранее вспомогательные машины. Кроме вспомогательных машин к этой цепи присоединяются измерительные приборы: вольтметр и счетчики, а также отопительные печи, которые иногда присоединяются двумя последовательно-параллельными группами. Управление электровозом (как указывалось ранее) производится через низковольтную цепь управления посредством контроллера.

Питание низковольтной цепи управления производится от генератора тока управления и от аккумуляторной батареи. Через низковольтную цепь контроллера происходит управление всеми контакторами и производятся все переключения в высоковольтной цепи.

Контроллер машиниста является как бы вспомогательным контроллером к главному контакторному контроллеру высоковольтной цепи.

Эта система управления электровозом, называемая «multiple unit» или система «объединенного управления поездом» в эксплуатационном отношении, помимо безопасности, имеет еще то большое преимущество, что позволяет при одинаковых электровозах, соединенных электрически, управлять несколькими электровозами из одного пункта, через один контроллер.

Все переключения в силовых высоковольтных цепях электровозов происходят одновременно, и электровозы будут развивать равные силы тяги, если все электродвигатели имеют одинаковые характеристики и диаметры колес электровозов. В электровозах, построенных американской фирмой General Electric Company, находящихся в эксплуатации на Сурамском перевале, контроллер машиниста имеет четыре рукоятки: главную, тормозную, реверсивную и селективную, при помощи которых и производятся все схемы соединения тяговых электродвигателей. Рукоятки контроллера находятся во взаимной блокировке, что обеспечивает правильную последовательность приведения их в действие.

Реверсивная рукоятка имеет два рабочих положения, соответствующих движению электровоза «вперед» и «назад». Главная рукоятка, при помощи которой осуществляются все схемы соединения электродвигателей и включение последовательно в цепь электродвигателей пусковых сопротивлений, имеет нулевое положение и 36 рабочих. Из 36 рабочих положений три нижеуказанных положения главной рукоятки являются ездовыми: 16-е положение соответствует последовательному соединению электродвигателей, 27-е—последовательно-параллельному, т. е. две параллельные группы по три последовательно соединенных электродвигателя, и 36-е—параллельному, т. е. три параллельные группы по два последовательно соединенных электродвигателя. Последнее соответствует нормальному напряжению на зажимах каждого электродвигателя. Промежуточные положения, по которым главная рукоятка перемещается непрерывно при переходе от одного ходового положения в другое, соответствуют той или другой схеме соединения электродвигателей с последовательным включением в их цепь пусковых сопротивлений.

Тормозная рукоятка служит для перевода на рекуперативный режим тяговых электродвигателей, а также и для включения индуктивных шунтов, благодаря которым получается ослабление магнитного поля электродвигателя до 67—50%, вследствие чего, как указывалось ранее, получается повышение скорости движения при каждой схеме соединения электродвигателей.

Селективная рукоятка служит для получения последовательно-параллельного включения якорей электродвигателей при рекуперации, а также для включения стабилизирующих сопротивлений.

Электрическое оборудование в кузове электровоза располагается следующим образом.

Аппаратура высоковольтной силовой цепи помещается посредине кузова в отдельной высоковольтной двухэтажной камере, вход в которую, благодаря блокирующим устройствам в дверях, возможен только при опущенном пантографе, т. е. когда электро-воз отключен от контактной цепи.

На каждом конце кузова расположены кабины машиниста, где помещаются контроллер и все необходимые приборы управления.

Благодаря двум постам управления по концам кузова при любом положении электровоза обеспечивается движение «головой вперед» и отпадает надобность в поворотных приспособлениях. Вспомогательные машины располагаются между кабинами машиниста и камерой высокого напряжения. На рис. 91 приведено расположение электрооборудования на электровозе С-10 американского типа.

В настоящее время на электрифицируемых ж. д. СССР находятся в эксплуатации следующие четыре типа товарных шестиосных электровозов постоянного тока с индивидуальной передачей.

ВЛ-19-01 советской конструкции, построенный заводами «Динамо» (электрическая часть) и Коломенским (механическая часть).

С-10—построенный в Америке фирмой General Electric С°.

С_с-11—построен по американскому типу заводами «Динамо» и Коломенским.

С^и-10 построен в Италии фирмой Tescomasia Italiano.

Основные данные указанных типов электровозов, а также предварительные данные пассажирского электровоза ПБ советской конструкции приводятся в таблице 17.

Таблица 17

Основные данные	ВЛ-19-01	С-10	С _с -11	С ^и -10	ПБ
Длина между буферами мм . .	16 018	16 470	16 470	16 500	16 578
кузова	13 500	13 500	13 500	13 690	—
Общая база	11 800	12 200	12 200	11 900	—
Жесткая	4 000	4 200	4 200	4 100	4 800
Диаметр колес <i>D</i>	1 220	1 200	1 200	1 200	1 850
Передаточное число φ	3,74	4,45	4,45	4,45	3,02
Сцепной вес конструктивный <i>m</i>	114	125	125	132	64,5
Давление на ось <i>m</i>	19	20,8	20,8	22,0	21,5
Часовой режим. Мощность л. с.	2 760	2 760	2 760	3 050	2 760
Сила тяги кг .	20 000	24 000	24 000	27 500	10 700
Скорость км/ч.	36,5	30,5	30,5	29,5	70,0
Длительн. режим. Мощность л. с.	2 430	2 430	2 430	2 500	2 430
Сила тяги кг .	17 250	20 500	20 500	22 500	9 300
Скорость км/ч.	38,0	31,5	31,5	30,5	73,0
Сила тяги максим. (8 мин.) кг.	31 100	36 000	36 000	37 500	—
Скорость конструктивн. км/час.	75	65	65	65	130

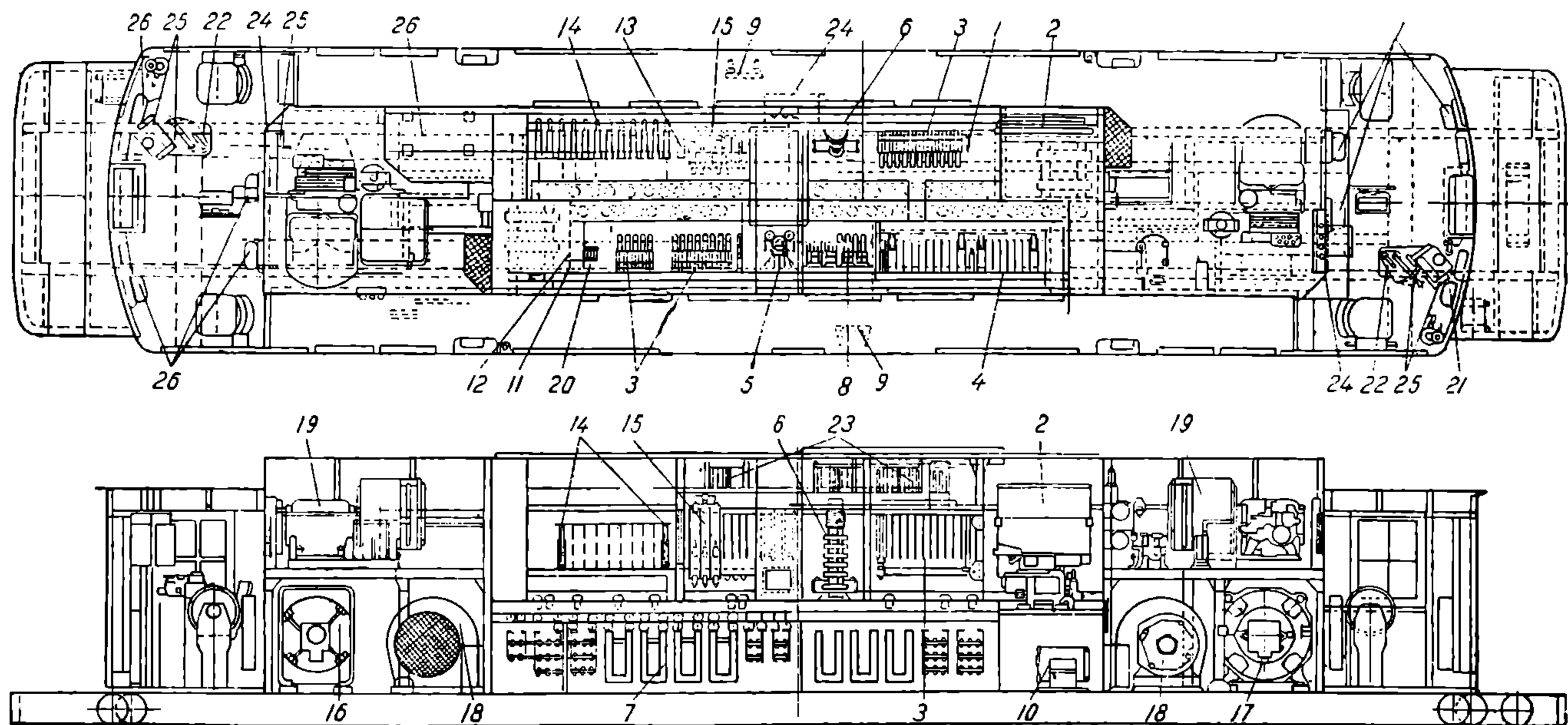


Рис. 91. Схема расположения электрического оборудования на плане и в разрезе кузова электровоза С-10.

1—главный раз'единитель; 2—быстродействующий выключатель; 3—индивидуальные контакторы; 4—последовательно-параллельный переключатель; 5—реверс; 6—тормозной переключатель; 7—сопротивление; 8—отключатель тяговых двигателей; 9—розетка для ввода электровоза в депо; 10—индуктивные шунты; 11—раз'единитель вспомогательных цепей; 12—плавкий предохранитель вспомогательных цепей; 13—плавкий предохранитель мотор-генератора; 14—электромагнитные контакторы вспомогательных цепей; 15—пусковые панели; 16—динамомотор; 17—мотор-генератор; 18—мотор-вентилятор; 19—мотор-компрессор; 20—переключатели мотор-компрессоров; 21—отопительные печи; 22—контроллеры машиниста; 23—сопротивления цепи возбуждения мотор-генератора; 24—клеммовые коробки; 25—кнопочные выключатели; 26—аккумуляторная батарея.

§ 24. Общие сведения о моторных вагонах постоянного тока

Моторный вагон, в отличие от электровоза, является одновременно и тяговым локомотивом и помещением для пассажиров, почему все дополнительное электрооборудование, а также и тяговые электродвигатели располагаются под полом кузова вагона.

В кузове вагона находится лишь кабинка машиниста, что дает возможность использовать почти все помещение вагона для пассажиров.

Моторные вагоны обычно устраиваются четырехосные на тележках с диаметром колес от 900 до 1100 мм.

Количество тяговых электродвигателей, в зависимости от принятого соотношения нормальных напряжений в контактном проводе и на зажимах электродвигателей, может быть равно двум или четырем.

Мощность каждого электродвигателя ограничивается габаритными размерами, минимальным расстоянием нижней точки электродвигателя от головки рельса, принимаемым диаметром колес и высотой пола вагона.

На европейских пригородных жел. дор. с мотор вагонной тягой, мощность тяговых электродвигателей ограничивается величиной 250—275 л. с. и только в исключительных случаях доводится до 350 л. с. Тяговые электродвигатели устраиваются самовентилирующие, т. е. с естественной вентиляцией, так как, во-первых, в силу частых остановок и работы электродвигателя при трогании в пределах между часовой и максимальной силой тяги, в этом такой необходимости, как в электровозах, нет, а во-вторых, устройство искусственной вентиляции вызвало бы необходимость в установке мотор вентилятора, расположение которого в мотор-вагоне по конструктивным соображениям вызывает большие затруднения.

Передача усилий от тяговых электродвигателей на обод колес тележек происходит при помощи зубчатой передачи.

Также, как и в электровозе, в мотор-вагоне при напряжении в контактном проводе 1500 в и более имеются две электрических цепи, главная силовая высоковольтная цепь и низковольтная цепь управления, питаемая постоянным током напряжением 50 в от мотор-генератора.

Вспомогательное оборудование мотор-вагона пригородных жел. дор. состоит из мотор-генератора, мотор-компрессора, расположенных под полом, которые обычно присоединены к высокому напряжению (1500 в), и отопительных печей, расположенных в кузове мотор-вагона под диванами.

Помимо тяговых электродвигателей в главной силовой высоковольтной цепи находятся контакторы, пусковые сопротивления, реверсор и реле максимальное и ускорения.

Электропневматические контакторы, при помощи которых осуществляются схемы последовательного и параллельного соединения электродвигателей, могут быть как с индивидуальным, так и с групповым приводом.

Управление мотор-вагоном, также как и электровоза, производится посредством контроллера, расположенного в кабине машиниста.

Вследствие применения управления мотор-вагоном по системе multiple unit создается большая маневренность в составлении поездных единиц или, как их называют, секций, состоящих из моторного вагона и одного или нескольких прицепных немоторных вагонов.

Это обстоятельство, а также устройство кабинки машиниста во всех прицепных вагонах с наружных концов, исключает необходимость в производстве маневров на конечных станциях и прибывшая секция, сейчас же после высадки и посадки вновь пассажиров, может быть отправлена. Отсутствие маневров, гибкость составления поезда из нескольких секций в часы интенсивного движения, большие скорости движения, уменьшение эксплуатационных расходов по сравнению с паровой тягой, все это служит основанием для широкого внедрения электрификации пригородных участков магистральных жел. дор. подходящих к крупным центрам, характеризующихся большими пассажиропотоками, кроме того крайне неравномерным как по часам суток, так и по отдельным участкам — зонам.

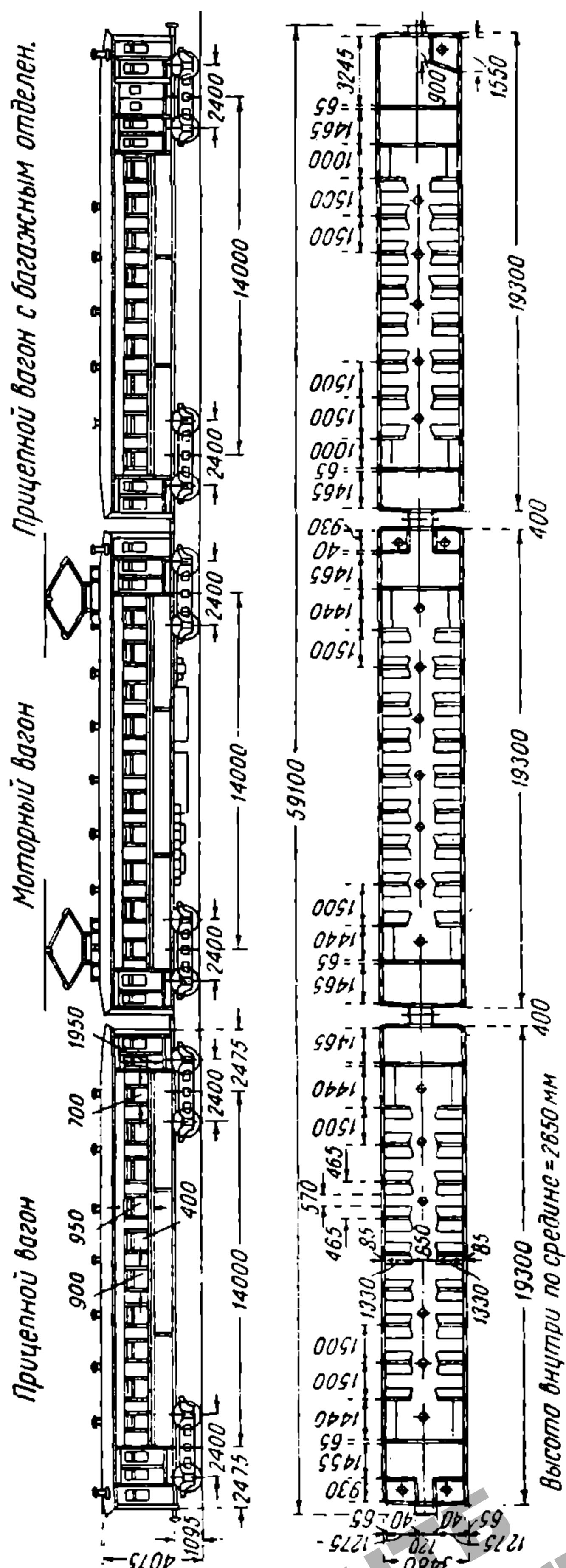


Рис. 92. Основная поездная единица в пригородном мотор-вагонном движении.

На электрифицируемых пригородных участках жел. дор. московского узла состав поездной единицы-секции, принят из одного моторного вагона и двух прицепных, расположенных по краям.

В моторном вагоне имеются четыре электродвигателя, мощностью каждый 150 квт (ДП-150), при часовом токе 210 амп. Нормальное напряжение на зажимах электродвигателя—750 в, что при напряжении в контактном проводе 1500 в, вызывает нормально рабочую схему соединения электродвигателей в две параллельные группы по два последовательно соединенных электродвигателя.

Таким образом при наличии четырех электродвигателей применяются две схемы соединения их: последовательное и, при полном напряжении на зажимах электродвигателей—последовательно параллельное, т. е. две параллельные группы по два последовательно соединенных электродвигателя.

Основные данные о весе моторного и прицепных вагонов поездной единицы, а также о населенности (вместимости) пассажиров в каждом вагоне приводятся ниже в таблицах 18 и 19.

Таблица 18

Элементы веса вагона	Моторн. вагон в т	Прицепн. вагон без багажного отделения в т	Прицепной вагон с багажным отделением
Вес вагона без электрического оборудования	37	36	36
Вес всего электрического оборудования включая отопление .	21	1,5	1,5
Полный вес вагона с электрическим оборудованием	58	37,0	37,5
Вес пассажиров при нормальном наполнении .	10	10	10*
Всего	68	47,5	47,5

* Вес пассажиров и багажа.

Таблица 19

Наименование вагона	Сидеть (челов)	Стоять (челов)	Всего (челов)
Моторный вагон	108	52	160
Прицепной вагон без багажного отделения	108	52	160
Прицепной вагон с багажным отделением	92	43	135
Всего	368	147	455

Таким образом вместимость поездной единицы (рис. 92) при нормальном наполнении составляет 455 человек.

Статья 4. ТЯГОВЫЕ РАСЧЕТЫ

§ 25. Силы сопротивления движению

При движении поезда или отдельно электровоза или мотор-вагона появляются силы, препятствующие движению, силы сопротивления движению.

Силы сопротивления появляются в различных точках приложения их в поезде. При производстве тяговых расчетов величину этих сил принято выражать эквивалентными силами сопротивления движению, отнесенными к ободу колес.

Общее полное сопротивление движению поезда, или части его, на каком-либо элементе пути жел. дор. при равномерном движении складывается из основного полного сопротивления движению W_0 — сопротивления, действующего на поезд при движении его на прямом и горизонтальном участке пути, и тех дополнительных сопротивлений, которые вызываются характером профиля и плана линии, а именно: дополнительного сопротивления от уклона $\pm W_i$, дополнительного сопротивления от кривой W_r .

В случае неравномерного движения к этому прибавляется еще дополнительное сопротивление от ускорения или замедления $\pm W_{pz}$.

Выражение общего полного сопротивления движению имеет следующий вид:

$$W = W_0 \pm W_i + W_r \pm W_{pz} \quad (\kappa 2).$$

Так как каждое из слагаемых полных сопротивлений зависит от веса поезда, а некоторые из них — как то: основное сопротивление и дополнительное сопротивление от кривой, зависят также и от типа подвижного состава, то установление общей силы сопротивления движению производится обычно через определение вначале удельного значения каждого сопротивления, т. е. величины силы сопротивления, приходящейся на тонну веса (выраженной в $\kappa 2/m$).

Тогда величина общего полного сопротивления, через выражения удельных сопротивлений, определится из следующего уравнения:

$$W = wQ = (w_0 \pm w_i + w_r \pm w_{pz}) Q \quad (\kappa 2).$$

w_0 — основное удельное сопротивление движению на прямой и площадке,

$\pm w_i$ — дополнительное удельное сопротивление от уклона (знак $+$ относится к под'ему, — к скату),

w_r — дополнительное удельное сопротивление от кривой,

$\pm w_{pz}$ — дополнительное удельное сопротивление от ускорения со знаком $+$ и от замедления со знаком $-$,

Q — вес поезда.

Величина $w = w_0 \pm w_i + w_r \pm w_{pz}$ называется общим удельным сопротивлением движению.

Основное удельное сопротивление w_0 , т. е. сопротивление движению поезда или элемента его на прямом и горизонтальном участке пути зависит от состояния пути и типа подвижного состава и складывается из:

- 1) сопротивления пути, куда входят:
 - а) трения при катании колеса по рельсу (второго рода),
 - б) трения бандажей о рельсы (первого рода),
 - в) сопротивления, вызываемые деформацией пути,
 - г) сопротивления стыков и неровностей пути;
- 2) внутреннего сопротивления подвижного состава, куда входят:
 - а) трения скольжения в буксах,
 - б) трения в движущихся частях механизма локомотива, как-то: в якорных и осевых подшипниках электродвигателей, в зубчатой передаче и т. п.;
- 3) сопротивление воздуха.

Вследствие большого количества факторов, влияющих на величину основного удельного сопротивления и сложности их точного теоретического определения каждого в отдельности, установление величины основного удельного сопротивления, включающего все влияющие факторы, производится обычно для каждого типа подвижного состава на основании опытных поездок, в результате чего и устанавливается эмпирическая формула.

Формулы для определения величины основного удельного сопротивления обычно бывают следующего вида:

$$\begin{aligned} w_0 &= a + bv + cv^2 & (\text{кг}/\text{т}) \\ w_0 &= a + bv^2 & " \\ w_0 &= a + bv & " \end{aligned}$$

где a — постоянный коэффициент, учитывающий главным образом сопротивление пути.

Для электровозов величина a иногда выражается пропорциональной $1/2$ степени веса или числа осей.

b — коэффициент, учитывающий сопротивление подвижного состава, а при отсутствии коэффициента c и сопротивление воздуха,

c — коэффициент, учитывающий сопротивление воздуха,

v — скорость движения в км/час.

Следует отметить, что точного разграничения между факторами, учитываемыми тем или иным коэффициентом, сделать затруднительно.

А. Основное удельное сопротивление движению электровоза

Так как в тяговых расчетах обычно пользуются значениями касательных сил тяги электровоза, т. е. отнесенными к ободу сцепных колес с учтенными уже потерями силы тяги на преодоление внутренних сопротивлений электровоза как машины, то

в этом случае следует пользоваться формулой основного удельного сопротивления, которое учитывает лишь сопротивление электровоза, как повозки, т. е. как бы условно со снятыми движущимися частями механизма, создающими внутреннее сопротивление локомотива.

В этом случае расчета получается как бы не реальное положение, так как, с одной стороны, электровоз развивает силу тяги, а, с другой — определяется сопротивление движению его, как повозки, т. е. с отсутствующими движущимися частями механизма, создающими и развивающими силу тяги электровоза.

При движении же электровоза без применения силы тяги, т. е. без потребления тока, формула основного удельного сопротивления должна учитывать сопротивление электровоза и как повозки и как машины.

Опытных исследований по установлению формул основного удельного сопротивления электровозов, по сравнению с произведенными опытами в отношении вагонов и паровозов мало, а вследствие этого формулы основного удельного сопротивления электровозов не являются достаточно дифференцированными и точно установленными.

На основании опытов General Electric Co над многими электровозами с индивидуальной зубчатой передачей Armstrong вывел следующую формулу основного удельного сопротивления электровоза, как повозки

$$w_{o/n}^{эл} = \frac{24}{\sqrt{P_{сц}^{эл}}} + 0,01v + 0,0035 \frac{S \cdot v^2}{P_{сц}^{эл}} \quad (\text{кг/т}),$$

где $P_{сц}^{эл}$ — сцепной вес электровоза в т,

v — скорость движения в км/час,

S — площадь эквивалентной поверхности $\cong 10 \text{ м}^2$.

Davis для электровозов с жесткой базой не менее 2,45 т и весом свыше 45 т вывел следующую формулу основного удельного сопротивления электровоза, как повозки:

$$w_{o/n}^{эл} = 0,65 + \frac{13,15}{P_o} + 0,0093 v + \frac{0,0045 S \cdot v^2}{P_{эл}} \quad (\text{кг/т}).$$

P_o — давление на сцепную ось в т,

$P_{эл}$ — вес электровоза в т,

S — площадь поперечного сечения, равная $11,15 \text{ м}^2$ при $P_{эл} \geq 91 \text{ т}$.

На основании опытов южно-французских железных дорог над электровозами со сцепным весом 60 — 75 т установлена следующая формула основного удельного сопротивления

$$w_{o/n}^{эл} = 2,8 + 0,00082 v^2 \quad (\text{кг/т}).$$

При определении основного удельного сопротивления электровозов с индивидуальной зубчатой передачей, как повозки и как

машины, т. е. при движении без тока, может быть с некоторым приближением применена формула Ломоносова, выведенная на основании испытания электротепловоза с трамвайной зубчатой передачей.

$$\omega_{o(n+m)}^{\text{эм}} = 3 + 0,0015 v^2 \quad (\text{кг}/\text{м}).$$

В отношении выведенной Ломоносовым, на основании тех же испытаний, формулы основного удельного сопротивления электро-тепловоза как поковки

$$\omega_{o/n}^{\text{эм}} = 3 + 0,0008 v^2 \quad (\text{кг}/\text{м})$$

следует отметить, что таковая не является чистой формулой основного удельного сопротивления электротепловоза, а несколько приувеличивает значения ее, в силу того, что Ломоносов при установлении этой формулы не исключал сопротивления от трения якорных и осевых подшипников тяговых электродвигателей, а лишь только сопротивление от трения в щетках.

В результате испытаний электровоза ВЛ-19-01 на Сурамском перевале Закавказской жел. дор., проведенных Научно-исследовательским институтом НКПС по электрификации жел. дор. установлено, что основное удельное сопротивление электровоза, как поковки и как машины, т. е. при движении без тока, выражается следующей формулой

$$\omega_{o(n+m)}^{\text{эл}} = 2,375 + 0,05 v + 0,00125 v^2 \quad \text{кг}/\text{м}.$$

Основное удельное сопротивление электровоза при движении под током определяется формулой

$$\omega_o^{\text{эл}} = 1,425 + 0,025 v + 0,00125 v^2 \quad \text{кг}/\text{м}.$$

Следует отметить, что так как на испытаниях при установлении касательных сил тяги и при построении тяговых характеристик электровоза ВЛ-19-01 удельное сопротивление принималось по формуле

$$\omega_{o/n}^{\text{эл}} = 1,425 + 0,025 v + 0,00125 v^2 \quad \text{кг}/\text{м},$$

то это выражение при производстве тяговых расчетов электровоза ВЛ-19-01 можно принимать как формулу основного удельного сопротивления электровоза ВЛ, как поковки.

Б. Основное сопротивление движению мотор-вагонов

На основании испытаний, произведенных «Берлинским обществом по изучению электрических жел. дор. большой скорости» над моторными и прицепными вагонами при верхнем строении из обыкновенных рельсов установлены следующие формулы основного полного сопротивления:

для моторного вагона

$$W_0 = (1,8 + 0,00067 v^2) P + 0,0052 v^2 S \quad (\text{кг});$$

для прицепного вагона

$$W_0 = (1,3 + 0,00067 v^2) P + 0,0052 v^2 S \quad (\text{кг}),$$

где P — вес моторного или соответственно прицепного вагона в t ,
 S — площадь в m^2 , сопротивляющаяся воздуху моторного или соответственно прицепного вагона.

Dover на основании опытов Aspinall и O'Brien'a для поезда, состоящего из одного моторного и одного прицепного вагона, дает следующую формулу основного удельного сопротивления поездной единицы (при потреблении тока мотор-вагоном)

$$w_0 = 1,8 + 0,015 v + 0,0008 v^2 \quad (\text{кг}/m).$$

При нескольких вагонах в поезде Dover рекомендует следующую формулу основного удельного сопротивления (под током)

$$w_0 = 1,8 + 0,015 v + \frac{S}{P_m + \sum P_{pr}} (0,0053 \alpha + 0,000075 nL) v^2 \quad (\text{кг}/m),$$

где:

P_m — вес моторного вагона,
 $\sum P_{pr}$ — вес прицепных вагонов,
 n — число вагонов в поезде,
 L — длина одного вагона,
 α — коэффициент формы торцевой поверхности.

Значения коэффициента α следующие:

для плоской торцевой стенки	1,0
» закругленных по типу междугородных вагонов США	0,65
» параболической лобовой поверхности	0,3
» параболического клина	0,28

Без учета значения коэффициента α можно пользоваться следующей формулой для мотор-вагонных поездов:

$$w_0 = 1,83 + 0,0153 v + \frac{S}{Q} (0,004 + 0,000075 nL) v^2 \quad (\text{кг}/m),$$

Davis для мотор-вагонных поездов дает следующую формулу основного удельного сопротивления движению (под током)

$$w_0 = 0,65 + \frac{14,5}{P_0} + 0,0125 v + \frac{S}{Q} [0,0045 + 0,00064 (n - 1)] v^2 \quad (\text{кг}/m),$$

где

P_0 — давление на ось в t ,
 Q — вес всех вагонов в t ,
 n — число вагонов.

Для движения мотор-вагонного поезда без тока $P_{\text{тор}}$ дает следующую формулу основного удельного сопротивления, где моторный вагон, как повозка и как машина.

$$\omega_{0(n+m)} = 2,5 + \frac{[0,00015 + 0,00813 (n-1) + 0,0065 S] v^2}{P_m + \Sigma P_{np}} \text{ (кг/т)}.$$

В. Основное сопротивление движению вагонов и поезда в целом

Формулы основного удельного сопротивления движению вагонов для различных типов различны и кроме того для одного и того же вагона величина основного удельного сопротивления зависит не только от скорости, но и от веса вагона брутто. Чем больше вес вагона брутто, тем более плавный ход вагона, тем меньше основное удельное сопротивление движению.

С увеличением полезной нагрузки вагона, при той же скорости движения, уменьшается величина основного удельного сопротивления движению. В пассажирских вагонах, в силу того, что полезная нагрузка вагона по отношению к полному весу вагона незначительна и составляет максимум 10—12% формулы основного удельного сопротивления движению выражаются лишь в функции скорости.

Для двухосных и трехосных пассажирских вагонов основное удельное сопротивление движению определяется по формуле Nadal'я

$$\omega_{0}^{ПВ/2-3} = 1,6 + 0,3 v \cdot \frac{v + 90}{1000} = 1,6 + 0,027 v + 0,0003 v^2.$$

На основании испытаний на наших железных дорогах для четырехосных пассажирских вагонов на тележках Ломоносовым установлена следующая формула основного удельного сопротивления

$$\omega_{0}^{ВП/4} = 1,4 + 0,2 v \cdot \frac{v + 100}{1000} = 1,4 + 0,02 v + 0,0002 v^2 \text{ (кг/т)}.$$

Для товарных двухосных вагонов Ломоносовым установлена следующая формула, называемая иногда формулой бывш. Харьковско-Николаевской железной дороги

$$\omega_{0}^{BT/2} = 1,4 + \left(0,04 + \frac{0,32}{q} \right) v \text{ (кг/т)},$$

где q — вес вагона брутто в т.

Значения $\omega_{0}^{BT/2} = f(v, q)$ выражены графически на рис. 93.

При менее точных расчетах основное удельное сопротивление 2-осных вагонов может быть определено по формулам:

$$\begin{aligned} \text{для груженых вагонов } \omega_{0}^{BT/2} &= 1,4 + 0,05 v \text{ (кг/т)}, \\ \text{„ порожних } \omega_{0}^{BT/2} &= 1,4 + 0,8 v \text{ (кг/т)}. \end{aligned}$$

На основании опытов Иллинойского экспериментального института в Америке для товарных четырехосных вагонов на тележках Smith'ом установлена следующая формула

$$\omega_0^{BT/4} = \frac{v + 65}{12 + 0,55 q} \text{ кг/т},$$

где q — вес вагона брутто.

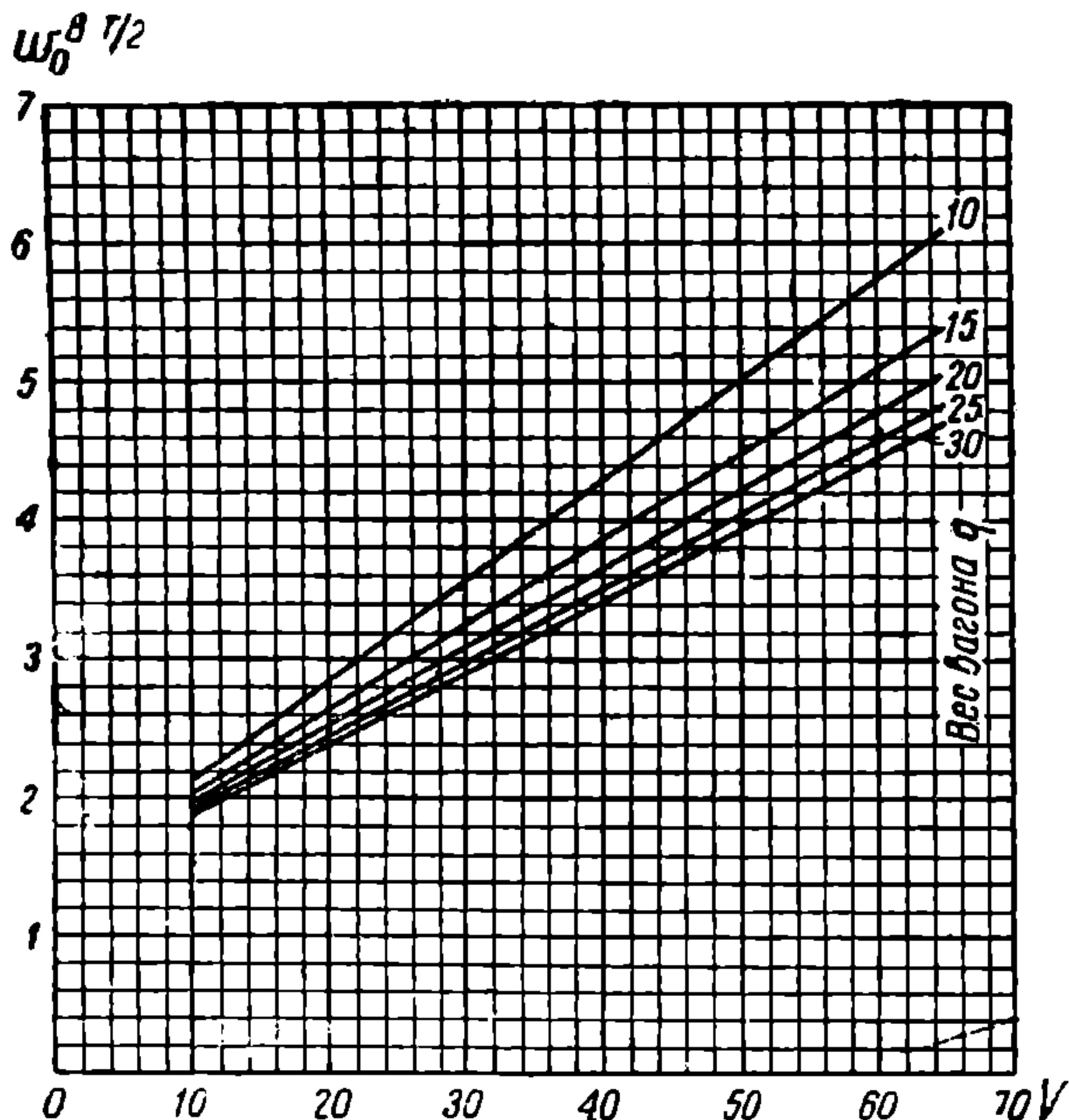


Рис. 93 Товарные двухосные вагоны $\omega_0^{BT/2} = f(V, q)$

Значения $\omega_0^{BT/4}$ по этой формуле выражены графически на рис. 94.

При менее точных расчетах, основное удельное сопротивление для четырехосных вагонов на тележках может быть определено по формулам:

$$\begin{aligned} \text{для груженых вагонов} \quad \omega_0^{BT/4} &= 1,5 + 0,02 v \text{ (кг/т)}, \\ \text{порожних} \quad \omega_0^{BT/4} &= 2,5 + 0,04 v \text{ (кг/т)}. \end{aligned}$$

В том случае, когда состав вагонов состоит из двухосных и четырехосных товарных вагонов, средневзвешенное основное удельное сопротивление для вагонов определится из выражения:

$$\omega_0^{Bcp} = \frac{\omega_0^{BT/2} P_{BT/2} + \omega_0^{BT/4} P_{BT/4}}{P_{BT/2} + P_{BT/4}};$$

где $P^{BT/2}$ и $P^{BT/4}$ — соответственно полные веса всех двухосных и всех четырехосных вагонов в составе. Если задан в составе процент двухосных вагонов $p^{T/2}$ и процент четырехосных вагонов $p^{T/4}$ и известны также вес каждого двухосного вагона $q^{BT/2}$ и четырехосного $q^{BT/4}$, то величина средневзвешенного основного удельного сопротивления для состава вагонов определится из выражения:

$$\omega_0^{Bcp} = \omega_0^{BT/2} \alpha + \omega_0^{BT/4} \beta \quad (\text{кг}/\text{т})$$

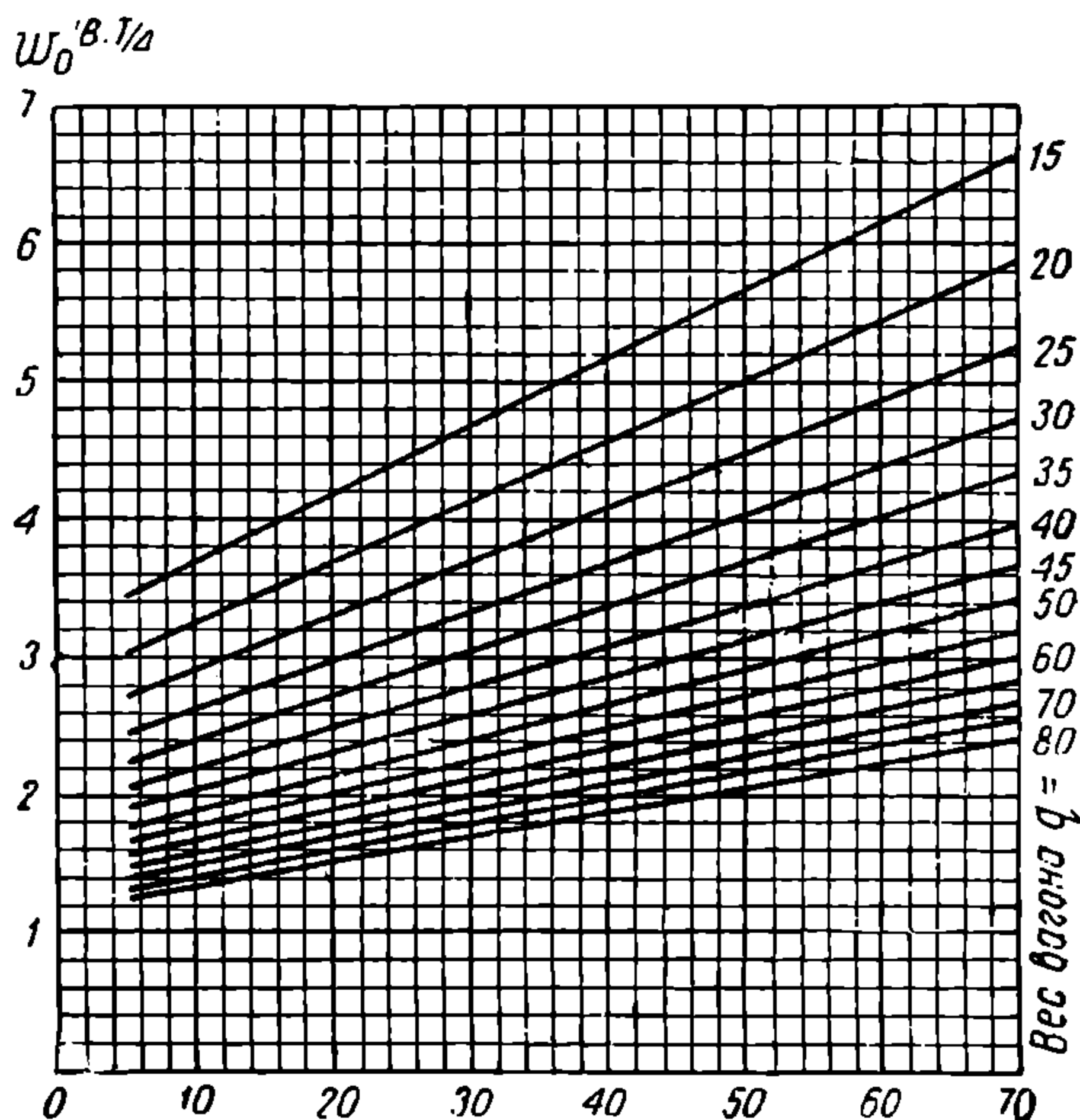


Рис. 94. Товарные четырехосные вагоны, $\omega_0^{BT/4} = f(V, q)$.

где

$$\alpha = \frac{p^{T/2} \cdot q^{BT/2}}{p^{T/2} \cdot q^{BT/2} + p^{T/4} \cdot q^{BT/4}};$$

$$\beta = \frac{p^{T/4} \cdot q^{BT/4}}{p^{T/2} \cdot q^{BT/2} + p^{T/4} \cdot q^{BT/4}}.$$

Следовательно

$$\alpha + \beta = 1.$$

Основное удельное сопротивление движению поезда в целом, состоящего из электровоза, двухосных и четырехосных вагонов, определится как средневзвешенное из следующего выражения:

$$\omega_0 = \frac{\omega_0^{эл} P^{эл} + \omega_0^{B/cp} P^B}{P^{эл} + P^B} \quad (\text{кг}/\text{т}).$$

где P^B — вес всех двухосных и четырехосных вагонов в т.

При движении электровоза без потребления тока на скатах, основное удельное сопротивление для поезда в целом:

$$\omega_{0/б.т} = \frac{\omega_0^{эл} (n+m) P^{эл} + \omega_0^{B/cp} P^B}{P^{эл} + P^B} \text{ (кг/т)}.$$

При расчетах, не требующих большой точности, и при отсутствии данных о роде вагонов и их веса для определения удельного сопротивления для поезда в целом может быть применена следующая формула:

$$\omega_0 = 1,5 + \frac{v}{20} = 1,5 + 0,05 \ v \text{ кг/т}.$$

Эта формула установлена в США заводом Baldwin'a для товарных поездов.

Все приведенные выше формулы выражают величину основного сопротивления движению поезда при движении его с определенной равномерной скоростью не менее 10 км/час.

При скоростях менее 10 км/час, основное удельное сопротивление принимается таким же, как для скорости 10 км/час. Кроме того, приведенные формулы выражают основное сопротивление движению для средних условий погоды, т. е. при отсутствии ветров или при небольших ветрах, со скоростью не более 10 м/сек, а также при температуре воздуха не ниже — 10°C. При более сильных ветрах, или при отсутствии ветра, но при низкой температуре ниже — 10°C основное удельное сопротивление движению увеличивается. Институтом тяги НКПС, на основании произведенных опытов и опытных данных дорог, приводится следующая приближенная формула добавочного удельного сопротивления от ветра:

$$\omega_0^d = 0,005 (v_s - 5)^2,$$

где v_s — скорость ветра в м/сек.

При морозах, т. е. температуре ниже — 10°C, основное удельное сопротивление движению увеличивается, вследствие увеличения вязкости смазки в буксах.

С понижением температуры добавочное сопротивление от влияния температуры увеличивается.

Следует отметить, что при больших скоростях движения, увеличение сопротивления вследствие низкой температуры меньше, чем при низких скоростях движения.

Для роликовых же подшипников это увеличение незначительно. Наибольшее влияние на увеличение сопротивления движению оказывает низкая температура при трогании поезда с места для вагонов с обычными подшипниками.

Если поезд трогается с остановочного пункта, после стоянки на последнем более получаса, то помимо увеличения сопротивления вследствие влияния низкой температуры на смазку в буксах,

при производстве точных расчетов движения поезда на первых трех километрах пути от остановочного пункта, к основному удельному сопротивлению движению добавляется еще $0,5 \text{ кг/т}$.

В момент трогания поезда с места, при преодолении больших сил трения в осевых шейках и подшипниках, а также трения колес о рельсы, сопротивление движению достигает значительной величины и, помимо температуры воздуха, зависит также от других факторов: числа вагонов в составе, состояния сцепных приборов — растянутое или сжатое, или частично то и другое. С увеличением длительности стоянки сопротивление движению в момент трогания поезда с места увеличивается, достигая наибольшей величины, примерно, через 20—30 минут после момента остановки.

Чем больше число вагонов в составе поезда, тем больше число их трогается не одновременно, а следовательно, удельное сопротивление движению в момент трогания будет меньше. Вследствие сложности учета всех факторов и изменчивости их, установить точно величину сопротивления движению в момент трогания поезда с места затруднительно. Инж. В. Ф. Егорченко дает следующую формулу определения добавочного сопротивления при трогании с места товарных поездов

$$w_{mp}^{\sigma} = 2 + 0,3 i \text{ (кг/т)}.$$

i^0_{00} — величина под'ема, на котором происходит трогание поезда с места.

Второй член формулы $0,3 i$ учитывает увеличение этого добавочного сопротивления на крутых под'емах вследствие растянутости сцепных приборов. Принимая основное удельное сопротивление движению при скоростях до 10 км/час , равным 2 кг/т , в момент трогания поезда с места удельное сопротивление движению, следовательно, будет определяться следующим выражением:

$$w_o^{mp} = 4 + 0,3 i \text{ (кг/т)}.$$

Г. Сопротивление движению поезда от уклона

При движении поезда по жел.-дорожному пути с уклоном кроме основного сопротивления движению появляется дополнительное сопротивление движению от уклона.

Дополнительное сопротивление движению поезда от уклона не зависит ни от типа подвижного состава, ни от скорости движения и может быть установлено теоретически.

Определим величину дополнительного сопротивления движению поезда от уклона.

Разлагая силу тяжести поезда Q в t (рис. 95) на геометрически составляющие Q_1 — перпендикулярную пути и Q_2 — параллельную, последняя и представляет собой силу дополнительного сопротивления движению поезда от уклона. Величина ее в кг равна

$$W = \pm 1000 Q \sin \alpha \text{ (кг)}.$$

Вследствие малых углов наклона железнодорожного пути, $\sin \alpha$ может быть заменен через $\operatorname{tg} \alpha$,

тогда

$$W_i = \pm 1000 Q \operatorname{tg} \alpha \text{ (кг)}.$$

Величина уклона i выражается обычно в ‰, т. е. величиной подъема или спуска в метрах на протяжении одного километра,

$$\text{т. е.} \quad \operatorname{tg} \alpha = \frac{i}{1000}.$$

Следовательно,

$$W_i = \pm 1000 Q \operatorname{tg} \alpha = \pm \frac{1000 \cdot Q \cdot i}{1000} = \pm Q \cdot i \text{ (кг)}.$$

Удельное же дополнительное сопротивление движению поезда от уклона равно

$$W_i = \pm \frac{W_i}{Q} = \pm i \text{ (кг/т)}.$$

Следовательно, дополнительное удельное сопротивление от уклона равно числу тысячных уклона (‰), при этом при движении в подъем — со знаком плюс и при движении по скату — со знаком минус.

Д. Сопротивление движению поезда от закругления пути (кривых)

При движении поезда в кривой, помимо основного удельного сопротивления, появляется еще дополнительное сопротивление движению поезда от кривой.

Это дополнительное сопротивление появляется вследствие увеличения трения гребней бандажей о рельсы, увеличения продольного скольжения бандажей, трения бортов подшипников о шейки колес и зависит от радиуса кривой и от жесткой базы вагона или локомотива.

Дополнительное сопротивление не зависит от скорости, поскольку является добавлением к основному сопротивлению, а зависит от типа подвижного состава и радиуса кривой, и определяется обычно для поезда в целом, по эмпирическим формулам, установленным испытаниями.

Для поезда, состоящего из двухосных вагонов, дополнительное удельное сопротивление определяется по формуле

$$w_r = \frac{750}{R}$$

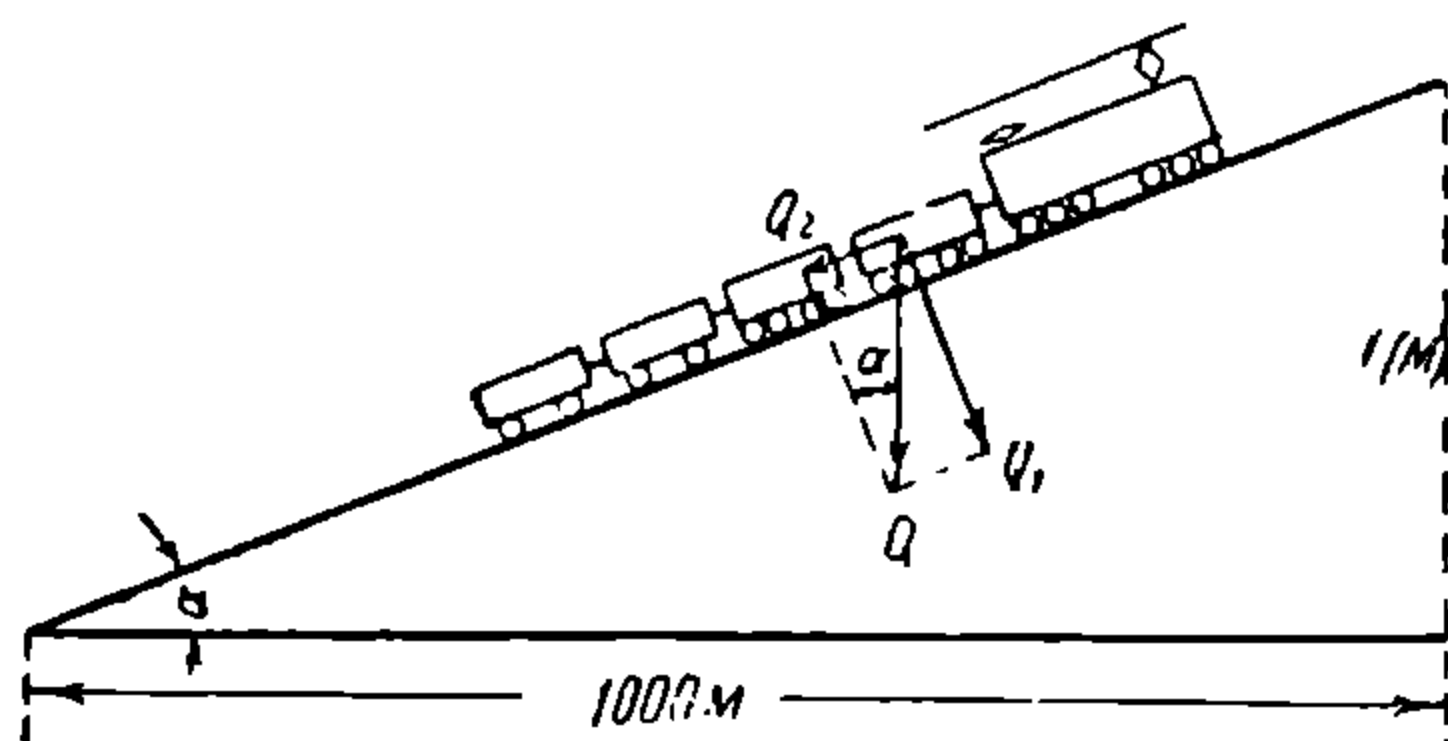


Рис. 95.

R — радиус кривой в м.

Для поезда, состоящего из четырехосных вагонов с автосцепкой, применяется формула

$$\omega_r = \frac{630}{R} \text{ (кг/м)}.$$

В том случае, когда поезд состоит из 50% двухосных и 50% четырехосных вагонов, у нас принята следующая формула:

$$\omega_r = \frac{700}{R}.$$

Величину дополнительного удельного сопротивления при проектировании профиля жел. дор., а также и при производстве тяговых расчетов бывает необходимо определить не через радиус кривой, а через центральный угол кривой, т. е. угол поворота линии.

При величине центрального угла α° и радиуса кривой R м длина кривой равна

$$l_{кр} = \frac{2\pi R \cdot \alpha}{360} = \frac{\pi R \cdot \alpha}{180} \text{ (м)}.$$

Дополнительная удельная работа, вызываемая сопротивлением кривой, очевидно зависит от типа подвижного состава.

Для поезда, состоящего из двухосных вагонов, эта работа равна

$$A = \omega_r l_{кр} = \frac{750 \cdot \pi R \cdot \alpha}{R 180} \cong 13 \alpha \text{ (кг·м)};$$

дополнительное удельное сопротивление, выраженное через центральный угол кривой, равно

$$\omega_r = \frac{13 \alpha}{l_{кр}} \text{ (кг/м)}.$$

Для поезда, состоящего из четырехосных вагонов с автосцепкой:

$$\omega_r = \frac{11 \alpha}{l_{кр}} \text{ (кг/м)};$$

для поезда, состоящего на половину из двухосных и на половину из четырехосных вагонов величина дополнительного удельного сопротивления через центральный угол кривой определяется по формуле

$$\omega_r = \frac{12 \alpha}{l_{кр}} \text{ (кг/м)}.$$

Эти формулы позволяют определить среднее сопротивление от кривой, при распространении работы от кривой на длину элемента $l > l_{кр}$.

Тогда среднее дополнительное удельное сопротивление от кривой на длине элемента l будет определяться из выражения

$$\omega_r = \frac{12\alpha}{l} \text{ (кг/т)}.$$

Е. Сопротивление движению поезда от ускорения или замедления

При движении поезда с неравномерной скоростью, помимо рассмотренных ранее сопротивлений движению, появляется дополнительное сопротивление движению в силу влияния сил инерции на создание ускорения или замедления. Величина этого дополнительного сопротивления движению, также как и дополнительное сопротивление от уклона может быть установлена достаточно точно теоретически. При движении поезда некоторые элементы подвижного состава, как то: кузова вагонов, электровоза, имеют, только поступательное движение; другие же, как: колеса вагонов электровоза, зубчатые колеса и якоря электродвигателей, помимо поступательного движения, имеют еще и вращательное увеличивающее сопротивление в создании ускорения.

Поэтому приведенная масса поезда $M_{пр}$ будет равна:

$$M_{пр} = (1 + \gamma) M,$$

где M — вся масса поезда, имеющая поступательное движение и равная

$$M = \frac{Q}{g},$$

где Q — вес поезда, а g — ускорение силы тяжести, равное $9,81 \text{ м/сек}^2$. Коэффициент γ учитывает увеличение массы, вследствие наличия в поезде элементов, имеющих помимо поступательного движения, еще и вращательное.

Для разного типа подвижного состава величина коэффициента γ различна.

Величина коэффициента γ для разных типов подвижного состава, могущая быть принятой с достаточной для расчетов точностью, приведена ниже в таблице 20.

Таблица 20

Т и п п о д в и ж н о г о с о с т а в а	Величина коэф. γ
Мотор-вагонные поезда	0,08 — 0,15
Электровозы	0,20 — 0,40
П ро ж н ы е т о в а р н ы е п о е з д а	0,11 — 0,12
Г р у ж е н ы е » »	0,04
Товарные поезда смешанного состава	0,06
Пассажирские поезда	0,05

Дополнительное сопротивление движению при ускорении a , выраженном в $м/сек^2$, равно:

$$W_p = 1000 (1 + \gamma) M \cdot a = 1000 \frac{Q}{g} (1 + \gamma) a \text{ (кг)},$$

удельное же сопротивление

$$w_p = \frac{W_p}{Q} = \frac{1000 (1 + \gamma)}{g} \cdot a \cong 102 (1 + \gamma) a \text{ (кг/т)}.$$

§ 26. Силы тяги электровоза и мотор-вагона

Развиваемые электродвигателями касательные силы тяги на ободу сцепных колес, для обеспечения поступательного движения поезда не должны превосходить сил сцепления колес с рельсами, называемых в целом сцепной силой тяги электровоза.

Следовательно, сцепная сила тяги электровоза или мотор-вагона является ограничением тех наибольших величин касательных сил тяги, которые могут быть допущены при использовании режима длительной, часовой или максимальной мощности электродвигателей.

Обозначив через ΣZ_k сумму касательных сил тяги на ободу сцепных колес, получаемых при использовании какого-либо режима мощности электродвигателей, а через $P_{сц}^{эл}$ — сцепной вес электровоза, т. е. вес, приходящийся на ведущие оси, и через ϕ — коэффициент сцепления колес с рельсами, — получаем выражение:

$$\Sigma Z_k \leq 1000 \phi P_{сц}^{эл} \text{ (кг)}.$$

Величина коэффициента сцепления между колесами и рельсами зависит от системы механической передачи электровоза, скорости движения, состояния поверхности рельсов, от рода материалов и профиля рельсов и бандажей, от величины давления на ось, от состояния верхнего строения пути и пр.

От системы механической передачи усилий на ведущие колеса локомотива зависит равномерность усилий на ободу за полный оборот колеса.

Для большей наглядности выявления влияния системы передачи на равномерность усилий на ободу за полный оборот колеса на рис. 96 приведена диаграмма изменения силы тяги паровоза 0—4—0 Ы' за полный оборот колеса, полученная Ломоносовым при испытании на Армавир-Туапсинской жел. дор.

Следует отметить, что на величину отклонения силы тяги в ту и другую сторону за полный оборот колеса в данном случае, помимо системы шатунной передачи, повлияло расположение цилиндров и степень уравновешенности паровоза.

Ломоносов для различных типов паровозов приводит следующие значения коэффициента:

$$\mu = \frac{Z_k^{max}}{Z_k^{cp}}$$

Т и п п а р о в о з а	Величина μ
Двухцилиндровый компаунд	1,3
Двухцилиндровый некомпанунд или 4-цилиндровый (компанунд или не- компанунд безразлично)	1,2
Трехцилиндровый	1,1

Коэффициент сцепления ψ зависит от коэффициента трения f между колесами и рельсами и от коэффициента μ .

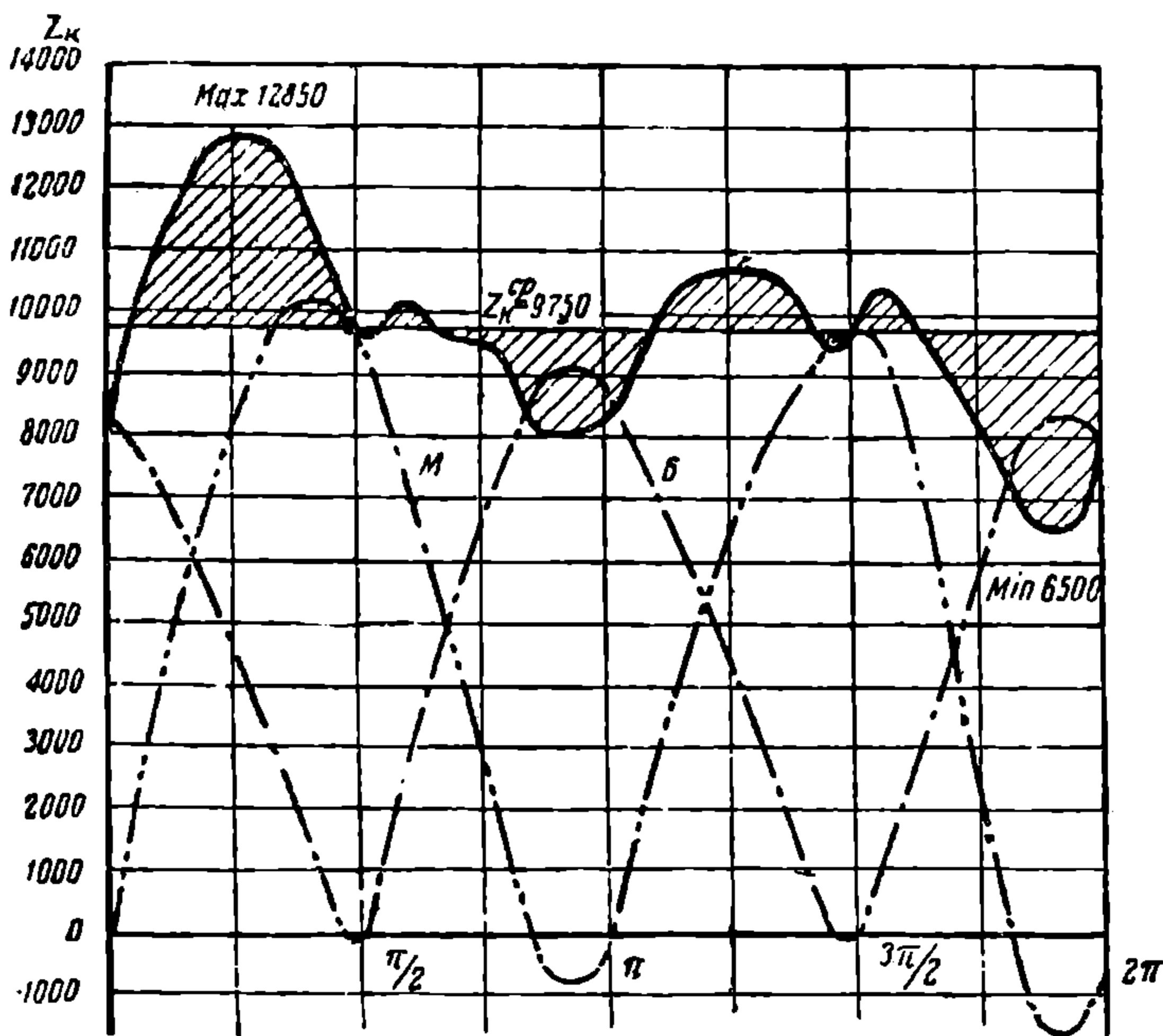


Рис. 96. Изменение силы тяги паровоза за оборот колеса.

Так как $\mu > 1$, а $\psi = \frac{f}{\mu}$, то в паровозах коэффициент сцепления ψ меньше коэффициента трения.

В электровозах с индивидуальной зубчатой передачей усилий от тяговых электродвигателей к ведущим скатам благодаря зубчатой передаче получается равномерность вращающего момента на ободе за оборот колеса, следовательно

$$\mu = 1 \text{ и } \psi = f,$$

т. е. коэффициент сцепления равен коэффициенту трения.

Следовательно коэффициент сцепления электровозов с индивидуальной зубчатой передачей больше, чем паровозов.

В отношении установления влияния поверхности рельса и скорости движения на величину коэффициента сцепления представляют интерес испытания, произведенные в Германии Müller'ом и Wichert'ом над электровозами с индивидуальной зубчатой передачей, с давлением на ось от 17,9 до 19,6 т.

На рис. 97, приведена диаграмма, на которой, по данным Müller'a и Wichert'a, коэффициент сцепления выражен в функции скорости

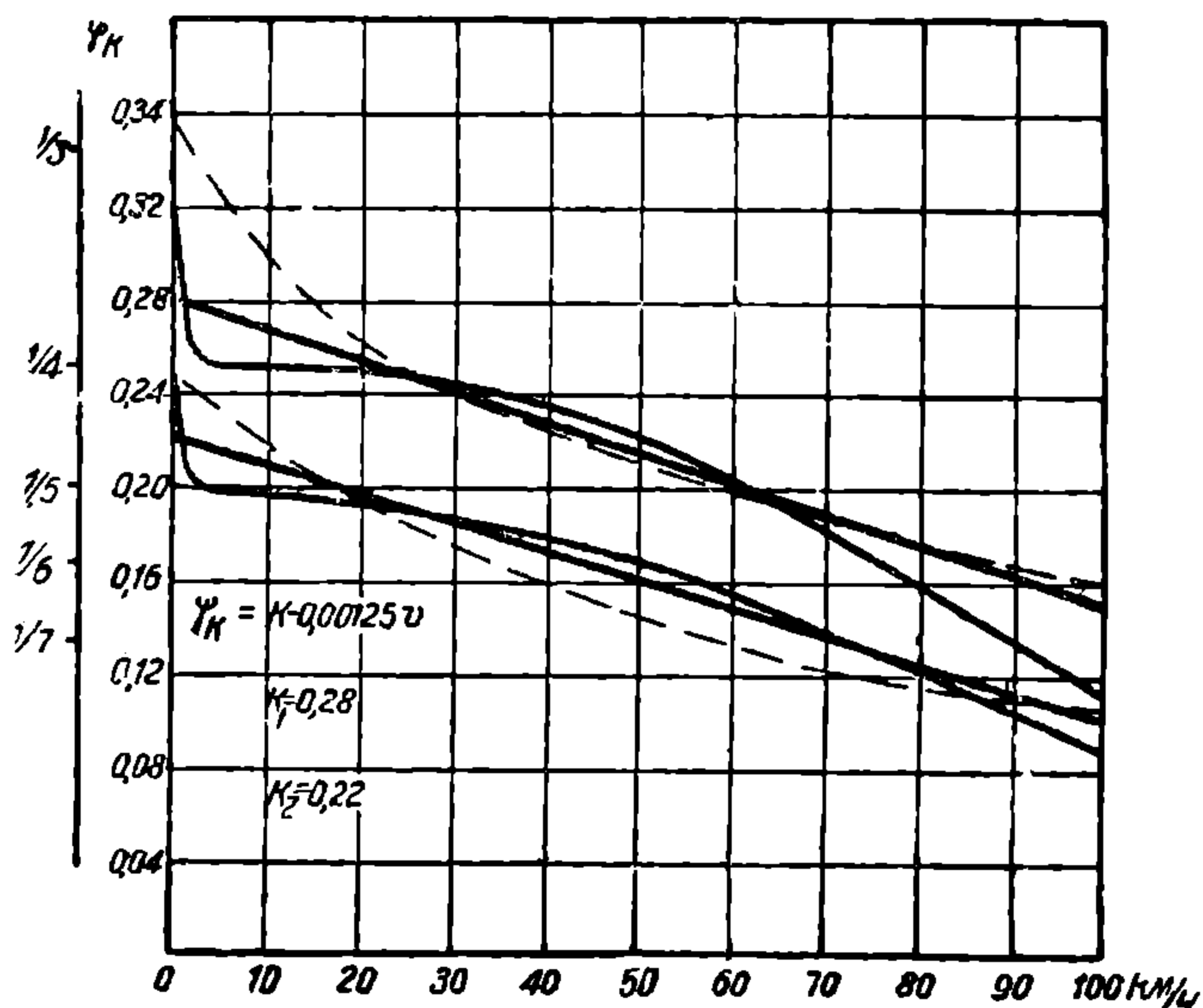


Рис. 97. Изменение коэффициента сцепления, $\psi_k = f(V)$.

для случая сухих и мокрых рельсов при тумане и дожде. Кривые, проведенные тонкими сплошными линиями, изображающие изменение коэффициента сцепления, предложены Wichert'ом, кривые же, проведенные пунктирными линиями — предложены Müller'ом.

Из приведенной диаграммы видно, что коэффициент сцепления при сухих рельсах больше, чем для мокрых при тумане и дожде и что в обоих случаях, с увеличением скорости, коэффициент сцепления уменьшается.

Кривые изменения коэффициента сцепления, предложенные Müller'ом и Wichert'ом, между собой не совпадают и имеют наибольшее расхождение при скоростях в пределах от 0 до 20—30 км/час.

Принимая изменение коэффициента сцепления от скорости по прямой, являющейся геометрическим местом точек средних значений коэффициентов сцепления по данным Müller'a и Wichert'a,

величина коэффициента сцепления может быть выражена следующим уравнением:

$$\psi = k - 0,00125 v,$$

где v — скорость в км/час.

k — коэффициент, зависящий от состояния поверхности рельсов.

Для сухих чистых рельсов $k = 0,28$, для мокрых рельсов и при тумане $k = 0,70 \cdot 0,28 = 0,20$; по данным Müller'a при грязных, скользких рельсах величина коэффициента сцепления уменьшалась до 40% от значения его при сухих рельсах, т. е. при грязных, скользких рельсах

$$k = 0,40 \cdot 0,28 = 0,11.$$

Следует отметить, что план линии жел. дор., в особенности кривые малых радиусов, вследствие того, что при движении в них электровоза происходит некоторое скольжение колес, влияют на коэффициент сцепления в сторону его уменьшения.

Сравнивая коэффициент сцепления электровозов и паровозов, необходимо сопоставлять их при равных скоростях движения, а не брать их лишь из условия движения по руководящему под'ему.

При равных условиях движения (состояния поверхности рельса, профиля и плана линии, скорости движения) коэффициент сцепления у электровоза больше, чем паровоза, следовательно при том же сцепном весе электровоз может реализовать большую силу тяги по сцеплению, чем паровоз.

При мотор-вагонной тяге наиболее важное значение имеет величина коэффициента сцепления в момент трогания с места, так как в этом случае требуется наибольшая касательная сила тяги мотор-вагона.

В момент трогания с места, как указано ранее в § 18, в силу применения пусковых сопротивлений сила тока не остается постоянной, а поэтому и сила тяги электродвигателя изменяется. Следовательно вращающий момент на обода ведущих колес мотор-вагона не остается в момент пуска и до выхода на автоматическую характеристику электродвигателей постоянным. Поэтому величина коэффициента сцепления в момент трогания с места будет несколько меньше коэффициента трения.

При нормальных условиях для моторных вагонов Carter рекомендует принимать величину коэффициента сцепления от $\psi = 0,160$ до $\psi = 0,180$, т. е. от $\frac{1}{6,2}$ до $\frac{1}{5,5}$. В том случае, когда необходимо реализовать большую силу тяги сцепления, таковая может быть получена увеличением коэффициента сцепления путем посыпания рельсов песком. При применении песка величина коэффициента сцепления как в электровозах, так и мотор-вагонах может быть повышена от $\frac{1}{4}$ до $\frac{1}{3}$.

Песок следует применять в исключительных условиях (при трогании поезда с места на руководящем под'еме).

§ 27. Тормозные силы и рекуперация энергии

Тормозные силы являются силами искусственного сопротивления движению в отличие от сил естественных сопротивлений движению, рассмотренных ранее в § 25.

Тормозные силы развивают в целях поглощения живой силы поезда при движении его по скатам, или для остановки поезда при подходе к станции или раз'езду. Тормозные силы при электрической тяге могут быть получены или путем применения механического торможения, т. е. прижатием тормозных колодок к ободам колес вагонов и локомотива, или путем применения так называемого электрического торможения, свойственного лишь электрической тяге.

При механическом торможении величина тормозной силы как при ручных, так и автоматических тормозах, как известно, определяется из следующего выражения:

$$B_k = 1\,000 f_k (\Sigma \delta^B P_m^B + \Sigma \delta^{эл} P_m^{эл}) \text{ (кг)},$$

где

B_k — тормозная сила в кг,

f_k — коэффициент трения тормозных колодок о бандажи колес,

δ^B и $\delta^{эл}$ — коэффициенты нажатия тормозных колодок соответственно вагонов и электровоза,

P_m^B и $P_m^{эл}$ — тормозные веса вагонов и электровоза в т.

Величина коэффициента трения тормозных колодок f_k зависит от состояния трущихся поверхностей колодок и бандажей и от скорости движения.

В силу сложности учета всех факторов, влияющих на величину f_k , таковая в тяговых расчетах принимается лишь в функции скорости.

Для средних условий при величине руководящих под'емов $i_p < 15\text{‰}$, величина f_k может быть определена по формуле:

$$f_k = 0,24 - 0,0018 v,$$

где v — скорость в км/час в пределе до 80 км/час.

При скоростях $v > 80$

$$f_k = 0,24 - 0,0024 v + 0,000008 v^2.$$

При $i_p \geq 15\text{‰}$ может быть принята следующая формула Ломоносова при скоростях до 80 км/час

$$f_k = 0,20 - 0,0015 v.$$

При менее благоприятных условиях или скорости $v > 80$ коэффициент трения может определяться из следующего выражения, предлож. бывш. НТК НКПС.

$$f_k = 0,20 - 0,002 v + 0,0000065 v^2.$$

Так как скорость за период торможения изменяется, то и величина коэффициента трения также изменяется. В тяговых расчетах при проектировании жел. дор. в целях обеспечения устойчивого режима торможения принимается значение скорости соответствующее началу торможения, т. е. большая скорость, а следовательно, величина коэффициента трения получается меньше.

Величина коэффициента нажатия колодок δ , представляющая собой отношение силы нажатия колодки к давлению колеса на рельс, зависит от рода тормозов и типа подвижного состава.

Если обозначим через D —силу нажатия колодок, а через P_m —давления колеса на рельс, то во избежание заклинивания колеса должно быть.

$$D \leq \frac{f}{f_k} P_m, \text{ но } \frac{D}{P_m} = \delta, \text{ следовательно } \delta \leq \frac{f}{f_k},$$

где f —коэффициент трения колеса о рельсы (стали по стали). Следует отметить, что в силу тех же условий принимается давление P_m от тары вагона, а не от полного веса вагона брутто.

Следовательно, P_m^g —вес тары тормозных вагонов, а $P_m^{э.т}$ —тормозной вес электровоза, т. е. вес, приходящийся на сцепные оси, оборудованные тормозными колодками. В некоторых случаях в пассажирских локомотивах тормозные колодки могут быть и на бегунковых осях, тогда $P_m^{э.т}$ есть полный вес электровоза в рабочем состоянии.

Так как воздушный тормоз вагонов может быть устроен так, что для груженого режима вагонов будет создавать более высокий коэффициент нажатия колодок, то принимают во всех случаях расчета вес P_m^B как вес тары вагонов, а коэффициент же нажатия колодок принимается, учитывая порожний или груженный состав вагонов, при чем последний принимается при нагрузке вагона не менее 25% от полной его под'емной силы. При проектировании новых железных дорог магистрального значения рекомендуется при автотормозах принимать следующие значения коэффициента нажатия колодок вагонов:

для двухосных товарных вагонов с под'емной силой 18 т	$\delta = 0,85$
для прочих двухосных и четырехосных вагонов порожних	$\delta = 0,7$
для прочих двухосных и четырехосных вагонов груженных	$\delta = 1,3$
для пассажирских вагонов	$\delta = 0,7$

В тяговых расчетах на существующих жел. дор., при исчислении тормозной силы, при автотормозах принимается порожний вес P_m^B не всех тормозных вагонов в составе, а лишь 80%, что дает запас на случай возможной неисправности некоторых из тормозных вагонов.

Коэффициент нажатия колодок электровоза $\delta^{э.т}$ во избежание сильного износа бандажей и образования выбоин, которые небла-

гоприятно влияют на работу электродвигателей, следует принимать не более 0,4 — 0,5.

При производстве тяговых расчетов величину тормозной силы от действия колодок часто определяют из выражения

$$B_k = 1000 f_k \vartheta_k Q \text{ (кг)},$$

где Q — полный вес поезда в t .

ϑ_k — тормозный коэффициент поезда, равный сумме тормозных коэффициентов частей его, представляющих отношения сил нажатия колодок данной части состава поезда к полному весу поезда:

$$\vartheta_k = \vartheta_k^{эл} + \vartheta_k^B = \frac{\sum \delta^{эл} P_m^{эл}}{Q} + \frac{\sum \delta^B P_m^B}{Q} = \frac{\sum \delta^{эл} P_m^{эл} + \sum \delta^B P_m^B}{Q}.$$

Величина удельной тормозной силы от действия тормозных колодок равна:

$$b_k = \frac{B_k}{Q} = 1000 f_k \vartheta_k \text{ (кг/т)}.$$

Электрическое торможение заключается в том, что развиваемая поездом живая сила поглощается не механическими тормозными средствами — колодками, а работой тяговых электродвигателей, как генераторов, и таким образом получается превращение механической энергии в электрическую.

Величина тормозного усилия, получаемого при этом регенеративном торможении, во избежание скольжения колес, не должна превосходить силы сцепления между сцепными колесами и рельсами. Электрическая энергия, получаемая при регенеративном торможении, может быть или поглощена в реостатах или возвращена в контактную сеть.

В зависимости от способа использования получаемой электрической энергии электрическое торможение разделяется на два основных вида:

а) реостатное торможение, когда выработанная электровозом или мотор-вагоном энергия поглощается в реостатах;

б) регенеративное торможение, когда выработанная энергия отдается в сеть, т. е. получается рекуперация энергии. Последний способ называется часто рекуперативным торможением.

Кроме этих видов торможения при мотор-вагонной тяге могут быть применены еще следующие варианты: регенеративное реостатное торможение мотор вагона с торможением прицепных вагонов с помощью соленоидного тормоза или с торможением последних помощью электромагнитного рельсового башмака.

Наибольшее применение имеют реостатное и рекуперативное торможение.

Применение реостатного или рекуперативного торможения, не исключая наличия механических тормозных средств в поезде, повы-

шает безопасность движения, уменьшает износ тормозных колодок, бандажей (что уменьшает расходы по содержанию и ремонту подвижного состава, а также в силу устранения динамических воздействий на путь, неизбежных при тормозных колодках, уменьшает расходы по содержанию и ремонту пути). На магистральных железных дорогах с электровозной тягой при соответствующем характере профиля дороги наибольшее распространение имеет рекуперативное торможение.

Помимо указанных выше сбережений в отношении подвижного состава и пути в данном случае получается еще экономия от возвращаемой энергии в сеть, но при этом вызывается необходимость в устройстве дополнительного оборудования для рекуперации на электровозе (о чем указано ранее в § 23) и в установке определенных агрегатов мотор-генераторов на тяговых подстанциях вместо ртутных выпрямителей, которые почти исключительно применяются при отсутствии рекуперации энергии. С другой стороны рекуперация может понизить мощность тяговых подстанций и сечение проводов контактной сети, а также уменьшить потребную для дороги мощность от центральной электрической станции.

Экономия энергии при рекуперативном торможении по отношению к энергии, затрачиваемой при движении поезда на под'ем, может быть определена из следующего выражения;

$$\eta = \frac{A_p}{A_{ном}} = \frac{i - w_o}{i + w_o} \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot \eta_4,$$

где A_p — рекуперлируемая энергия, отдаваемая в сеть на скате $i\%$,

$A_{ном}$ — энергия, потребляемая электровозом при движении на под'ем $i\%$,

w_o — основное удельное сопротивление движению поезда,

η_1 — коэффициент полезного действия зубчатой передачи, равный 0,94.

η_2 — коэффициент полезного действия электродвигателя — 0,96,

η_3 — коэффициент, учитывающий полные потери в передаче и в электродвигателе при режиме работы его, как генератора, и равный 0,80,

η_4 — коэффициент полезного действия контактного провода от электровоза до подстанции, равный 0,90.

Следовательно,

$$\eta = 0,65 \frac{i - w_o}{i + w_o}.$$

Принимая величину основного удельного сопротивления движению поезда по формуле Балдвина и скорость $v = 50$ км/ч, получаем приближенно следующие величины коэффициентов полезного действия рекуперативного торможения при различных уклонах, приведенных в таблице 21.

Таблица 21

Величина i ‰	10	15	20	25	30	35	40
Величина η в %	28	38	43	46	49	51	53

Из приведенных в таблице данных видно, что чем больше величина ската, тем больший процент возврата энергии, тем большая экономия энергии при рекуперативном торможении.

Отсюда вытекают необходимые условия в отношении характера профиля, при котором возможно и целесообразно применение рекуперативного торможения. На дорогах горных, с большим руководящим подъемом при затяжных непрерывных подъемах и спусках, рекуперативное торможение дает значительное сбережение энергии.

Приведенные в таблице данные процента экономии энергии при рекуперативном торможении являются теоретическими, практически же, в силу возможных отклонений от желательной при рекуперации организации движения поездов, используемый процент экономии энергии может составлять примерно 50% от теоретических. Поэтому рекуперативное торможение на уклонах 10‰ практически дает незначительный процент рекуперируемой энергии и является лишь исключительно, как средство торможения.

Наименьшая величина ската, на котором возможно применение рекуперативного торможения, может быть определена из следующего выражения:

$$i \geq w_0 + w_r + 2 \quad (\text{‰})$$

где w_0 — основное удельное сопротивление движению,

w_r — дополнительное удельное сопротивление от кривой.

Так как при производстве тяговых расчетов преимущественно пользуются не действительными значениями уклонов, а фиктивными с учетом сопротивления от кривой, то в этом случае наименьшая величина фиктивного ската, на котором возможно применение рекуперативного торможения определяется выражением.

$$i_{\phi} \geq w_0 + 2 \quad (\text{‰}).$$

Основным требованием, которому должно удовлетворять всякое электрическое торможение, является: устойчивость режима торможения, автоматическое увеличение тормозного усилия с увеличением скорости движения; возможность рекуперативного торможения при разных схемах включения электродвигателей; высокий коэффициент полезного действия; плавный переход с одной схемы включения электродвигателей к другой.

В целях обеспечения всех этих условий и создания устойчивого режима торможения, при рекуперативном торможении питание

обмоток возбуждения тяговых электродвигателей производится от специального мотор генератора, установленного на электровозе.

Так как при этом получается шунтовая характеристика электродвигателей, при которой незначительное изменение напряжения в сети вызывает очень большие изменения величины рекуперативного тока, то в целях уничтожения этих резких изменений применяются схемы дополнительных включений, из которых наиболее часто встречающиеся следующие:

1) возбуждение возбуждательной машины (мотор-генератора) при помощи двух обмоток с противодействующими друг другу магнитными полями, из которых одна питается током от якоря тягового электродвигателя, а другая — от источника тока с постоянным или регулируемым напряжением;

2) включение в цепь электродвигателей, стабилизирующих сопротивление.

На электровозах Сурамского перевала, построенных в Италии фирмой *Теспомасио Italiano*, для целей рекуперативного торможения, взамен стабилизирующих сопротивлений установлен специальный мотор-стабилизатор.

В электровозах, находящихся в эксплуатации на Сурамском перевале, построенных в Америке фирмой *General Electric Co*, в целях обеспечения устойчивого режима рекуперативного торможения при колебании напряжений в контактной се-

ти, а также для уравнивания распределения нагрузок между отдельными группами электродвигателей, применены стабилизирующие сопротивления, включенные в цепь якорей электродвигателей.

Изменение тормозного эффекта производится при помощи изменения величины тока возбуждения обмоток тяговых электродвигателей, путем регулирования напряжения на зажимах возбуждателя.

На рис. 98 приводятся принципиальные схемы электрических соединений силовой цепи при всех схемах включения якорей

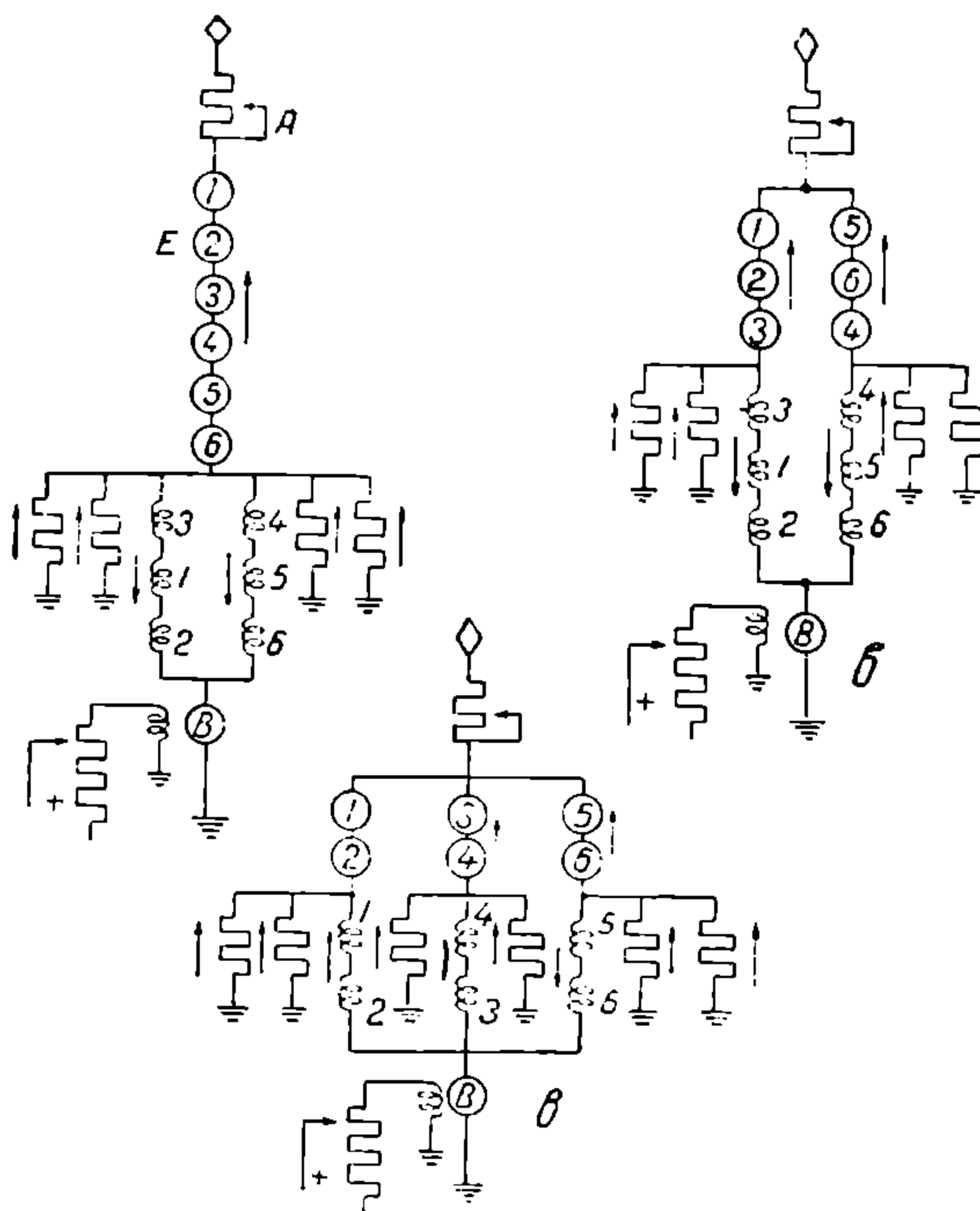


Рис. 98. Принципиальные схемы электрических соединений электродвигателей и стабилизирующих сопротивлений.

электродвигателей и стабилизирующих сопротивлений, применяемые на электровозе С-10.

Для каждого типа электровоза, имеющего рекуперативное оборудование, обычно, на основании испытаний, устанавливаются характеристики рекуперативного торможения, являющиеся дополнением к тяговым характеристикам. Эти характеристики дают на диаграмме в виде кривых значения тормозных усилий электровоза B_p при рекуперативном режиме в функции скорости при различных схемах соединения электродвигателей.

На основании этих кривых могут быть определены на каждом уклоне по тормозным усилиям допустимые скорости движения поезда.

Вид этих кривых приведен на рис. 99.

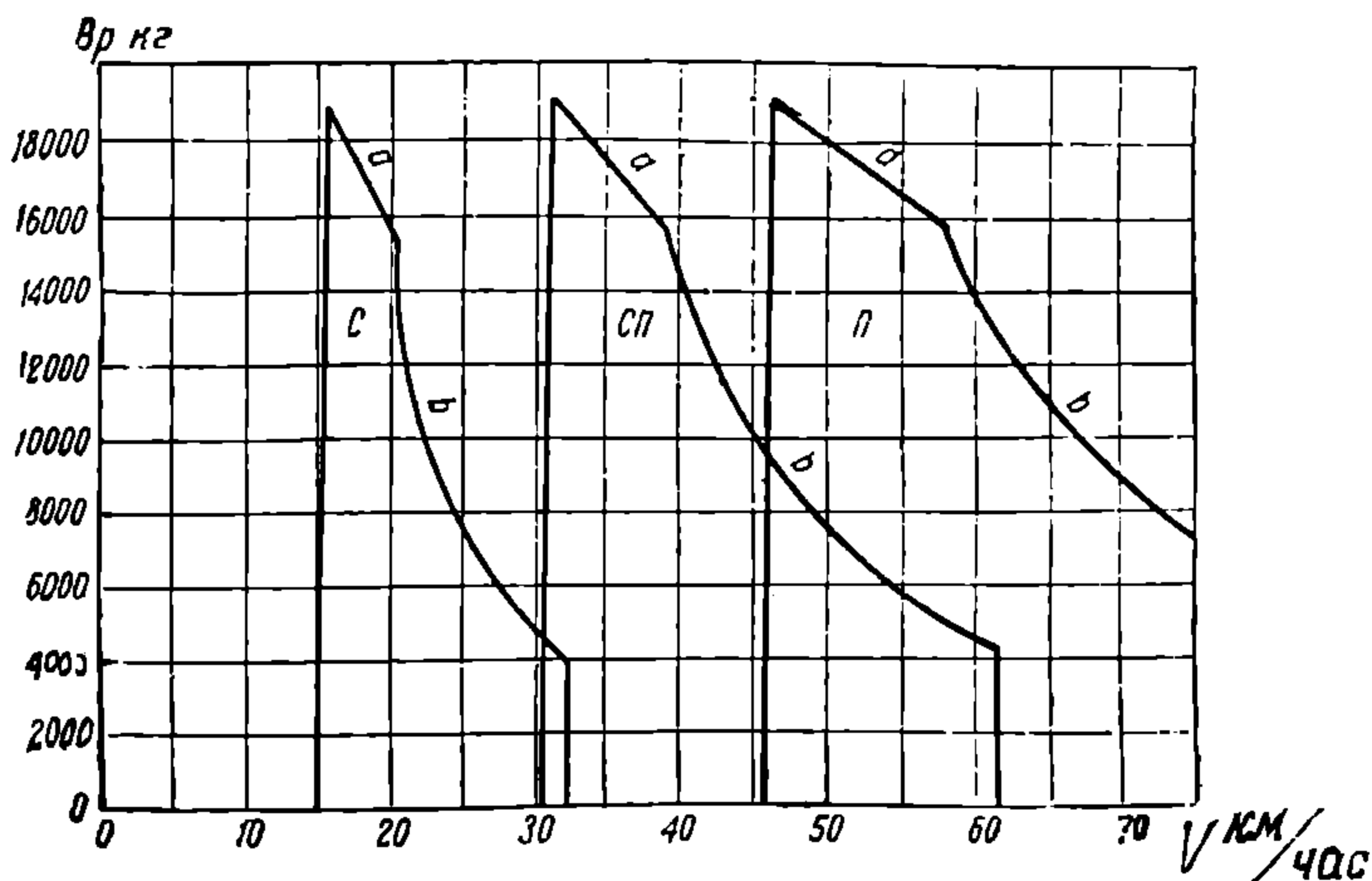


Рис. 99. Тормозные характеристики электровоза при рекуперации для разных схем соединений электродвигателей.

При отсутствии характеристик рекуперативного торможения для данного типа электровоза, при тяговых расчетах (не требующих большой точности) они могут быть построены на основании следующих приближенных формул, приводимых инж. Лучай

$$B_p = 0,44 \frac{E \cdot J_a}{v_m \left(0,80 + 0,20 \frac{J_a}{J_b} \right)} n \text{ (кг)},$$

$$v_p = 1,10 \frac{S_m}{S_p} \left(0,80 + 0,20 \frac{J_a}{J_b} \right) \text{ (км/час)},$$

где B_p — тормозящее усилие электровоза в кг;

E — нормальное рабочее напряжение на зажимах электродвигателя;

- J_a — ток рекуперации от якоря электродвигателя;
 J_b — ток возбуждения электродвигателя;
 n — число электродвигателей на электровозе;
 v_m — скорость электровоза при потреблении тока электродвигателями;
 v_p — скорость электровоза при рекуперативном торможении;
 S_m — число последовательно соединенных электродвигателей в группе при моторном режиме;
 S_p — то же при рекуперативном торможении.

На основании приведенных формул, принимая определенное значение J_b и получая по тяговой характеристике электродвигателя соответствующее ему значение v_m , задаваясь произвольными J_a , могут быть определены величины B_p и v_p . Таким образом для каждого значения J_b и соответствующей ему v_m могут быть получены величины B_p и v_p для принимаемых значений J_a . Если на диаграмме в координатах B_p и v_p откладывать эти величины при разных значениях J_a , но постоянном значении J_b , то, соединив эти точки, получим кривую

$$B_p = f(v_p).$$

При определении величин B_p и v_p рекомендуется принимать значения J_a в *амп* соответствующие 140, 120, 100, 80, 60 и 40% от величины часового тока электродвигателя при моторном режиме его работы.

Аналогичным способом, беря другое значение J_b и соответствующее ему из тяговой характеристики значение v_m последовательно для тех же рекомендуемых значений J_a определяются величины B_p и v_p .

Отложив эти значения в системе координат и соединив эти точки, получим для этого значения J_b новую кривую $B_p = f(v_p)$; принимая таким образом различные значения J_b и соответствующие им значения v_m при одних и тех же значениях J_a , что и в предыдущих расчетах, получаем величины B_p и v_p , по которым можно построить серию кривых $B_p = f(v_p)$.

Рекомендуется принимать значения J_b в *амп* соответствующие 100, 80, 60, 40, 30 и 20% от величины часового тока электродвигателя.

Если на построенных таким образом кривых $B_p = f(v_p)$, соответствующих каждому определенному значению J_b , соединить точки, равнозначные одним и тем же значениям J_a , то получим новую серию кривых, из которых каждая будет соответствовать определенному значению J_a .

На рис. 100 приводится построенное таким образом семейство кривых $B_p = f(v_p)$ для различных значений J_a и J_b для электровоза с шестью электродвигателями при соединении их в три параллельные группы по два последовательно соединенных электродвигателя.

В приведенных ранее формулах, по которым определяются значения B_p и v_p , влияние стабилизирующих сопротивлений учитывается лишь на падение напряжения в цепи якоря.

Стабилизирующие сопротивления кроме того оказывают некоторое влияние и на смещение главного магнитного потока, аналогичное влиянию дополнительных полюсов.

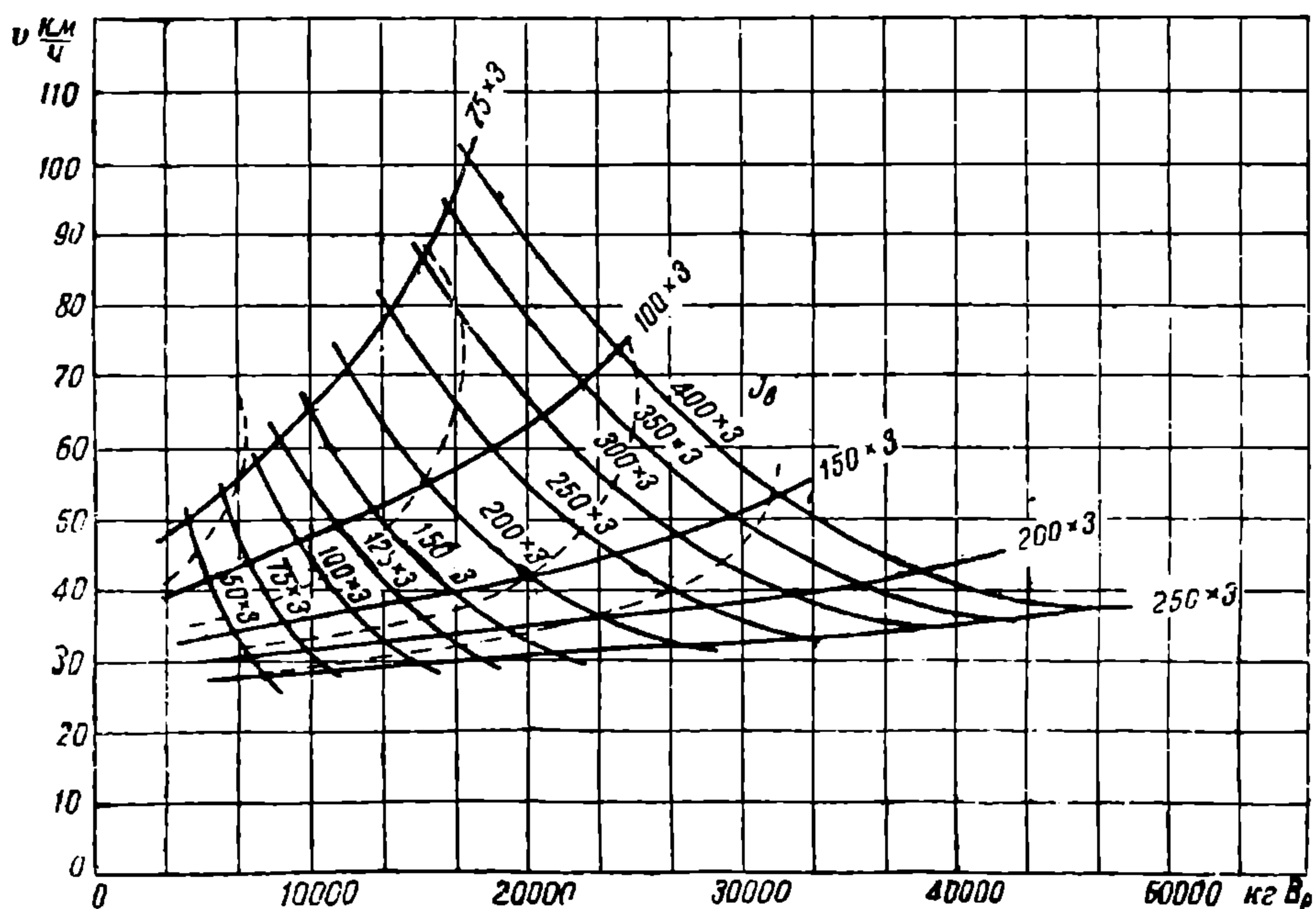


Рис. 100. Характеристики рекуперативного торможения.

Результирующее магнитное поле в этом случае будет эквивалентно току возбуждения не J_b , а J_{bx} , который может быть в предварительных расчетах приближенно определен из выражения

$$J_{bx} = J_b - \alpha J_a$$

где α — коэффициент, который принимается равным 0,25 — 0,35. При учете влияния стабилизирующих сопротивлений и на падение напряжения в цепи якоря и на смещение магнитного силового потока, поскольку изменяется эквивалентное значение тока возбуждения J_b , изменятся и кривые $B_p = f(v_p)$. Перестроение их легко может быть произведено на основании ранее построенных кривых.

Для этого определенные из приведенного выражения новые величины J_{bx} для каждого прежнего значения J_a и J_b в масштабе последних, откладываются на кривых $B_p = f(v_p)$ соответствующие

прежним значениям J_a , и соединив эти точки, получим характеристики рекуперативного торможения.

На рис. 100 эти кривые нанесены пунктиром.

На основании построенных кривых рекуперативного торможения при разных значениях J_a и J_b могут быть определены величины тормозящих усилий электровоза и скорости движения поезда.

Величины тормозных усилий электровоза и скорости движения при рекуперативном торможении ограничиваются условиями, обеспечивающими надежную и нормальную работу тяговых электродвигателей.

Так же, как при работе электродвигателей на под'емах с потреблением энергии при рекуперативном торможении, по условиям нагревания обмоток якоря, не допускаются значения рекуперированного тока больше величины его, соответствующего режиму часовой мощности электродвигателя. Следовательно, при больших тормозящих усилиях электровоза на руководящем скате или близких к руководящему, ограничение скорости движения будет происходить по условиям нагревания обмоток якоря электродвигателя (на рис. 99 это ограничение по току якоря проведено линией a).

При рекуперативном торможении на меньших скатах, при требующихся меньших тормозящих усилиях, получение больших скоростей движения достигается уменьшением силы тока возбуждения. Однако это ослабление магнитного потока главных полюсов, так же, как при шунтировке электродвигателей, ограничивается условиями надежной коммутации. На рис. 99 ограничение по коммутации проведено линией b .

При сильном ослаблении магнитного поля может появиться искрение и даже круговой огонь на коллекторе. В силу этого, в целях обеспечения нормальной коммутации, сила тока возбуждения J_b должна быть больше или равна половине тока рекуперации, т. е.

$$J_b \geq \frac{J_a}{2}.$$

Кроме того, наибольшие тормозящие усилия электровоза, которые могут быть допущены при рекуперативном торможении, ограничиваются условиями достаточного сцепления колес с рельсами и во избежание скольжения (юза) при рекуперативном торможении, в целях обеспечения большей надежности, коэффициент сцепления следует принимать несколько меньше (на 5—10%), чем при движении электровоза с потреблением энергии. Если на приведенной диаграмме (рис. 100) провести все указанные ограничения при рекуперативном торможении, т. е. наибольшие тормозящие усилия B_p ограничить условием надежного сцепления колес с рельсами и допустимой величиной рекуперированного тока в якоре ($J_a = J_{\text{час}}$), а при меньших тормозящих усилиях наибольшую скорость из усло-

вия $J_b = \frac{J_a}{2}$, то соединив точки пересечения кривых J_a и J_b , удовлетворяющих этому условию, получим кривую $B_p = f(v_p)$ того же вида, что приведена на рис. 99 при соответствующей схеме включения электродвигателей.

Наибольшая скорость, которая может быть допущена при рекуперативном торможении, при обеспечении всех указанных выше условий, ограничивается кроме того допустимой скоростью по тормозам и конструктивной скоростью электровоза.

§ 28. Уравнение движения поезда

Уравнение движения поезда должно дать аналитическую зависимость между силами, действующими на поезд и ускорением поезда в его поступательном движении. На основании этого уравнения путем интегрирования его могут быть установлены зависимости: скорости движения от пути, т. е. $v = f(s)$ и то же от времени, т. е. $v = f(t)$.

При точном выводе уравнения движения поезда следует рассматривать поезд, как систему материальных точек, однако принятие такого положения значительно усложняет математическое выражение уравнения движения, не являясь в то же время крайне необходимым для точности производства тяговых расчетов.

Поэтому, при выводе уравнения движения поезда, состав поезда принимается в виде одной точки, в которой сосредоточена вся масса его, и приложенной в центре тяжести поезда. Уравнение движения поезда наиболее просто выводится на основании закона живых сил, путем составления равенства, с одной стороны, приращения живой силы поезда при бесконечно-малом изменении его положения и, с другой,—элементарной работы всех действующих сил на поезд на этом отрезке пути.

При определении живой силы поезда необходимо учитывать, что движение некоторых частей элементов поезда, кроме поступательного движения, имеет еще и вращательное. Поэтому при определении живой силы поезда необходимо учитывать повышение инерции этих частей элементов поезда, вследствие составного их движения.

При выводе уравнения примем следующие обозначения:

M — масса поезда,

v — скорость поступательного движения поезда,

J_n и ω_n — полярный момент инерции и угловая скорость осей состава поезда,

J_∂ и ω_∂ — полярный момент инерции и угловая скорость осей электровоза,

J_∂ и ω_∂ — полярный момент инерции и угловая скорость якорей электродвигателей вместе с малыми зубчатыми колесами,

J_3 и ω_3 — полярный момент инерции и угловая скорость больших зубчатых колес.

Полная живая сила поезда равна:

$$\frac{Mv^2}{2} + \Sigma \frac{J_n \omega_n^2}{2} + \Sigma \frac{J_3 \omega_3^2}{2} + \Sigma \frac{J_\partial \omega_\partial^2}{2} + \Sigma \frac{J_3 \omega_3^2}{2}$$

Так как угловая скорость ω может быть выражена равенством:

$$\omega = \frac{v}{R},$$

где R — радиус круга катания колеса, то обозначив через R_n радиус колес состава, а через R_3 — радиус колес электровоза, имеем

$$\omega_n = \frac{v}{R_n} \quad \omega_3 = \frac{v}{R_3} = \omega_3; \quad \omega_\partial = \omega_3 \varphi = \frac{v}{R_3} \cdot \varphi,$$

где φ — передаточное число зубчатого механизма.

Заменяя в уравнении живой силы поезда значения ω через соответствующие приведенные выражения, получаем:

$$\frac{v^2}{2} \left(M + \Sigma \frac{J_n}{R_n^2} + \Sigma \frac{J_3}{R_3^2} + \Sigma \frac{J_\partial \varphi^2}{R_3^2} + \Sigma \frac{J_3}{R_3^2} \right),$$

Обозначим выражение

$$\Sigma \frac{J_n}{R_n^2} + \Sigma \frac{J_3}{R_3^2} + \Sigma \frac{J_\partial \varphi^2}{R_3^2} + \Sigma \frac{J_3}{R_3^2},$$

представляющее собой как бы величину дополнительной массы поезда через γM .

Тогда полная живая сила поезда будет равна

$$M (1 + \gamma) \frac{v^2}{2},$$

где коэффициент

$$\gamma = \frac{\Sigma \frac{J_n}{R_n^2} + \Sigma \frac{J_3}{R_3^2} + \Sigma \frac{J_\partial \varphi^2}{R_3^2} + \Sigma \frac{J_3}{R_3^2}}{M}$$

При бесконечно малом перемещении поезда имеем:

$$\frac{dM (1 + \gamma) v}{2} = (Z - W) ds,$$

следовательно

$$M (1 + \gamma) v dv = (Z - W) ds,$$

так как $v = \frac{ds}{dt}$, то подставляя вместо v его значение $\frac{ds}{dt}$ и производя преобразования, получаем

$$\frac{dv}{dt} = \frac{Z - W}{M (1 + \gamma)}.$$

Величина

$$M = \frac{Q}{g},$$

где g — ускорение силы тяжести $9,81 \text{ м/сек}^2$,

Q — вес поезда в $т$.

Так как значения Z и W выражаются в $кг$, а скорость v — в $км/час$, то для приведения выражения уравнения движения в системе этих единиц измерений, нужно ускорение силы тяжести выразить в $км/час^2$, которое равно

$$G = \frac{9,81 \cdot 60^2 \cdot 60^2}{1000} = 127\,000 \text{ км/час}^2.$$

Вес поезда в $кг$ равен $1000 Q$,
тогда

$$M = \frac{1000 \cdot Q}{127\,000} = \frac{Q}{127}.$$

Подставляя значение M в полученное ранее выражение уравнения движения, имеем

$$\frac{dv}{dt} = \frac{127}{(1 + \gamma)} \frac{(Z - W)}{Q}$$

При делении Z и W на вес поезда получаем удельные значения силы тяги и сопротивления движения, тогда уравнение движения будет:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{127}{(1 + \gamma)} (z - w).$$

Величина w общего удельного сопротивления движению поезда при применении силы тяги электровоза определяется для поезда, как для системы повозок, включая и электровоз, не учитывая сопротивления последнего как машины.

Для случая движения поезда без потребления тока электровозом, т. е. при $Z = 0$, но без применения тормозов, уравнение будет иметь вид:

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{127}{(1 + \gamma)} (w_{o/m}^{э.л} + w),$$

где $w_{o/m}^{э.л}$ — удельное сопротивление электровоза, как машины. При торможении поезда к сопротивлению движения поезда прибавляется еще удельная тормозная сила b и уравнение движения будет равно

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{127}{(1 + \gamma)} (w_{o/m}^{э.л} + w + b).$$

Величина коэффициента γ зависит от типа подвижного состава поезда, его ходовых частей, состояния нагрузки состава. Значение

коэффициента γ для разных типов поездов было приведено ранее в § 25 п. Е.

Для груженных товарных поездов, а также и для пассажирских поездов с электровозной тягой, величина коэффициента γ с достаточной практически для тяговых расчетов точностью может быть принята равной 0,06,

тогда

$$\frac{127}{(1+\gamma)} = \frac{127}{(1+0,06)} \cong 120.$$

При мотор-вагонной тяге величина коэффициента γ больше, чем при электровозной и при расчетах, не требующих большой точности, может быть принята равной 0,10.

Следовательно при мотор-вагонном движении

$$\frac{127}{(1+\gamma)} = \frac{127}{(1+0,10)} \cong 115.$$

§ 29. Определение веса поезда

На железных дорогах с электровозной тягой, так же, как и паровозной или тепловозной определение веса поезда производится из условия его равномерного движения по руководящему под'ему с определенной скоростью.

Уравнение движения в этом случае будет

$$Z = W.$$

Следовательно, вес состава (вагонов) поезда определится по формуле

$$P^B = \frac{Z^{эл} - (\omega_0^{эл} + i_p) P^{эл}}{(\omega_0^B + i_p)},$$

где P^B — вес вагонов в поезде,

$Z^{эл}$ — расчетная сила тяги электровоза, принимаемая на руководящем под'еме,

$\omega_0^{эл}$ — основное удельное сопротивление движению электровоза как повозки (если $Z^{эл}$ — касательная сила тяги на ободу),

i_p — величина руководящего под'ема в ‰,

$P^{эл}$ — вес электровоза,

ω_0^B — основное удельное сопротивление движению вагонов.

Сила тяги электровоза, как указывалось в §§ 22 и 26, ограничивается условием достаточного сцепления колес с рельсами, т. е. величиной силы тяги по сцеплению и, кроме того, условиями допустимой к использованию мощности электродвигателей с точки зрения безопасного нагрева обмоток электродвигателя, не превышающего допускаемой температуры для данного рода изоляции (§ 17).

В силу этого при электровозной тяге, в отличие от паровозной, окончательное установление наибольшего возможного веса поезда

может быть произведено лишь после производства расчета по проверке электродвигателей на нагревание.

Поверка же на нагревание может быть произведена лишь при определенном весе поезда и установленных для него скоростях движения, времени хода и расхода энергии.

Величина расчетной силы тяги может приниматься в пределах величин соответствующих длительной и часовой мощности электродвигателей, при этом, конечно, это значение силы тяги не должно превышать допустимой силы тяги по сцеплению.

До проверки электродвигателей на нагревание, при предварительном определении веса поезда, принятие расчетной величины силы тяги может быть произведено, исходя из следующих практических соображений (о нагреве электродвигателей) в зависимости от характера профиля дороги.

При волнообразном профиле, отсутствии затяжных руководящих под'емов и без применения рекуперативного торможения, величина расчетной силы тяги может быть принята соответствующей часовой силе тяги электровоза.

При профиле, имеющем участки значительного протяжения с затяжным руководящим под'емом и при применении рекуперативного торможения, при расчете может быть принята длительная сила тяги электровоза.

При прочих профилях, имеющих характер между указанными, расчетная сила тяги электровоза в первом приближении может быть принята равной

$$Z_{\text{эл}} = \frac{Z_{\text{час}}^{\text{эл}} + Z_{\text{дл}}^{\text{эл}}}{2}.$$

Приняв, на основании указанных соображений, расчетную силу тяги электровоза, вес вагонов поезда, а, следовательно, и вес поезда определится из приведенного ранее выражения. Для установленного таким образом веса поезда нужно произвести проверку на трогание поезда на остановочных пунктах и на руководящем под'еме.

При проверке трогания поезда с места на остановочном пункте в целях получения желательно большего ускорения, возможно применение часовой силы тяги электровоза или даже несколько большей, однако, не превышающей силы тяги по сцеплению без применения песка.

Величина ускорений при трогании с места на остановочных пунктах на магистральных железных дорогах с электровозной тягой, в зависимости от величины руководящего под'ема может быть выражена в средних величинах:

для пассажирских поездов	$a = 0,10 — 0,25 \text{ м/сек}^2$
товарных	$a = 0,05 — 0,10 \text{ м/сек}^2,$

Величина ускорения a при трогании с места на остановочном пункте поезда весом $Q = P^{эл} + P^B$ определится из выражения:

$$a = \frac{Z^{эл} - (w_0^{тр} \pm i) Q}{102 (1 + \gamma) Q} \text{ (м/сек}^2\text{)},$$

где i — величина уклона, на котором расположен остановочный пункт.

При профилях с небольшими руководящими под'емами 4—6‰ величина ускорения при трогании поезда с места даже на площадке может получиться меньше 0,05 м/сек².

Принимая во внимание, что величина ускорения, характеризующая время на разгон, на магистральных жел. дор. при длине перегона 8—10 км и более, незначительно влияет на пропускную способность, не следует, ради получения величины ускорения не менее 0,05 м/сек², уменьшать вес поезда.

Поверка в этом случае является лишь установлением действительно возможного трогания поезда с места, хотя бы и с меньшим ускорением.

При проверке на трогание поезда с места на руководящем под'еме, величина ускорения может быть допущена равной 0,02 м/сек².

Расчетная сила тяги в этом исключительном случае может приниматься, исходя из использования мощности электродвигателей больше, чем часовая, но не более как в 1½ раза и не должна превосходить ограничения силы тяги по сцеплению при применении песка. Коэффициент сцепления при песке может быть принят равным 1/4 и даже в крайне необходимых случаях до 1/3,3.

Приведенное выше определение веса поезда из условия равномерного движения на руководящем под'еме с определенной скоростью производится для средних условий погоды, т. е. температура не ниже —10° С, скорость ветра не больше 10 м/сек.

При наличии неблагоприятных условий погоды, что обычно бывает зимой, вследствие повышения сопротивлений движению поезда вес состава поезда должен быть уменьшен.

Точное установление величины уменьшения состава поезда в зимнее время, вследствие неблагоприятных условий погоды, по сравнению с расчетным весом состава, соответствующим летнему времени, представляется затруднительным, так как это зависит не только от условий погоды, но также от профиля и от топографических условий местности, в которой проходит дорога.

Далее в таблице 22 приводятся данные инж. В. Ф. Егорченко о процентном (ориентировочном) уменьшении при паровой тяге веса состава по атмосферным условиям:

Таблица 22

Температура от —°С до —°С	От мороза		От сильного ветра				От снега на рельсах (метель поземок)	
	до	больше	от 10 м/с до 15 м/с		больше 15 м/с			
	+ 8 ⁰ / ₀₀	+ 8 ⁰ / ₀₀	до + 8 ⁰ / ₀₀	больше + 8 ⁰ / ₀₀	до + 8 ⁰ / ₀₀	больше + 8 ⁰ / ₀₀	до + 8 ⁰ / ₀₀	больше + 8 ⁰ / ₀₀
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Выше — 10° С	0	0	10	5	15	10	0	0
— 10—15	5	5	10	5	15	10	0	5
— 15—20	10	5	10	5	15	10	5	5
— 20—25	15	10	10	5	15	10	5	10
— 25—30	20	15	10	5	15	10	10	10
— 30—35	25	20	10	5	15	10	10	15
— 35—40	30	25	10	5	15	10	15	15
Ниже 40	35	30	10	5	15	10	15	20

В приведенной таблице процентное уменьшение веса поезда дано в отдельности от каждого влияющего фактора; при наличии же не одного, а одновременно двух или трех указанных факторов (мороза, сильного ветра или мороза, сильного ветра со снежной метелью) величина процентного уменьшения веса поезда будет слагаться соответственно из двух или трех слагаемых.

Все приведенные выше соображения по установлению веса поезда и проверке на трогание поезда с места относятся к магистральным железным дорогам с электровозной тягой.

При мотор-вагонной тяге вес состава поезда определяется главным образом исходя из условия получения необходимого ускорения при трогании поезда с места на остановочном пункте.

Исключение в этом отношении представляют лишь жел. дороги с очень большим руководящими под'емами, на которых вес состава и при мотор-вагонной тяге будет определяться аналогично электровозной тяге.

Определение веса состава, исходя из получения необходимого ускорения при трогании поезда с места на остановочном пункте, объясняется тем, что при мотор-вагонной тяге в силу коротких перегонов и частых остановок от величины ускорения при трогании поезда с места на остановочном пункте в сильной степени зависят техническая скорость движения и величина пропускной способности.

Поэтому установление величины ускорения при трогании с места, а следовательно и веса поезда, при точных расчетах в каждом конкретном случае должно производиться на основании технико-экономических подсчетов.

При предварительном определении веса состава поезда величина ускорения при трогании с места может быть принята от 0,4 до 0,6 м/сек², в среднем $a = 0,5$ м/сек². При определении веса поезда, исходя из ускорения при трогании с места, величина расчетной силы тяги, вследствие кратковременности периода пуска, может быть принята значительно больше, чем часовая (но не более полуторачасовой) и в то же время не должна превосходить допустимой силы тяги по сцеплению.

Так же, как и при электровозной тяге, для окончательного установления веса поезда необходимо произвести проверку электродвигателей на нагревание.

§ 30. Определение скоростей движения и времени хода поезда

Основными вопросами тяговых расчетов являются: определение скоростей движения поезда на различных элементах профиля и определение времени прохода поездом перегона между остановочными пунктами.

Решение этих вопросов, т. е. нахождение зависимостей $v = f(s)$ и $t = f(s)$, основывается на уравнении движения поезда и его интегрировании.

Аналитическое интегрирование уравнения движения дает сложные степенные уравнения, решение которых в практических расчетах затруднительно и не является крайне необходимым по точности расчета. Поэтому в тяговых расчетах применяются графо-аналитический, называемый иногда обыкновенным, и графический способы интегрирования уравнения движения.

Графо-аналитический метод определения скоростей движения и времени хода, применяемый в тяговых расчетах как на существующих магистральных жел. дор. с электровозной тягой, так и при проектировании новых железных дорог, будучи методом более простым, быстрым в подсчетах, в то же время является менее точным, так как исходит из условия равномерного движения на данном элементе профиля, следовательно, не учитывает влияния инерции поезда.

Графо-аналитическим этот метод назван потому, что при нем определение равновесных, т. е. равномерных, скоростей движения на различных элементах профиля производится графически, а подсчет времени хода поезда по перегону — аналитически, тогда как в графических методах и скорости движения и время прохода перегона определяются графическими построениями.

А. Графо-аналитический метод определения скоростей движения

Уравнение движения при использовании силы тяги электровоза имеет вид

$$\frac{dv}{dt} = 120 (z - w).$$

При равномерном движении $\frac{dv}{dt} = 0$ и уравнение движения будет

$$Z = W$$

Z — есть касательная сила тяги электровоза,

W — общее полное сопротивление движению поезда, равное

$$W = (w_0 + w_r + w_i)Q.$$

Заменяя удельное сопротивление от кривой и от уклона соответствующим эквивалентным по сопротивлению фиктивным уклоном, т. е.

$$w_r + w_i = w_{i\phi}$$

можно написать

$$Z = (w_0 + w_{i\phi})Q.$$

Определение скоростей движения поезда на различных уклонах производится графически, путем построения на одной диаграмме кривой $Z = f(v)$ и кривой $W = f(v)$, пересечение которых и дает ту искомую скорость, при которой будет условие равномерного движения, т. е. $Z = W$. На диаграмме (рис. 101) показано это определение.

Имея кривую касательной силы тяги электровоза в функции скорости, для схемы соединения электродвигателей соответствующей полному нормальному напряжению на зажимах последних, на этой же диаграмме в том же масштабе наносятся кривые $W = f(v)$. Значения W определяются для произвольных скоростей движения, так как необходимо получить лишь точки, через которые можно было бы провести кривую $W = f(v)$ с пересечением ею кривой $Z = f(v)$.

Снося точки пересечения на ось абсцисс, т. е. на ось скорости, получим значение равновесной скорости движения поезда на том уклоне, для которого построена кривая $W = f(v)$. Таким образом могут быть определены скорости движения поезда на всех под'емах, площадке и малых скатах.

Величина уклона, на котором поезд достигнет конструктивной скорости электровоза, определится из равенства силы тяги при этой скорости сопротивлению движению поезда.

$$Z = (w_0 + i_{\phi})Q \quad (\kappa_2),$$

откуда, зная Z и определив w_0 при конструктивной скорости получим

$$i_{\phi} = \frac{Z - w_0 Q}{Q} (0/00).$$

Начиная с этого уклона до величины ската, на котором электровоз уже пойдет без тока, а следовательно, не применяя силы тяги движение поезда, если нет в этом случае ограничения по тор-

можению, будет происходить с конструктивной скоростью электро-
воза. Величина наименьшего ската, начиная с которого и круче
электровоз пойдет без тока, т. е. без использования силы тяги,
определится из следующего условия $Z = 0$, следовательно $z = w = 0$.

Раскрывая значение ω , имеем

$$i_{\phi} = -\omega_0/6\pi,$$

т. е. величина этого ската, называемого предельным безвредным уклоном, равна основному удельному сопротивлению движению поезда, при определении которого необходимо считать удельное сопротивление движению электровоза и как повозки и как машины.

Величина основного удельного сопротивления движению поезда в этом случае определяется из выражения:

$$\omega_{об\ m} = \frac{\omega_{оп.м}^{\partial\lambda} \rho_{\partial\lambda} + \omega_o^B \rho_B}{\rho_{\partial\lambda} + \rho_B} \quad (\kappa z/m).$$

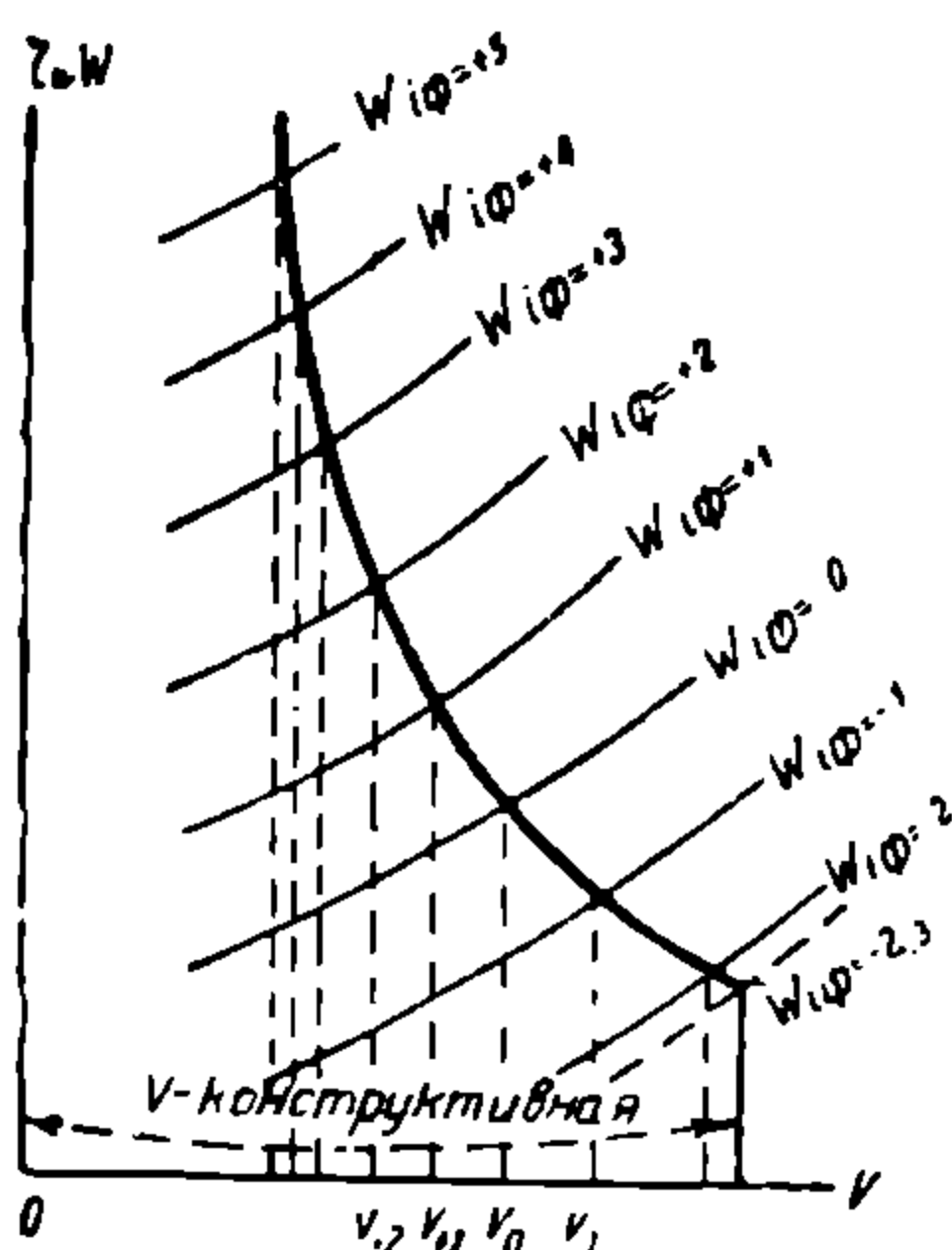


Рис. 101.

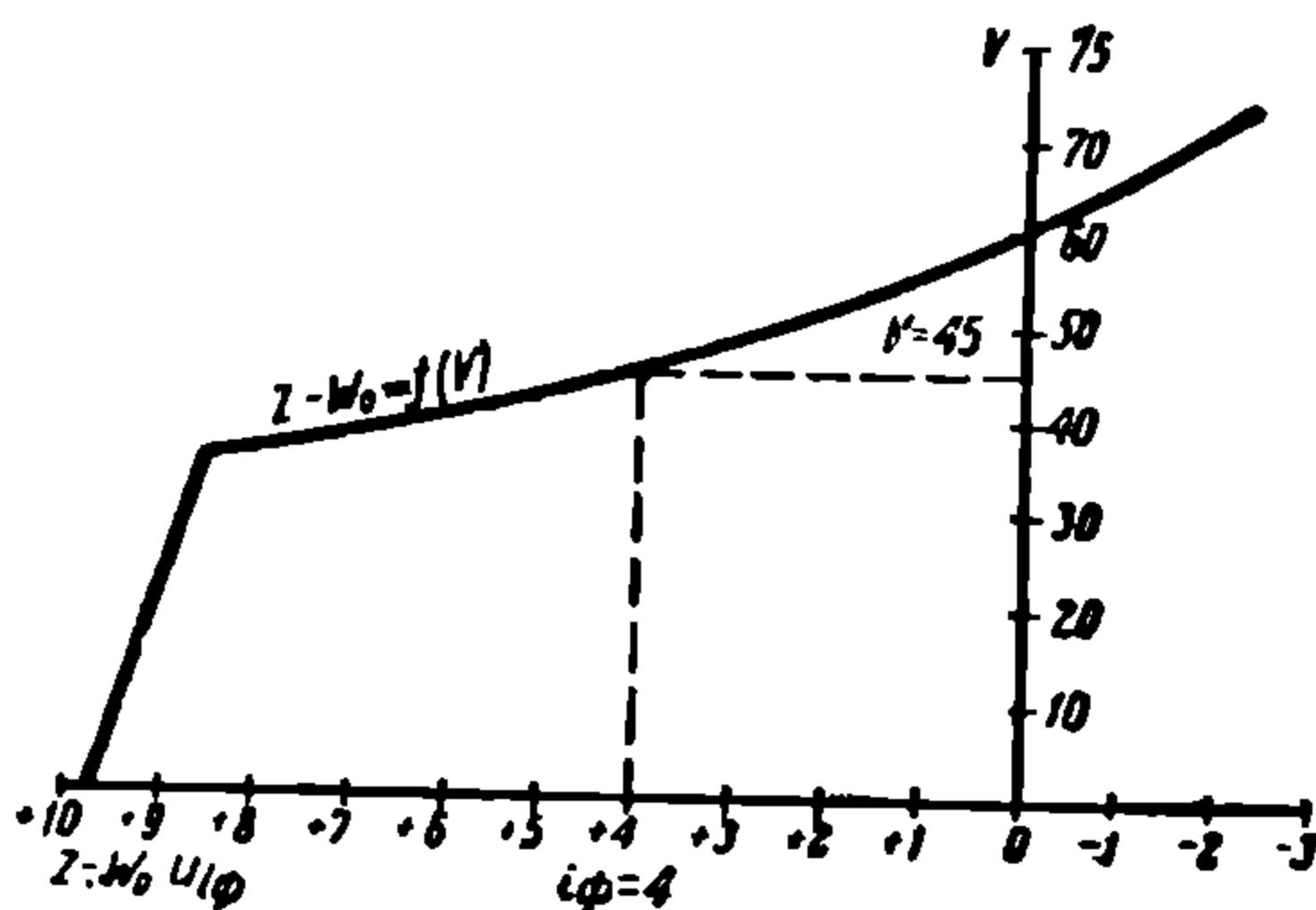


Рис. 102.

Определение скоростей движения поезда на различных элементах пути, помимо построения кривых $Z=f(v)$ и $W=f(v)$, может быть произведено другим способом, более просто, на основании построения так называемой кривой ускоряющих усилий.

Уравнение равномерного движения выражается

$$Z = W,$$

или, разделив на вес поезда $P^{\text{эл}} + P^B = Q$, получаем равенство удельных сил тяги и сопротивления движения

$$z = w,$$

где $w = w_0 \pm i_\phi$, следовательно $z - w_0 = \pm i_\phi$.

Определив значения z и w_0 для различных скоростей и построив по ним кривую ускоряющих усилий $z - w_0 = f(v)$ (рис. 102), эта же кривая, так как $z - w_0 = \pm i\varphi$, будет в то же время являться и

кривой $v = f(i_{\phi})$, т. е. определит скорости движения поезда на различных уклонах.

Вычисление данных для построения кривой $z - w_0 = f(v)$ может быть систематизировано в следующей таблице

$v \text{ км/час}$	$Z \text{ кг}$	$z = \frac{Z}{Q} \text{ кг/т}$	$w_0 \text{ кг/т}$	$z - w_0$

Величина уклона, на котором поезд достигнет конструктивной скорости, определится по кривой $z - w_0 = f(v)$, а величина предельного безвредного уклона аналитически так же, как и в предыдущем способе.

Следует отметить, что скорости движения поезда, близкие по величине к конструктивной, или конструктивная, установлены исходя из условия работы электровоза и могут быть допущены и приняты в расчетах лишь в том случае, если они не превышают допустимых на данном уклоне скоростей движения по торможению, т. е. по условиям возможной остановки поезда на этом уклоне при данных тормозных средствах на определенном по протяжению заданном тормозном пути. Скорости движения поезда на скатах круче предельного безвредного происходят при применении торможения, которое, как указывалось ранее в § 27, может осуществляться или посредством тормозных колодок (так называемое механическое торможение) или, при соответствующих технико-экономических условиях, используя рекуперацию энергии.

Скорости движения поезда при рекуперативном торможении, установление которых по условиям нормальной допустимой работы тяговых электродвигателей, изложено было ранее, с другой стороны не могут превышать допустимых скоростей движения по условиям механического торможения при данных механических тормозных средствах поезда. Поэтому как в том, так и другом случае необходимо определение допустимых скоростей движения по механическому торможению.

Исходными данными для этого определения являются заданные процент тормозных вагонов в составе поезда и длина тормозного пути. Зная процент тормозных вагонов, легко определить тормозную силу поезда при различных скоростях движения.

Величина удельной тормозной силы определяется из выражения

$$b_k = 1000 f_k \vartheta_k.$$

Уравнение движения при торможении имеет вид

$$\frac{dv}{dt} = -120 (w + b_k),$$

где $w + b_k = w_{об/т} - i_{\phi} + 1000 f_k \vartheta_k$.

Наиболее просто и в то же время достаточно точно определение допустимых скоростей движения по торможению может быть произведено путем графического интегрирования уравнения движения, что имеет широкое применение в тяговых расчетах.

Наиболее распространенным графическим способом определения скоростей движения является способ Липца, теоретическое обоснование которого, как являющееся независимым от рода тяги и излагаемое во всех руководствах по тяговым расчетам с паровой тягой, в данном изложении не повторяется.

Для определения допустимых скоростей движения по условиям торможения графическим способом Липца, вначале необходимо построить кривые $\omega + b_k = f(v)$, а по ним кривые $v = f(s)$. В том случае, когда значение ω_0 определяется по формулам вида $\omega_0 = a + bv$, т. е. первой степени, зависимость $\omega + b_k = f(v)$ будет не криволинейной, а прямолинейной, так как в выражении

$$\omega + b_k = \omega_{o/6m} - i_\phi + 1000 f_k \vartheta_k,$$

последний член зависит также от скорости в первой степени. В этом случае достаточно определить значение $\omega + b_k$ при двух скоростях, а именно при $v = 0$ и какой-либо другой скорости и по ним построить для того ската, на котором определяется скорость движения, прямую

$$\omega + b_k = f(v).$$

Следовательно, для каждой величины ската, на котором определяется допустимая скорость движения по торможению, строится своя прямая $\omega + b_k = f(v)$, а по ней кривая $v = f(s)$.

В том случае, когда зависимость $\omega + b_k$ выражается кривой, определение данных для построения этой кривой целесообразно производить, как указано в таблице 23.

Таблица 23

v км/час	ω_0 кг/м	$\omega_{o/6m} = \omega_0 + \frac{\omega_{o/м}^{эл} P_{эл}}{Q}$	f_k	$1000 f_k \vartheta_k$ (кг/м)	$\omega_{o/6m} + 1000 f_k \vartheta_k$	$\omega_{o/6m} - i_\phi + 1000 f_k \vartheta_k$
1	2	3	4	5	6	7

В этой таблице определение величины основного удельного сопротивления движения поезда $\omega_{o/6m}$, когда электровоз движется без тока $\omega_{o/6m}$ произведено через определенное ранее в кривой ускоряющих усилий основное удельное сопротивление движению поезда с увеличением его вследствие дополнительного сопротивления электровоза, как машины

$$\omega_{o/6m} = \omega_0 + \frac{\omega_{o/м}^{эл} P_{эл}}{Q}$$

Построение $w + b_k = f(v)$, а по ней кривой $v = f(s)$, по которой при заданном тормозном пути, определяется наибольшая допустимая скорость движения на данном уклоне, показано на рис. 103.

Построение кривой $v = f(s)$ по кривой $(v_{o/6m} - i_\phi + b_k) = f(v)$ производится следующим образом.

Линиями, параллельными оси абсцисс, в данном случае через 10 км, кривая $(w_{o/6m} - i_\phi + 1000 f_k \vartheta_k) = f(v)$ разделяется на несколько равных участков (могут быть и неравные) через середины которых, из начала координат, проведены лучи 1, 2, 3, 4, 5 и т. д.

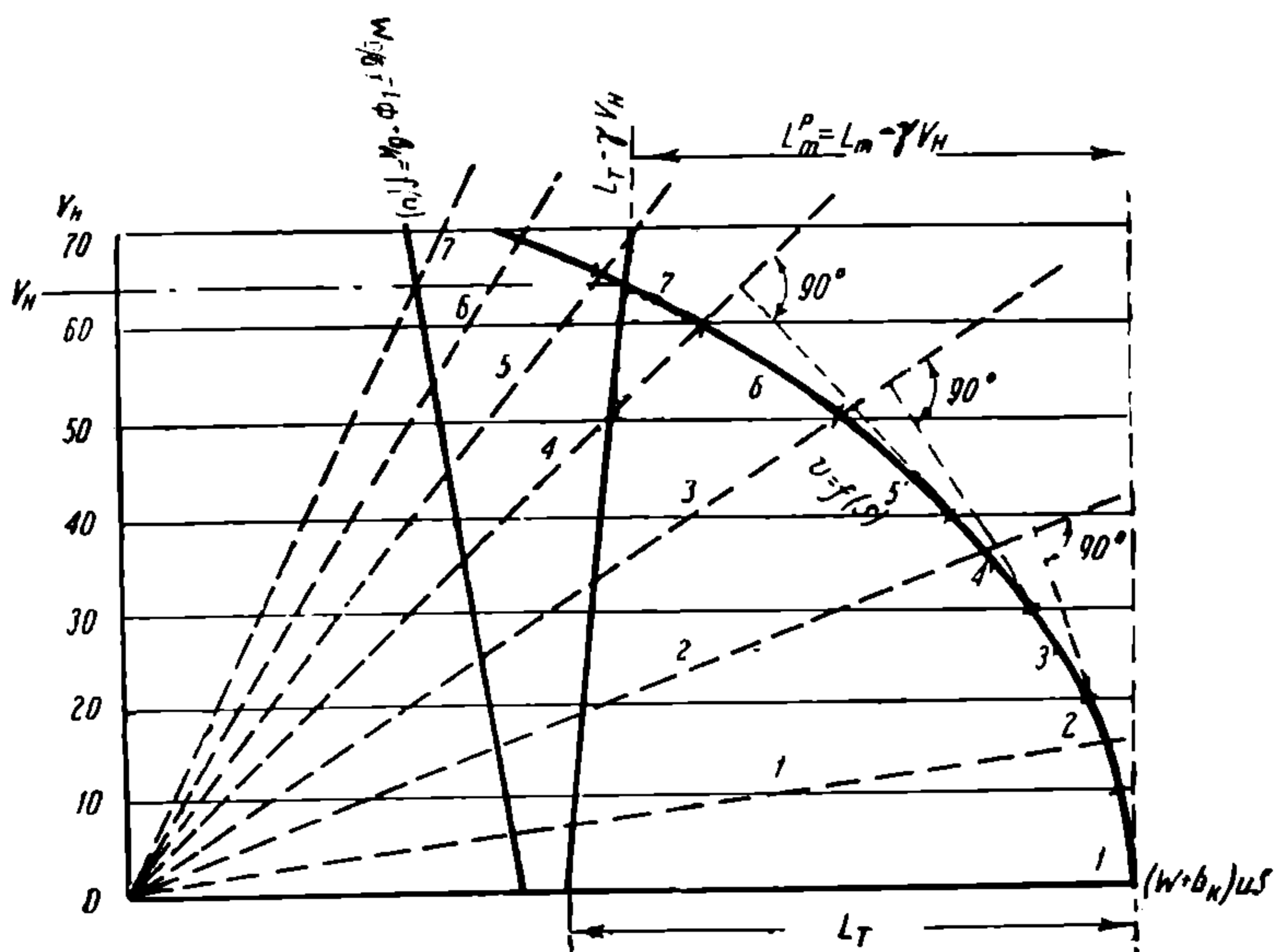


Рис. 103.

Перпендикулярно к этим лучам 1, 2, 3, 4, 5 и т. д. в пределах тех параллельных линий, которыми разделена на участки кривая $(w + b_k) = f(v)$, проводятся линии 1', 2', 3', 4', 5' и т. д., которые и образуют кривую $v = f(s)$.

Следует заметить, что начало построения кривой, т. е. расстояние первого луча 1' от начала координат, может быть взято произвольно. При помощи этой кривой $v = f(s)$ может быть определена не только та наибольшая скорость, которая допустима при заданном тормозном пути, но и определена та необходимая длина тормозного пути для разрешения заданной скорости движения на данном скате. Тормозной путь обычно является заданным, и поэтому решение задачи сводится к определению скорости. Так как кривая $v = f(s)$ выражает собой изменение скорости в процессе торможения на расчетном тормозном пути, т. е. когда

тормоза уже находятся в действии, то величина этого расчетного тормозного пути определяется из следующего выражения:

$$L_m^p = L_m - \gamma v_n,$$

где L_m^p — длина расчетного тормозного пути в м.

L_m — полная длина заданного тормозного пути в м

γv_n представляет собой тот участок в м из длины полного тормозного пути, который поезд проходит от восприятия машинистом сигнала о включении тормозов до момента их фактического действия.

Длина этого участка, называемая дополнительным тормозным путем, зависит от рода тормозов (автоматические или ручные) и, как видно из выражения γv_n , от величины начальной скорости торможения v_n .

При автоматических тормозах величина γ принимается равной для пассажирских поездов — 1,4, для товарных поездов — 3,3.

При автоматических тормозах величина полного тормозного пути L_m для товарных поездов принимается равной 800 м.

Тогда для товарного движения $L_m^p = 800 - 3,33 v_n$.

Для пассажирских поездов

$$L_m^p = 800 - 1,4 v_n.$$

Наибольшая допустимая скорость движения на скате по торможению определится точкой пересечения кривой $v = f(s)$ с прямой $L_m^p = f(v)$.

Для построения прямой $L_m^p = f(v)$ необходимо определить значения L_m^p для двух скоростей: $v = 0$ и другой какой-либо произвольной скорости.

При $v = 0$ $L_m^p = L_m$.

Отложив от начала кривой $v = f(s)$ в определенном масштабе зависящем от масштабов $\omega + b_k$ и v величину $L_m^p = L_m$ и значение L_m^p при другой скорости на соответствующей абсциссе скорости, через эти две точки проводится прямая, пересечение которой с кривой $v = f(s)$ и дает искомую наибольшую допустимую, скорость движения на скате. Величины масштабов $\omega + b_k$ (кг/м) скорости v км/час и пути L_m м находятся в определенной зависимости.

Если масштаб $\omega + b_k$ принят $1 \text{ кг/м} = a \text{ мм}$, масштаб скорости v принят $1 \text{ км/час} = b \text{ мм}$, то масштаб пути S , т. е. L_m должен

быть $1 \text{ км} = 1000 \text{ м} = \frac{120 \cdot b^2}{a} = c \text{ мм}$.

Определение времени прохода поездом элемента пути или перегона при графо-аналитическом методе расчета определяется, как указывалось ранее, аналитически.

Время прохода в мин. 1 км пути, если установлена скорость движения v км/час, равно

$$t_{км} = \frac{60}{v} \text{ мин.}$$

Следовательно, определив наибольшие скорости движения поезда на различных уклонах, легко может быть установлено время прохода 1 км пути на этих уклонах и построена кривая $t_{км} = f(i_{\phi})$.

Определение времени прохода поездом перегона, профиль которого задан, т. е. известно протяжение элементов с различными уклонами, производится путем определения времени прохода поездом каждого элемента $t = t_{км} \cdot l_{км}$ (мин.) и суммирования времени прохода по разным элементам. Подсчеты времени хода по элементам профиля и определение времени хода по перегону производятся обычно в ведомости. Форма ведомости для подсчетов времени хода, расхода энергии и проверки электродвигателя на нагревание при графо-аналитическом методе расчетов на вновь проектируемых железных дорогах приводится ниже в таблице 24.

Определенное таким способом время хода по перегону в каждом направлении движения в отдельности не учитывает влияния разгона и замедления на остановочных пунктах и инерции поезда при движении по элементам профиля, так как графо-аналитический метод, как указывалось ранее, исходит из условия равномерных скоростей движения. Для получения действительного времени прохода поездом перегона от момента трогания до момента остановки необходимо внести поправку, т. е. прибавить дополнительное время на разгон и замедление. Величина этой поправки зависит от руководящего под'ема, так как вес поезда при разных руководящих под'емах различный, а следовательно различно и ускорение при трогании и замедлении.

Величина поправки может быть достаточно точно определена построением кривых $v = f(s)$ и $t = f(s)$, т. е. тем графическим способом интегрирования уравнения движения, при котором не только время на разгон и замедление, а и полное время хода по перегону с учетом инерции движения поезда определяется графическим построением.

Без графического построения и при отсутствии более точных данных величина поправки в среднем приближенно может быть принята в 2 мин. на разгон и замедление поезда на перегон.

Подсчет времени хода по действительным длинам элементов профиля при большом протяжении участка, в особенности при производстве тяговых расчетов по существующей дороге, требует массовых арифметических действий, не достигая этим большей точности.

В целях уменьшения этих подсчетов, избежания возможных при массовых действиях ошибок, при производстве тяговых расчетов пользуются не действительным профилем дороги, а спрямленным.

1	Километр	При движении поезда туда		
2	Длина элемента l профиля в м			
3	Действительный уклон в ‰			
4	Эквивалентный уклон от кривой $\frac{12\alpha}{l}$			
5	Фиктивный уклон i_{ϕ} ‰	При движении поезда обратно		
6	t км одного километра			
7	$t = t_{км} l_{км}$ элемента			
8	Потребл. тока электровозом в мин. $J_{эл}$			
9	На элементе $J_{эл} t$	Нагревание электродвигателя амп. ² мин.		
10	$J_{дв} = \frac{J_{эл}}{\gamma} \text{ амп.}$			
11	$J_{дв}^2 \text{ амп.}^2$			
12	$J_{дв}^2 \cdot t \text{ амп.}^2 \text{ мин.}$			
13	Фиктивный уклон i_{ϕ} ‰	При движении поезда туда		
14	$t_{км}$ одного километ.			
15	$t = t_{км} l_{км}$ элемента $J_{эл}$			
16	Потребл. тока электровозом в мин. $J_{эл}$			
17	На элементе $J_{эл} \cdot t$	Нагревание электродвигателя амп. ² мин.		
18	$J_{дв} = \frac{J_{эл}}{\gamma} \text{ амп.}$			
19	$J_{дв}^2 \text{ амп.}^2$			
20	$J_{дв}^2 \cdot t \text{ амп.}^2 \text{ мин.}$			

Спрямление профиля состоит в том, что смежные элементы профиля, не резко отличающиеся друг от друга по величине уклона, заменяются одним прямым в профиле и плане элементом, общей длиной, равной сумме длин входящих в него элементов, а величина спрямленного уклона определяется из того условия, чтобы работа сопротивления движению на спрямленном элементе равнялась бы суммарной работе сопротивлений от действительных уклонов и от кривых спрямляемой группы элементов на всем их протяжении.

Спрямление трассы (т. е. профиля и плана) на перегоне состоит из трех операций: 1) разбивка перегона на участки примерно однообразного профиля, 2) спрямление в профиле нескольких элементов на данном участке, 3) спрямление участка в плане, т. е. замена кривых эквивалентным на всем участке уклоном. От спрямления элементов в профиле, т. е. замены несколько смежных действительных уклонов одним, величина спрямленного уклона на участке равна

$$i_{сп} = \frac{(h_{n+1} - h_n) \cdot 1000}{l_{сп}} \text{ ‰},$$

где h_{n+1} и h_n — отметки профиля в м, соответствующие спрямляемым границам.

$l_{сп}$ — длина в м спрямляемого участка, равная сумме длин входящих в него действительных элементов профиля.

От спрямления в плане величина дополнительного эквивалентного уклона на всем протяжении участка определяется в зависимости от типа вагонов в составе поезда.

Если товарный поезд состоит из двухосных вагонов, дополнительное удельное сопротивление от кривых, как указывалось ранее в § 25, определяется по формуле $w_k = \frac{750}{R}$

Величина эквивалентного дополнительного уклона от спрямления в плане будет равна

$$i_{кр} = \frac{13 \sum \alpha}{l_{сп}} \text{ (‰)},$$

где $\sum \alpha$ — сумма центральных углов поворота в градусах всех кривых на спрямляемом участке $l_{сп}$.

При составе поезда из четырехосных вагонов

$$i_{кр} = \frac{11 \sum \alpha}{l_{сп}} \text{ (‰)}.$$

В том случае, если состав поезда состоит из 50% двухосных и 50% четырехосных вагонов

$$i_{кр} = \frac{12 \sum \alpha}{l_{сп}}$$

Полная величина спрямленного уклона от спрямления участка в профиле и в плане равна

$$i_c = i_{np} + i_{кр}.$$

Спрявление профиля дороги может быть произведено как при расчетах времени хода по графо-аналитическому методу, так и при расчетах графическим способом.

При спрявлении профиля для производства расчетов по графо-аналитическому методу, длины действительных элементов профиля, которые могут входить в спрямляемый участок, допускаются больше, чем при графическом способе.

Следует отметить, что полных и точных правил по установлению границ спрямляемых участков нет. Из практики подсчетов времени хода поездов по спрямленным участкам установлены следующие ориентировочные формулы по установлению границ спрямленных участков.

Для производства расчетов времени хода графо-аналитическим методом

$$l \leq \frac{5\,000}{i_g - i_c} \text{ (м)},$$

где l — длина каждого элемента в м, входящего в спрямляемый участок,

i_c — величина уклона в ‰ получающегося после спрямления участка,

i_g — действительный уклон элемента профиля, входящего в спрямляемый участок

Значение $i_g - i_c = \Delta i$ является абсолютной величиной разности уклонов.

Для производства расчетов времени хода графическим методом:

$$l \leq \frac{2\,000}{i_g - i_c} \text{ (м)}.$$

Б. Графический метод определения скоростей движения и времени хода поезда

Графический метод определения скоростей движения и времени хода основан на графическом интегрировании уравнения движения поезда и дает построение кривой скорости, а по ней и кривой времени в функции пути по всему перегону. В отличие от графо-аналитического метода — этот метод учитывает инерцию поезда при движении и является более точным. На пригородных участках с мотор-вагонной тягой, где короткие перегоны и часты моменты разгона и замедления, этот метод получил исключительное применение.

Существуют несколько способов, предложенных различными авторами по построению кривых $v = f(s)$ и $t = f(s)$.

Наибольшее распространение получил способ Липца по построению кривой $v = f(s)$ и Лебедева по построению на основании $v = f(s)$ кривой $t = f(s)$.

Так как построение этих кривых $v = f(s)$ и $t = f(s)$ производится обычно вместе, то этот способ называется способом Липца-Лебедева. Построение кривых $v = f(s)$ и $t = f(s)$ по этому способу для случая движения поезда на площадке с момента трогания с места приведено на рис. 104.

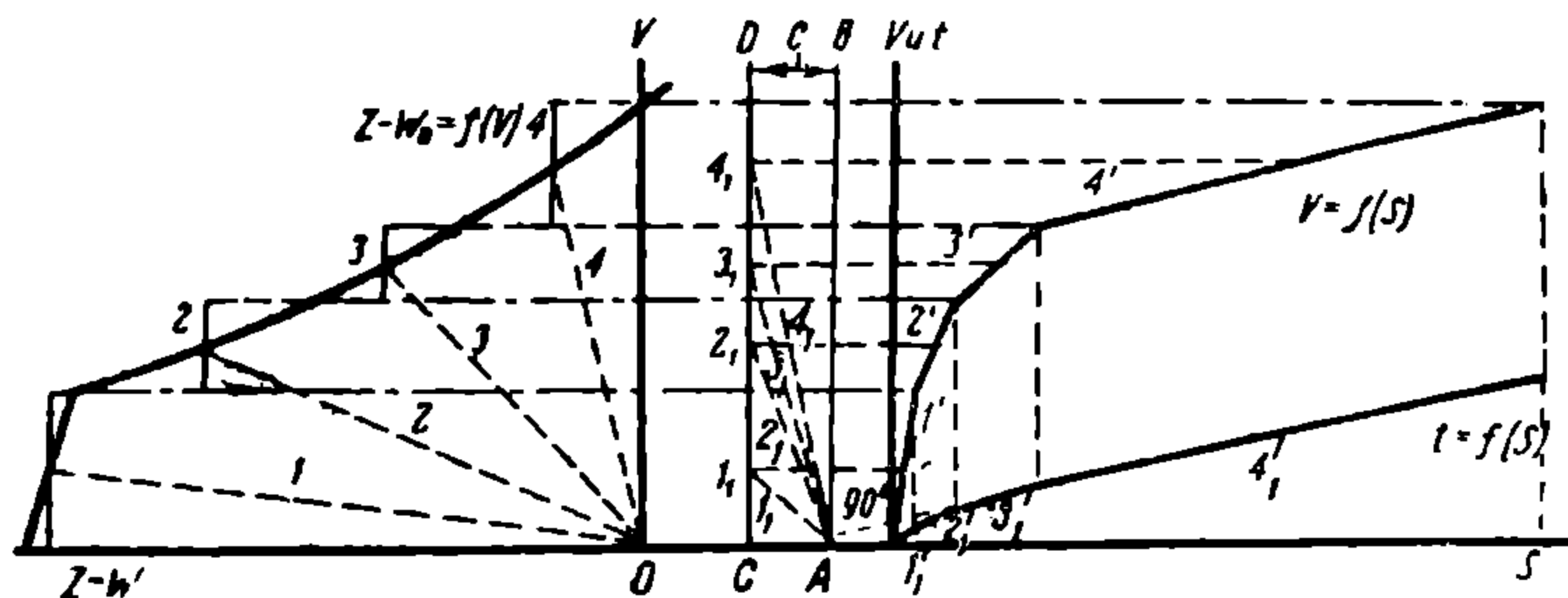


Рис. 104. Построение кривых $v = f(s)$ и $t = f(s)$ по способу Липца-Лебедева.

Построив кривую ускоряющих усилий $z - w_0 = f(s)$, разбиваем ее горизонтальными линиями на ряд отрезков, середины которых лучами 1, 2, 3 и 4 соединяются с началом координат (для случая движения на площадке $i = 0$). Перпендикулярно к этим лучам в координатах v и s проводятся в пределах между горизонтальными линиями отрезки прямых 1', 2', 3' и 4', составляющие кривую $v = f(s)$.

В том случае, если движение поезда будет не по площадке, а в под'ем или малый скат (с применением силы тяги), за полюс для лучей — 1, 2, 3 и 4, соединяющих с серединами отрезков кривой $z - w_0 = f(s)$ принимается не 0, а величина под'ема $i = z - w_0$, который находится влево, а при скате вправо — от начала координат.

Для построения на основании $v = f(s)$ кривой $t = f(s)$ влево от координат $v = f(s)$ проводятся перпендикулярно к оси пути S две линии AB и CD на расстоянии s друг от друга. На линии CD проектируются отрезки 1', 2', 3' и 4' кривой $v = f(s)$, заключенные между проведенными ранее горизонтальными линиями.

Средины этих проекций на линии CD лучами 1₁, 2₁, 3₁ и 4₁ соединяются с точкой A и перпендикулярно к этим лучам проводятся в координатах t и s отрезки, составляющие кривую $t = f(s)$.

Отрезки 1₁', 2₁', 3₁' и 4₁' кривой $t = f(s)$ в Границах соответствуют отрезкам 1', 2', 3' и 4' кривой $v = f(s)$.

Следует отметить, что масштабы сил, скорости пути и времени находятся в определенной зависимости.

Если примем масштаб сил 1 кг/т $a \text{ мм}$, а скорости— 1 км/час $b \text{ мм}$, то масштаб времени кроме того зависит от величины расстояния c между линиями AB и CD и выражается

$$1 \text{ мин.} = \frac{120 \cdot b \cdot c}{a \cdot 60} = \frac{2 \cdot b \cdot c}{a} \text{ мм.}$$

Удобные масштабы для построения кривых $v = f(s)$ и $t = f(s)$ следующие:

масштаб сил	Поезда	
	товарн.	пассажир.
» скоростей	$a = 40 \text{ мм}$	$a = 10 \text{ мм}$
» пути	$b = 4 \text{ км}$	$b = 3 \text{ км}$
» времени	1 км 48 »	48 »
	1 мин 10 »	20 »

Для получения указанного масштаба времени необходимо расстояние между AB и CD принимать равным

$$c = \frac{5 \cdot 40}{4} = 50 \text{ мм}; \quad c = \frac{10 \cdot 10}{2} = 50 \text{ мм.}$$

На рис. 104 приведено построение кривой $v = f(s)$ по кривой ускоряющих усилий, т. е. для того случая, когда применяется сила тяги электровоза или мотор-вагона.

При движении поезда без использования силы тяги локомотива построение кривой $v = f(s)$ производится или по кривой замедляющих усилий, когда не применяются тормоза и движение поезда происходит по инерции, или по кривой тормозящих усилий, когда применяется торможение.

Следовательно, для построения кривой $v = f(s)$ на всем перегоне, помимо кривой $z - w_0 = f(v)$, необходимо иметь кривые

$$w_{0/6m} = f(v) \text{ и } w_{0/6m} + 1000 f_k v_k = f(v).$$

В целях удобства графического построения кривой $v = f(s)$ эти кривые строятся для каждого направления в отдельности (см. рис. 105).

Принцип построения кривой $v = f(s)$ по кривым замедляющих и тормозящих усилий тот же, что и по кривой ускоряющих усилий. Кривые $v = f(s)$ и $t = f(s)$, построенные для перегона от ст. А до раз'езда В, приведены на рис. 106.

§ 31. Определение расхода электрической энергии на движение поезда

Для определения расхода электрической энергии на движение поезда вначале необходимо установить потребление тока электровозом или мотор-вагоном в зависимости от скорости движения.

Зная число электродвигателей и рабочую схему их соединения при нормальном напряжении, на основании тяговой характеристики

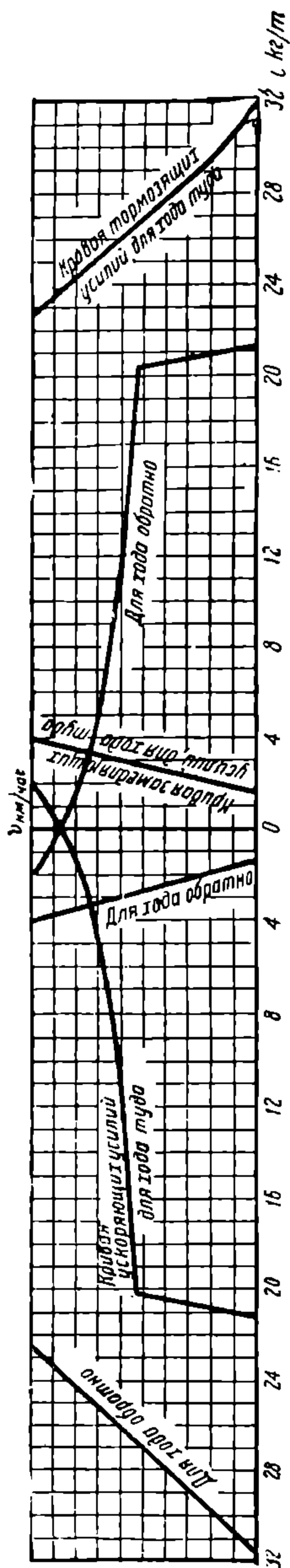


Рис. 105 Кривые ускоряющих, замедляющих и тормозящих усилий.

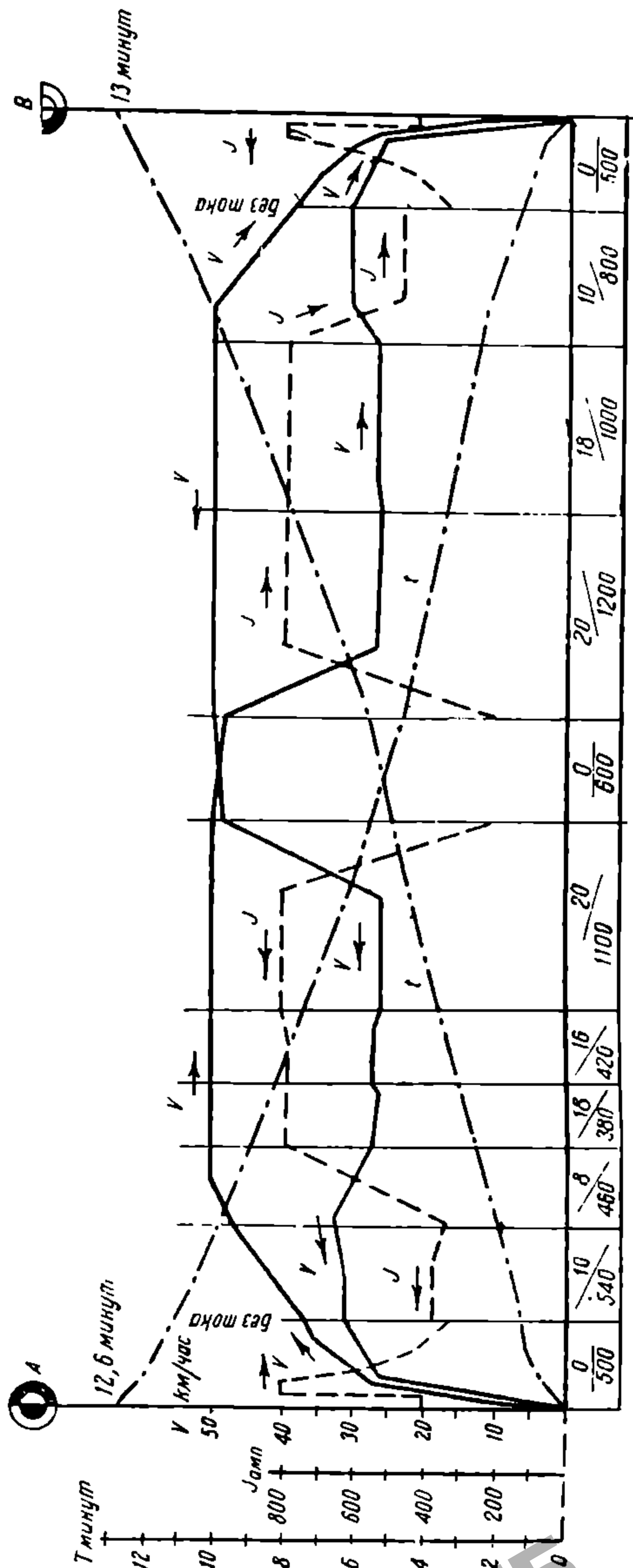


Рис. 106 Кривые скорости движения, времени хода и расхода тока на перегоне от ст. А до раз. В.

электродвигателя (§ 22, рис. 88) может быть построена кривая $J_{эл} = f(v)$.

В период трогания на остановочном пункте и до выхода на автоматическую характеристику потребление тока электровозом будет изменяться с изменением схемы включения электродвигателей.

Для электровоза с шестью электродвигателями при скорости выхода на автоматическую характеристику 30 км/час кривая $J^{эл} = f(v)$ имеет вид, показанный на рис. 107.

После выхода на автоматическую характеристику потребление тока будет изменяться в соответствии с тяговой характеристикой электродвигателя. Расход энергии на движение поезда за промежуток времени $t_2 - t_1$ выражается

$$A = \int_{t_1}^{t_2} E \cdot J \cdot dt.$$

Следовательно, для определения расхода энергии на движение поезда на каком-либо элементе профиля необходимо знать длину элемента, скорость движения или время прохода его. Напряжение E в контактом проводе на пантографе электровоза принимается постоянным.

При определении скорости движения и времени хода поезда графоаналитическим методом, определение расхода энергии на движение обычно производится в ведомости времени хода (табл. 24), где, определив потребление тока электровозом в минуту на данном уклоне и имея время прохода элемента в мин., определяется

расход тока $J^{эл} \cdot t$ в амп. мин. на каждом элементе. Расход энергии на движение поезда по перегону равен

$$A = \frac{\sum J^{эл} \cdot t \cdot E}{60 \cdot 1000} = 0,000016 E \sum J^{эл} t \text{ (квт. час.)}.$$

При напряжении в контактом проводе на пантографе электровоза $E = 3000 \text{ в}$

$$A = \frac{\sum J^{эл} t}{20} = 0,05 \sum J^{эл} \cdot t.$$

При графическом методе определения скоростей движения и времени хода, имея кривые $v = f(s)$ и $t = f(s)$, может быть построена кривая $J^{эл} = f(s)$ (рис. 106).

Имею кривую $J^{эл} = f(s)$, разбив ее на участки, в пределах которых без большой погрешности изменение силы тока может быть

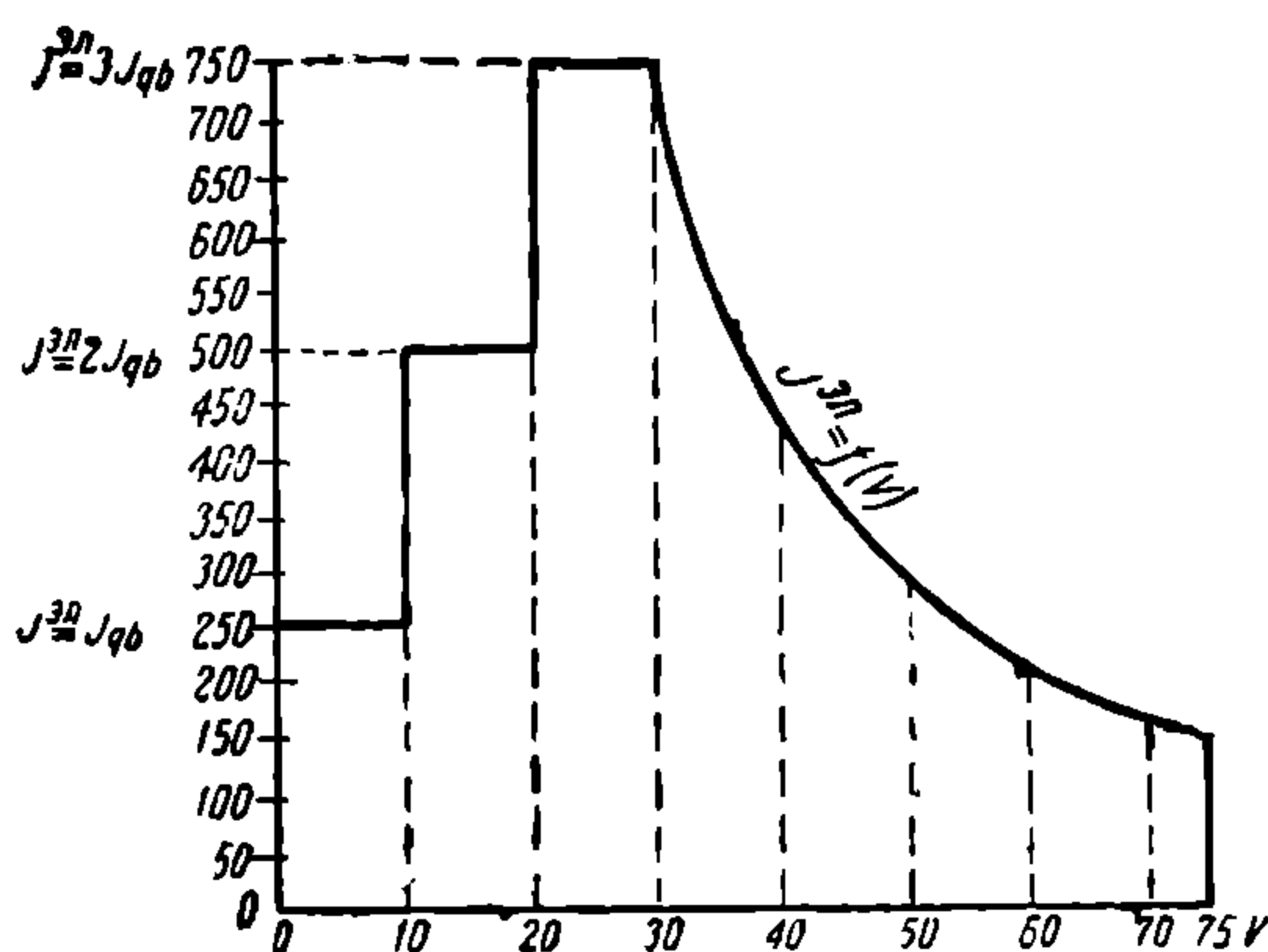


Рис. 107.

принято по прямой, средняя сила тока за данный промежуток времени будет равна:

$$J^{\partial\lambda} = \frac{J_n^{\partial\lambda} + J_{n+1}^{\partial\lambda}}{2},$$

где $J_n^{\partial\lambda}$ и $J_{n+1}^{\partial\lambda}$ — есть величины потребления тока в начале и в конце данного промежутка времени. Следовательно, расход тока в *амп. мин.* за этот период времени t равен $J^{\partial\lambda} \cdot t$. Суммируя эти значения по всему перегону, по приведенной выше формуле определяется расход энергии в *квт. час.* При графическом методе расчета скоростей движения и времени хода благодаря построению кривой $J^{\partial\lambda} = f(s)$ может быть достаточно точно определен расход энергии на движение поезда с учетом разгона и замедления.

При графо-аналитическом методе к определенному расходу энергии на движение поезда, в силу того, что в расчетах по этому методу исходят из равновесных скоростей движения, необходимо учесть увеличение расхода энергии за период трогания поезда с места.

Дополнительное удельное сопротивление от ускорения равно

$$\omega_p = 102 (1 + \gamma) a \text{ (кг/т)},$$

где a — ускорение в *м/сек²*.

Время разгона, до выхода на автоматическую характеристику при скорости v , определится из выражения

$$t = \frac{v}{3,6 a} \text{ сек.}$$

Расстояние l в *м*, проходимое поездом за период пуска до выхода на автоматическую характеристику

$$l = \int_0^t \frac{v \cdot dt}{3,6}$$

$$t = \frac{v}{3,6 \cdot a}, \quad dt = \frac{dv}{3,6 \cdot a},$$

откуда

$$l = \int_0^v \frac{v \cdot dv}{3,6^2 \cdot a} = \frac{v^2}{2 \cdot 3,6^2 \cdot a} \text{ (м)}.$$

Дополнительный расход энергии на тонну веса поезда при трогании поезда с места за период пуска равен

$$a_{mp} = \frac{\omega_p l \cdot 0,736}{75 \cdot 0,9 \cdot 3600} = \frac{102 (1 + \gamma) \cdot a \cdot v^2 \cdot 0,736}{75 \cdot 0,9 \cdot 3600 \cdot 2 \cdot 3,6^2 \cdot a} = 0,000012 v^2 \text{ (квт.-ч/т)}.$$

При весе поезда Q дополнительный расход энергии на трогание поезда равен

$$A_{mp} = 0,000012 v^2 Q \text{ (квт.-час)}.$$

Следовательно, при графо-аналитическом методе расчета расход электрической энергии на движение складывается из расхода, определенного из условия установившихся скоростей движения, и дополнительного расхода энергии на трогание поездов.

Как при графическом методе расчета так и при графо-аналитическом для получения расхода электрической энергии по дороге необходимо кроме этого учесть еще расходы энергии на маневровое движение, собственные нужды тяговых подстанций, освещение поездов, увеличение расхода энергии в зимнее время и прочее. Величина этих дополнительных расходов, учитываемых обычно в процентах от основного расхода на движение, зависит от характера движения на дороге, а также от климатических условий района местонахождения дороги.

Для магистральных жел. дорог с электровозной тягой при преимущественно товарном движении, в предварительных расчетах могут быть приняты в среднем следующие величины:

на маневры 5%,

на прочие дополнительные расходы 7%.

Таким образом полный расход энергии равен

$$A_n = (\Sigma A + \Sigma A_{mp}) \cdot 1,12 \text{ (квт-час)}.$$

При подсчетах расхода энергии, помимо общей величины суточного и годового расхода энергии по дороге, желательно иметь величину удельного расхода электрической энергии на m -км, характеризующего профиль дороги. Величина удельного расхода энергии определится из выражения

$$a_n = \frac{1000 \cdot A_n}{n \cdot Q \cdot L} \left(\frac{\text{ватт-час}}{m\text{-км}} \right),$$

где A — полный суточный расход энергии на движение поездов по участку,

n — число поездов в сутки,

Q — вес поезда в m ,

L — длина участка в $км$.

Приведенные величины как полного, так и удельного расхода энергии исчислены на пантографе электровоза.

Для получения расхода энергии на шинах высокого напряжения тяговых подстанций, необходимо учесть потери энергии в контактной сети, в агрегатах преобразования рода тока и трансформаторах.

Коэффициент полезного действия контактной сети в среднем за сутки может быть принят равным 0,94, а агрегатов преобразования рода тока и трансформаторов: для ртутных выпрямителей — 0,94, мотор-генераторов — 0,87.

Следовательно полный расход энергии на шинах высокого напряжения тяговых подстанций равен:
при тяговых подстанциях с ртутными выпрямителями

$$A_{н.ш.в} = \frac{A_n}{0,94 \cdot 0,94} = 0,88,$$

с мотор-генераторами

$$A_{н.ш.в} = \frac{A_n}{0,94 \cdot 0,87} = 0,82.$$

При применении регенеративного торможения на скатах получается возврат энергии—рекуперация, что уменьшает общий расход энергии. Величина рекуперативной энергии определится из выражения

$$A_p = \frac{\sum J_p^{эл} t \cdot E}{1000 \cdot 60}.$$

Величина силы тока $J_p^{эл}$, отдаваемая электровозом в контактную сеть, приводится в функции скорости в полной характеристике рекуперативного торможения электровоза.

При отсутствии этих данных, величина $J_p^{эл}$ приближенно может быть определена из выражения

$$\begin{aligned} J_p^{эл} &= \frac{(P^{эл} + P^B) (i - w_0) v \eta_p 1000 \cdot 0,736}{270 E_p} = \\ &= \frac{2,73 \eta_p (P^{эл} + P^B) (i - w_0) \cdot v}{E_p} \text{ (амп)}, \end{aligned}$$

где i — величина ската в ‰₀₀,

v — скорость движения в км/час,

η_p — коэффициент полезного действия зубчатой передачи и электродвигателя при рекуперативном режиме, равный в среднем 0,80.

E_p — напряжение на пантографе электровоза при рекуперативном торможении, которое может быть принято равным $1,10 E_k$, где E_k — напряжение на пантографе электровоза при моторном режиме.

При определении величины рекуперированной энергии рекомендуется подсчет производить в той же ведомости, что и расход энергии, т. е. получение на каждом скате, где применяется рекуперация, значения $J_p^{эл} \cdot t$.

§ 32. Проверка тяговых электродвигателей на нагревание

Для окончательного установления веса поезда необходимо произвести проверку тяговых электродвигателей на нагревание. Проверка на нагревание производится для того, чтобы установить безопасность с точки зрения нагрева обмоток якоря и полюсов при использовании принятого режима мощности электродвигателя.

Существуют два метода проверки электродвигателя на нагревание: метод эквивалентного или, как часто называют, эффективного тока, и метод непосредственного определения нагревания, т. е. определения температуры нагрева.

А. Метод эквивалентного тока заключается в том, что определяется за весь период движения средне-нагревательное значение силы тока, которое по нагреванию эквивалентно действительным нагрузочным токам.

Нагревание обмоток тягового электродвигателя происходит главным образом под влиянием джоулевых потерь.

По закону Джоуля и Ленца количество теплоты, образуемое током, проходящим по проводнику, равно

$$Q = 0,24 J^2 R \cdot t,$$

где J — сила тока, проходящая по проводнику в ампер,

R — сопротивление проводника в омах (Ω),

t — время действия тока.

Так как сопротивление обмоток электродвигателя без большой погрешности можно принять постоянным, то нагревание их под влиянием переменных значений нагрузочных токов и количество теплоты, выделяемой за период работы T , можно принять пропорциональным интегралу

$$\int_0^T J^2 dt,$$

или, при значении эквивалентного тока $J_{\text{э}}$, выражению

$$J_{\text{э}}^2 \cdot T$$

Приравнивая эти выражения, как эквивалентные по нагреванию за весь период движения, и решая относительно $J_{\text{э}}$, получаем

$$J_{\text{э}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T J^2 \cdot dt}$$

значение $\int_0^T J^2 dt$ может быть выражено через

$$\sum_0^T J^2 t,$$

тогда

$$J_{\text{э}} = \sqrt{\frac{1}{T} \sum J^2 t} \text{ (амп)}.$$

Следовательно эквивалентный ток определяется как средне квадратичное значение за весь период движения, который в отношении нагревания вызывает тот же эффект, что и действительные переменные нагрузочные токи за время их действия.

Имея величины действительных токов $J_1, J_2, J_3, J_4, \dots, J_n$, потребляемых электродвигателем на различных элементах профиля, и время хода по данным элементам $t_1, t_2, t_3, t_4, \dots, t_n$, а также зная время прохода поездом всего участка с учетом времени на стоянки

$$T = \Sigma t + \Sigma \tau,$$

величина эквивалентного тока определится из выражения

$$J_{\text{э}} = \sqrt{\frac{J_1^2 t_1 + J_2^2 t_2 + J_3^2 t_3 + J_4^2 t_4 + \dots + J_n^2 t_n}{\Sigma t + \Sigma \tau}} =$$

$$= \sqrt{\frac{\sum_1^n J^2 t}{\sum_1^n t + \Sigma \tau}} \text{ (амп).}$$

Подсчеты по определению эквивалентного тока рекомендуется производить в ведомости времени хода и расхода энергии (таблица 24). В целях оперирования с меньшими величинами, значение, $J_{\text{э}}$ следует определять не для всего электровоза, а для одного электродвигателя, т. е.

$$J_{\text{дв}} = \frac{J_{\text{эл}}}{b},$$

где b — число параллельно соединенных групп электродвигателей

Суждение, при этом методе проверки на нагревании, о допустимости принятого в расчет режима мощности электродвигателя производится на основании следующих положений:

$$J_{\text{э}} \leq k J_{\text{дл.}}$$

Величина эквивалентного тока должна быть меньше длительного тока электродвигателя с некоторым запасом, учитываемым коэффициентом k .

Значение коэффициента k для тяговых электродвигателей, применяемых на электровозах, принимается равным $0,85 \div 0,90$ при моторном режиме и $0,80 \div 0,85$ — при рекуперативном режиме.

Метод проверки электродвигателя на нагревание по эквивалентному току является приближенным методом, так как он дает лишь суждение о нагревании тягового электродвигателя в среднем за весь период движения по всему рассматриваемому участку дороги, но не дает гарантии в том, что на отдельных трудных, в отношении профиля участках пути, двигатель не перегреется, хотя средний эквивалентный ток за весь период движения и является допустимым.

Поэтому проверка на нагревание по этому методу производится в предварительных приближенных расчетах и в том случае, когда профиль дороги имеет волнообразный характер, т. е. чередующиеся подъемы и спуски небольшого протяжения.

При профиле дороги с затяжным руководящим или близкими к нему под'емами этот метод эквивалентного тока, как проверка электродвигателей на нагревание, неприменим. В этом случае, а также во всех более точных расчетах, когда определяется характер действительного нагревания тяговых электродвигателей, применяется метод непосредственного определения нагревания.

Б. Метод непосредственного определения нагревания электродвигателя является более точным методом, так как дает температуру нагревания электродвигателя на каждом элементе пути. Процесс нагревания тягового электродвигателя, как и всякого однородного твердого тела, характеризуется тепловым балансом, выражающим зависимость между количеством тепла, образующемся в теле за известный промежуток времени, с одной стороны, и количеством тепла, поглощаемым самим телом, а также количеством тепла, рассеиваемым в окружающую среду за этот же промежуток времени — с другой стороны.

Так как нагревание является результатом превышения температуры тела над температурой окружающей среды, то в расчетах по нагреванию вводится не температура тела, а превышение температуры над окружающей средой — сверхтемпература, которую обозначим через τ . Рассматривая бесконечно малый промежуток времени dt , тепловое состояние тела может быть выражено следующим уравнением:

$$Q \cdot dt = C \cdot d\tau + A \cdot \tau \cdot dt,$$

где Q — количество теплоты, выделяемое в теле в единицу времени,

C — теплоемкость тела, т. е. то количество тепла, которое необходимо для повышения температуры тела на 1°C ,

A — коэффициент теплоотдачи тела или коэффициент рассеяния тепла, т. е. количество тепла, теряемое телом в единицу времени в окружающую среду, при разности температур в 1°C .

Решая уравнение теплового баланса в отношении dt , имеем

$$dt = \frac{C \cdot d\tau}{Q - A \cdot \tau}.$$

Обозначив $Q - A \cdot \tau$ через α и продифференцировав, имеем

$$d\tau = -\frac{d\alpha}{A}$$

Подставляя значение $d\tau$ в приведенное ранее выражение, получим

$$dt = -\frac{C}{A} \cdot \frac{d\alpha}{\alpha};$$

обозначив $\frac{C}{A}$ через T_0 и проинтегрировав это уравнение, имеем

$$t = -T_0 \ln \alpha + \text{const}$$

или

$$t = -T_0 \ln (Q - A\tau) + \text{const},$$

принимая, что начальная сверхтемпература тела равна τ_n , будем иметь:

$$t = -T_0 [\ln (Q - A\tau)]_{\tau=\tau_n}^{\tau=\tau}$$

следовательно:

$$t = -T_0 [\ln (Q - A\tau) - \ln (Q - A\tau_n)] = -T_0 \ln \frac{Q - A\tau}{Q - A\tau_n}$$

откуда

$$\ln \frac{Q - A\tau}{Q - A\tau_n} = -\frac{t}{T_0},$$

т. е.

$$\frac{Q - A\tau}{Q - A\tau_n} = e^{-\frac{t}{T_0}},$$

где e — основание натуральных логарифмов. Из полученного выражения величина τ — сверхтемпература нагрева тела определится следующим уравнением

$$\tau = \frac{Q}{A} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_0}} \right) + \tau_n e^{-\frac{t}{T_0}}.$$

Следовательно, для определения сверхтемпературы τ при данном количестве тепла Q , выделяемом телом в единицу времени, необходимо установить значение коэффициента A — теплоотдачи и величину $T_0 = \frac{C}{A}$, выражающуюся в единицах времени, так как она представляет отношение теплоемкости, измеряемую

$$\frac{\text{колич. тепла}}{\text{градус. темпер.}}$$

к коэффициенту теплоотдачи, измеряемому,

$$\frac{\text{колич. тепла}}{\text{градус темпер. время}}$$

Величины A и T_0 при неизменяющемся состоянии среды, в которой находится тело, могут приниматься постоянными.

Величина T_0 называется постоянной времени и для электродвигателей с независимой вентиляцией при всех режимах работы может быть принята постоянной, независимой от скорости движения, так как вследствие постоянной величины объема охлаждающего

воздуха не меняется величина теплоотдачи. При начальной сверхтемпературе, равной нулю, $\tau_k = 0$, выражение для определения сверхтемпературы примет следующий вид

$$\tau = \frac{Q}{A} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_0}} \right)$$

В том случае, когда τ_k не равно нулю, но прекратилось выделение тепла $Q = 0$, т. е. происходит охлаждение, уравнение будет

$$\tau = \tau_k e^{-\frac{t}{T_0}}.$$

Если рассматривать нагревание или охлаждение при $t = \infty$, то так как

$$e^{-\frac{t}{T_0}} \sim 0$$

выражение конечной температуры будет равно при нагревании

$$\tau = \frac{Q}{A}$$

при охлаждении

$$\tau = 0.$$

Обозначив

$$\frac{Q}{A} = \tau_k$$

и подставив это значение в общий вид уравнения определения сверхтемпературы, имеем:

$$\tau = \tau_k \left(1 - e^{-\frac{t}{T_0}} \right) + \tau_k e^{-\frac{t}{T_0}}$$

Или, как приведено выше,

$$\tau = \frac{Q}{A} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_0}} \right) + \tau_k e^{-\frac{t}{T_0}}$$

Так как наиболее опасными частями электродвигателя в отношении перегрева являются обмотки, в основу расчета при нагревании которых кладутся джоулевы потери, пропорциональные квадратам сил тока, то в практических расчетах на нагревание вместо Q может быть поставлено значения J^2 , тогда уравнение примет вид

$$\tau = \frac{J^2}{A} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_0}} \right) + \tau_k e^{-\frac{t}{T_0}}.$$

Величина A — коэффициента теплоотдачи может быть определена из условия длительного режима работы электродвигателя, т. е. $t = \infty$, тогда

$$\tau = \frac{J_{\partial л}^2}{A}$$

откуда

$$A = \frac{J_{\partial л}^2}{\tau}.$$

Величина T_0 — постоянная времени, так же как и величина A для каждого электродвигателя обычно устанавливается заводом. При отсутствии величины, данной заводом, она может быть определена на основании следующего. Из полученных ранее уравнений имеем

$$t = \frac{C}{A} \ln \frac{Q - A \tau_{\kappa}}{Q - A \tau} = T_0 \ln \frac{Q - A \tau_{\kappa}}{Q - A \tau}$$

при начальной сверхтемпературе $\tau_{\kappa} = 0$

$$t = T_0 \ln \frac{Q}{Q - A \tau},$$

или

$$t = T_0 \ln \frac{J^2}{J^2 - A \tau}.$$

При $t = 60$ мин., что соответствует режиму часовой мощности электродвигателя, т. е. $J = J_{\text{час}}$ и подставив вместо A значение

$$\frac{J_{\partial л}^2}{\tau}$$

получим

$$60 = T_0 \ln \frac{J_{\text{час}}^2}{J_{\text{час}}^2 - J_{\partial л}^2}$$

откуда

$$T_0 = \frac{60}{\ln \frac{J_{\text{час}}^2}{J_{\text{час}}^2 - J_{\partial л}^2}}$$

Заменив натуральный логарифм \ln бригговым \lg будем иметь выражение

$$T_0 = \frac{60}{2,3 \lg \frac{J_{\text{час}}^2}{J_{\text{час}}^2 - J_{\partial л}^2}} \quad (\text{мин}).$$

На основании приведенных уравнений определения сверхтемпературы нагрева тяговых электродвигателей, существуют как аналитические, так и графические способы расчета. Из графических способов наиболее простым и для практических целей до-

статочно точным является излагаемый способ расчета по номограмме, предложенной немецкими инженерами Бухгольдом и Травником.

Приведенное ранее уравнение

$$\tau = \tau_k \left(1 - e^{-\frac{t}{T_0}}\right) + \tau_n e^{-\frac{t}{T_0}}$$

выражает собой как бы наличие двух одновременно происходящих процессов.

Нагревание без начальной температуры $\tau_n = 0$

$$\tau = \tau_k \left(1 - e^{-\frac{t}{T_0}}\right)$$

и охлаждение от начальной температуры τ_n

$$\tau = \tau_n e^{-\frac{t}{T_0}}$$

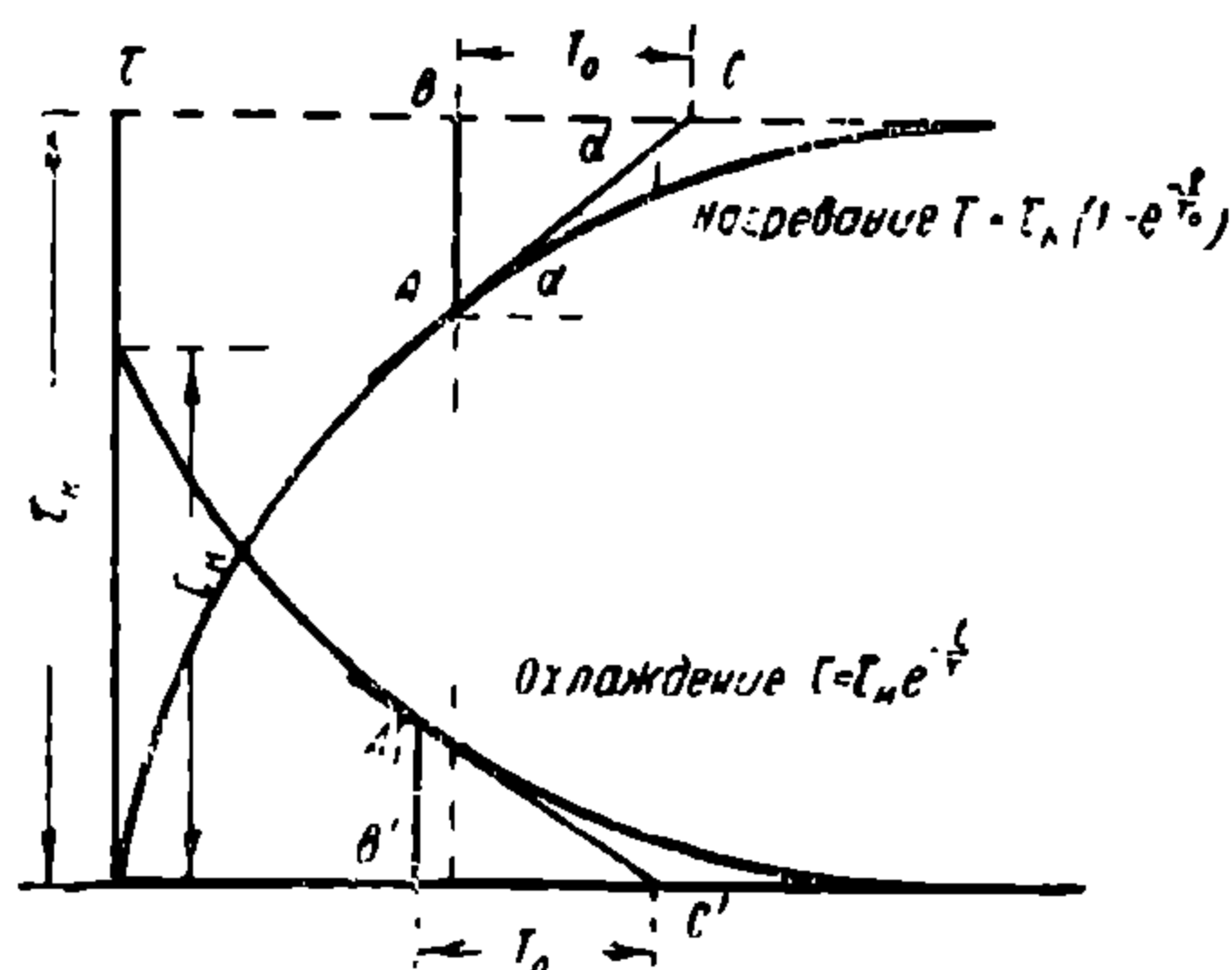


Рис. 108.

На рис. 108 изображены в функции t кривые нагревания и охлаждения тягового электродвигателя по приведенным последним двум уравнениям.

Эти температурные кривые являются логарифмическими кривыми и имеют то свойство, что подкасательная к ним является величиной постоянной.

Проведем в точке A кривой нагревания (рис. 108) касательную AC до пересечения с горизонталью, характеризующей температуру τ_k . На этой горизонтали касательная AC отсечет отрезок BC , равный

$$BC = \frac{AB}{\operatorname{tg} \alpha}$$

Отрезок

$$AB = \tau_k - \tau = \tau_k - \tau_k \left(1 - e^{-\frac{t}{T_0}}\right) = \tau_k e^{-\frac{t}{T_0}}$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{d\tau}{dt} = \frac{\tau_k}{T_0} e^{-\frac{t}{T_0}}$$

Следовательно

$$BC = \frac{AB}{\operatorname{tg} \alpha} = \frac{\tau_k e^{-\frac{t}{T_0}}}{\frac{\tau_k}{T_0} e^{-\frac{t}{T_0}}} = T_0 = \text{const.}$$

Таким образом подкасательная кривой нагревания является величиной постоянной, равной постоянной времени T_0 . Тот же вывод получим и для подкасательных к кривой охлаждения.

В общем уравнении определения сверхтемпературы

$$\tau = \tau_k \left(1 - e^{-\frac{t}{T_0}}\right) + \tau_n e^{-\frac{t}{T_0}}$$

можно исключить второй член суммы, если начало координат перенести по абсциссе влево на величину t_n , равную промежутку времени, в течение которого температура повышается от нуля до τ_n . Следовательно, значение новых абсцисс $t' = t_n + t$ и уравнение нагревания в новых координатах будет

$$\tau = \tau_k \left(1 - e^{-\frac{t'}{T_0}}\right)$$

при $t' = t_n$ получим

$$\tau_n = \tau_k \left(1 - e^{-\frac{t_n}{T_0}}\right)$$

Подставляя это выражение в общее уравнение и производя преобразования, имеем:

$$\tau = \tau_k \left(1 - e^{-\frac{t + t_n}{T_0}}\right) = \tau_k \left(1 - e^{-\frac{t'}{T_0}}\right)$$

На рис. 109 приведены кривые нагревания и охлаждения, а также кривая, соответствующая общему виду уравнения определения сверхтемпературы, изображенная в новой системе координат

Следовательно, на основании приведенных положений, можно во всех случаях расчета пользоваться уравнением вида

$$\tau = \tau_k \left(1 - e^{-\frac{t + t_n}{T_0}}\right) = \tau_k \left(1 - e^{-\frac{t'}{T_0}}\right).$$

Исходя из рассмотренных свойств температурных кривых можно в любой точке кривой графическим способом построить касательную и определить сверхтемпературу нагрева.

На рис. 110 изображены две кривые 1 и 2 для нагревания при разных режимах работы электродвигателя с конечными температурами τ_1 и τ_2 и одна кривая 3 для охлаждения (нет потребления тока).

В точках А, В и С этих кривых проведены касательные, которые с горизонтальными линиями установившейся сверхтемпера-

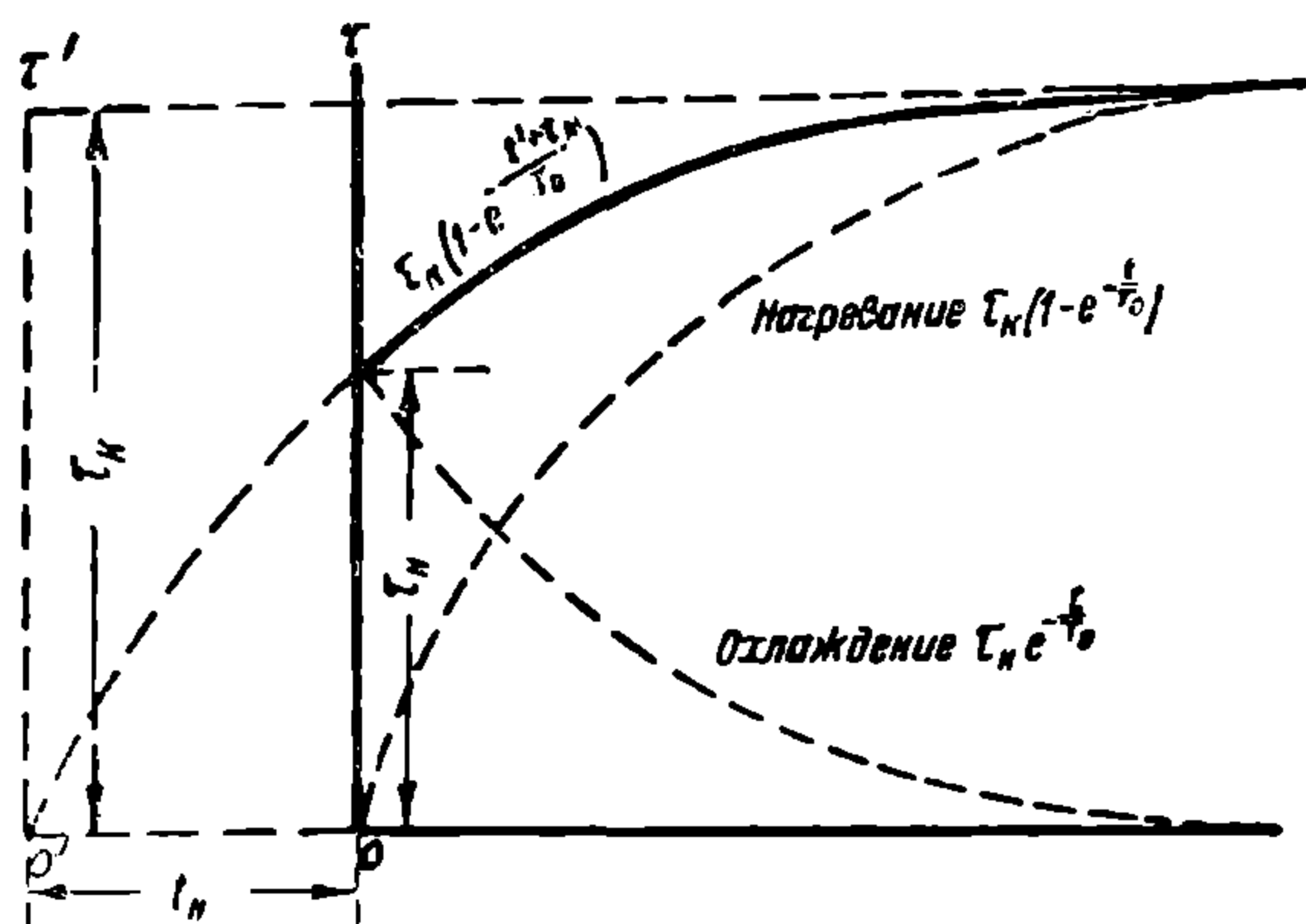


Рис. 109.

туры, образуют прямоугольные треугольники, одним из катетов которых является постоянная времени.

Если провести в стороне от оси координат две вертикальные линии I и II , перпендикулярные к оси абсцисс и находящиеся на расстоянии друг от друга равном T_0 , то снеся точки A , B и C кривых температур на ось I , а точки установившихся температур τ_1 , τ_2 и τ_0 на ось II , и соединив их между данными осями I и II , образуются прямоугольные треугольники, один из катетов которых — постоянная времени T_0 , а гипотенузы являются касательными к кривым нагревания.

Таким образом, имея возможность между осями I и II построить касательную к температурной кривой в любой точке и принимая на небольшом промежутке времени эти касательные как прямой отрезок кривой нагревания, можно получить приращение температуры за данный промежуток времени. Чем меньше промежуток времени, тем больше приближение касательной к кривой температуры, а следовательно тем больше точности в определении приращения температуры.

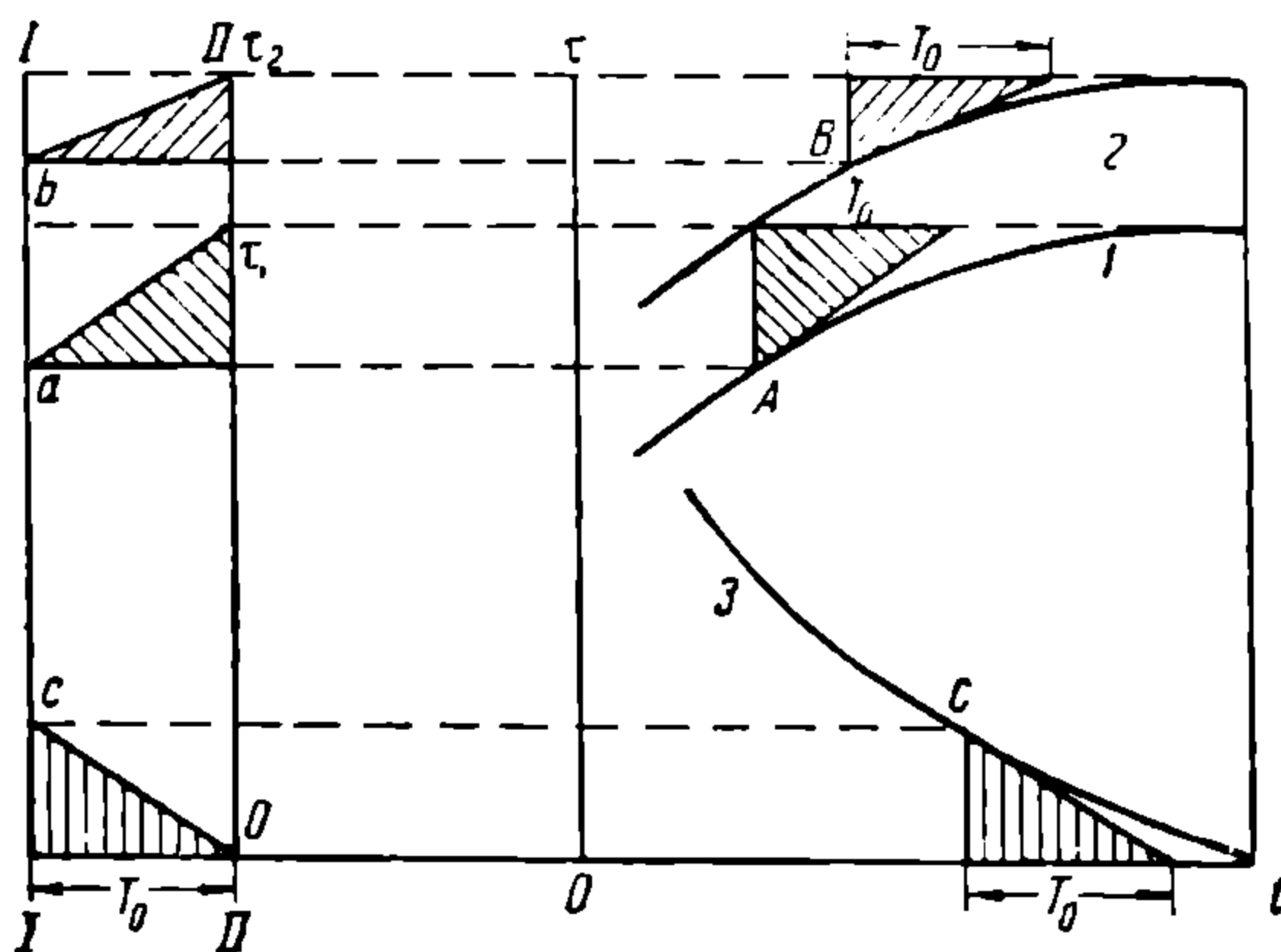


Рис. 100.

В произведенных до проверки на нагревание тяговых расчетах бывают определены величины тока, потребляемые электродвигателем на каждом элементе пути, время прохода данного элемента, а также известна предельная допустимая сверхтемпература электродвигателя над температурой окружающей среды при длительном режиме работы.

Величина установившейся сверхтемпературы при каждом режиме работы электродвигателя, необходимая для определения приращения температуры, может быть с достаточной для расчетов точностью определена из соотношения:

$$\tau_{дл} = \frac{J^2}{J_{дл}^2}$$

где τ — установившаяся сверхтемпература для данного режима работы электродвигателя,

$\tau_{дл}$ — предельная сверхтемпература при длительном режиме работы электродвигателя, устанавливаемая нормами (§ 17),

$J_{\text{дл}}$ — ток, соответствующий длительной мощности электродвигателя,

J — ток, потребляемый электродвигателем на данном элементе, для которого определяется приращение температуры.

Величина τ для каждого значения тока определится из выражения

$$\tau = J^2 \frac{\tau_{\text{дл}}}{J_{\text{дл}}^2}.$$

Так как $\tau_{\text{дл}}$, $J_{\text{дл}}$ являются постоянными величинами для данного электродвигателя, то следовательно на оси II (рис. 110) вместо значения τ можно отложить пропорциональные величины J^2 .

Для проверки электродвигателя на нагревание методом Бухгольда и Травника необходимо построить номограмму, по которой графически и определяется непосредственно величина сверхтемпературы на каждом элементе пути.

Составление номограммы заключается в следующем: на двух параллельных друг другу осях, находящихся на расстоянии T_0 , откладываются на одной значение τ в равномерном масштабе, а на другой оси на одном уровне с τ — соответствующие этим значениям величины квадратичных токов, определяемых из соотношения

$$J^2 = J_{\text{дл}}^2 \frac{\tau}{\tau_{\text{дл}}}.$$

Следовательно, в номограмме длительный ток $J_{\text{дл}}$ должен на-

ходиться на одном уровне с предельной сверхтемпературой $\tau_{\text{дл}}$. Практически, для нанесения по оси ординат значений сил тока кратным 10 амп определяется из выражения

$$\tau = J^2 \frac{\tau_{\text{дл}}}{J_{\text{дл}}^2},$$

для величин J кратным 10, значение τ , против которого на одном уровне и наносится соответствующее значение тока.

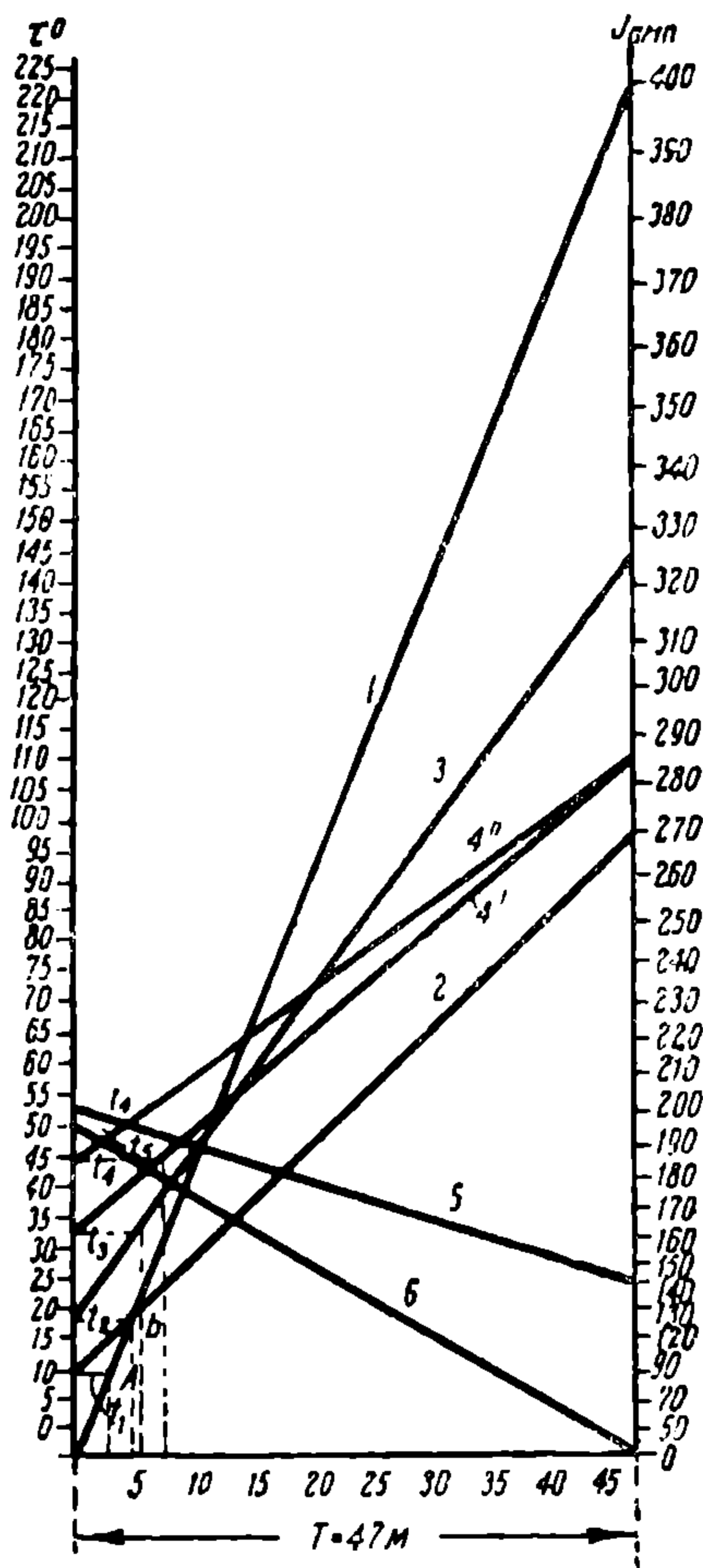


Рис. 111.

На рис. 111 приведена номограмма, построенная для следующих данных электродвигателя:

Длительный ток $J_{\text{дл}} = 272$ амп.

Предельная сверхтемпература $\tau_{\text{дл}} = 105^\circ \text{C}$.

Постоянная времени $T = 47$ мин.

По этой же номограмме в качестве примера произведен расчет на нагревание для случая движения поезда по элементам профиля пути с временем хода, потреблением тока электродвигателем на каждом элементе, приведенными в таблице 25.

Таблица 25

№№ элемен. профиля пути	Время прохода поездом элемента в мин.	Величина тока, потребляемого электродвиг. на данн. элементе	Сверхтемпература нагрева двигателя $^\circ \text{C}$
1	3 мин.	400 амп	15 $^\circ \text{C}$
2	4 "	270	22 "
3	6 "	320	38 "
4	13 { 7 м. 6 "	285	{ 49 " 57 "
5	5	140	54 "
6	3	0	51 "

При начальной сверхтемпературе, в начале движения равной 0, сверхтемпература после прохода первого элемента пути определится следующим образом: соединив точку $\tau = 0$, т. е. начало координат, с величиной тока, потребляемого электродвигателем, равным 400 амп, прямой линией, и отложив на оси абсцисс время прохода элемента в мин., восстанавливаем перпендикуляр до пересечения с проведенной ранее линией.

Снеся полученную точку пересечения на ось τ , определяется сверхтемпература в конце первого элемента. Для определения температуры в конце второго элемента поступаем аналогичным способом, но учитывая, что начальная температура при вступлении поезда на второй элемент не равна нулю. Четвертый элемент, в силу большой величины времени хода, разбит на два элемента.

Для получения большей точности желательно брать элементы с небольшим временем хода.

На основании полученных результатов может быть построена кривая изменения сверхтемпературы электродвигателя на каждом элементе пути при движении поезда по участку.

ГЛАВА III

УСТРОЙСТВО И РАСЧЕТ КОНТАКТНОЙ СЕТИ

Статья 5. УСТРОЙСТВО КОНТАКТНОЙ СЕТИ

§ 33. Системы подвески контактной сети

Основным условием, предъявляемым к контактной сети, является обеспечение хорошего токоснимания, т. е. надежного контакта между контактным проводом и пантографом. Система подвески контактной сети зависит от характера движения и типа подвижного состава, а также и от характера плана линии и климатических условий района местонахождения дороги.

Наиболее простой системой подвески контактной сети является трамвайная подвеска, приведенная ранее на рис. 34, в которой рабочий контактный провод поддерживается на опоре при помощи гибкой поперечины, в свою очередь через изоляторы прикрепленной к консоли опоры.

В продольном направлении расстояние между опорами 30—40 метров.

Эта система подвески, как указывает само название, получила распространение (при постоянном токе) исключительно только на трамвайных линиях, где скорости движения и потребление тока мотор-вагонами не велики.

При больших скоростях движения при этой системе подвески в местах подвески контактного провода имеют место явления разрыва между дугой токоприемника вагона и контактным проводом, отчего образуются искры и происходит подгорание контактного провода и повреждение дуги токоприемника.

Кроме того, применение этой системы подвески на электрических железных дорогах вследствие небольшого расстояния между опорами вызывает большое количество опор.

Ввиду приведенных недостатков трамвайной подвески на магистральных электрических железных дорогах с электровозной и мотор-вагонной тягой применяется система цепной подвески контактного провода, при которой рабочий контактный провод в нескольких точках в пролете подвешивается при помощи гибких струн к несущему тросу, который через изоляторы подвешивается к консоли на опорах.

Существуют различные системы цепной подвески.

Простая цепная подвеска, приведенная на рис. 112, с подвеской контактного провода при помощи струн непосредственно к несущему тросу.

Контактный провод обычно бывает один, но иногда по условиям токоснимания, при больших силах тока, потребляемых электро-

возом, в силу недопустимой плотности тока на единицу поверхности контакта, устраиваются два контактных провода, которые подвешиваются к одному несущему тросу и расположены в одной горизонтальной плоскости.

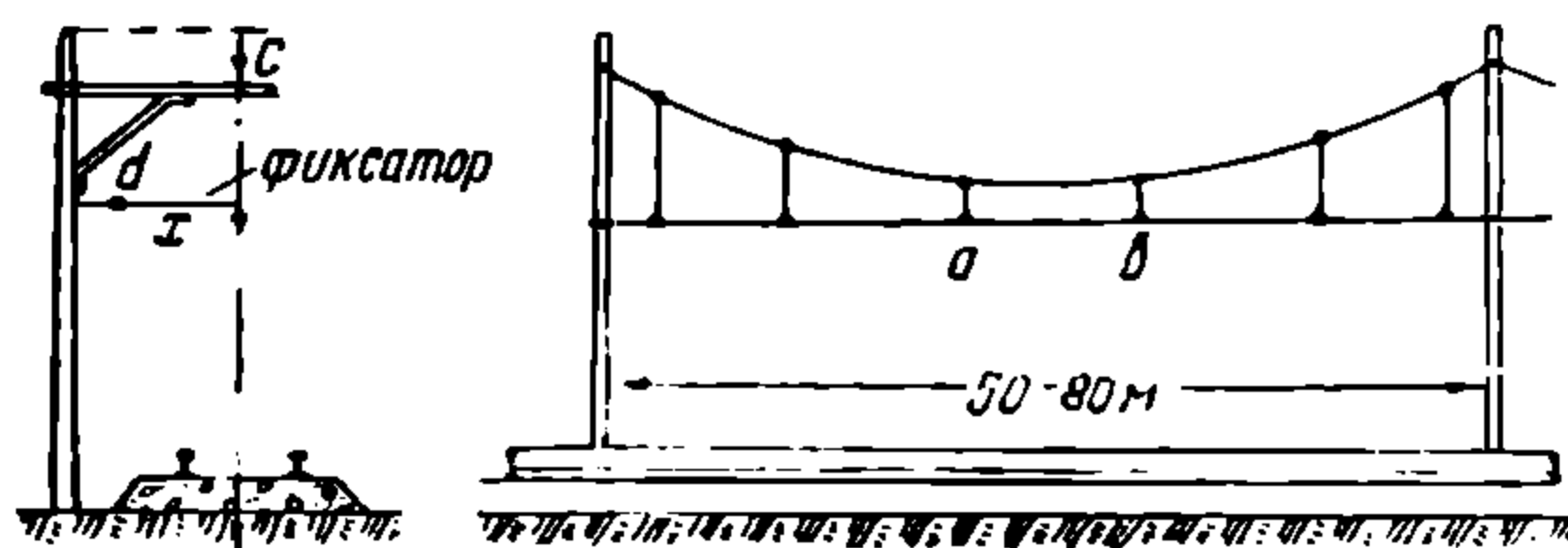


Рис. 112.

Кроме несущего троса и контактных проводов в том случае, когда по условиям электрического расчета сети необходимо большее сечение токонесущих проводов (порядка 300—500 мм²), применяются усиливающие провода, называемые усиливающими фидерами, которые через изоляторы подвешиваются на тех же опорах с другой стороны.

Через 100—200 метров эти усиливающие провода соединяются гибким проводом с контактными проводами. В целях изоляции от напряжения опоры и консоли, несущий трос подвешивается на консоли при помощи штыревого или подвесного изолятора.

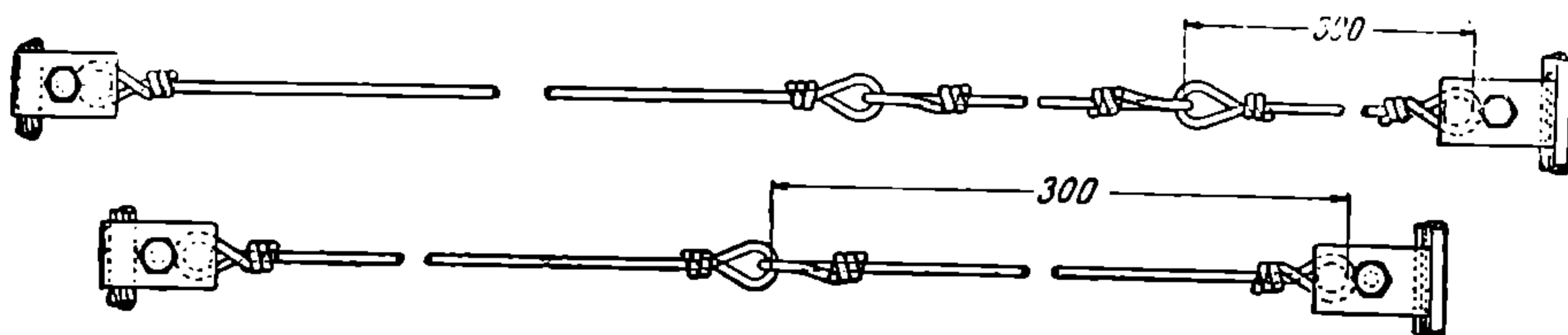


Рис. 113. Тип струны, принятый на электрифицированных ж. д. СССР.

Для сохранения в определенном положении контактного провода относительно оси пути, последний на опорах удерживается от бокового перемещения посредством так называемого фиксатора. В качестве фиксатора применяется обычно металлическая труба. Шарнирное прикрепление фиксатора к опоре осуществляется через изолятор.

Подвеска контактного провода к несущему тросу осуществляется при помощи гибких струн, которые по концам для крепления на контактном проводе и на несущем тросе имеют зажимы. На рис. 113 приводится тип струны, принятый на электрифицируемых дорогах СССР, а на рис. 114—применяемый струновой зажим из оцинкованного железа, скрепляющийся болтом.

Расстояние между струнами зависит от системы натяжения контактного провода и колеблется в пределах от 6 до 12 м.

Пролеты между опорами при простой цепной подвеске колеблются в пределах от 50 до 80 м, и зависят, помимо прочих условий, от принятой системы натяжения проводов.

На электрифицируемых жел. дорогах Америки и Франции, помимо простой цепной подвески, применяется еще система подвески с вспомогательным тросом, приведенная на рис. 115 и называемая системой компаунд.

При применении вспомогательного троса увеличивается инерция контактной подвески, что увеличивает устойчивость ее от колебаний и улучшает контакт между контактным проводом и токоприемником.

Кроме того, так как вспомогательный трос обычно бывает бронзовым, т. е. токонесущим, что увеличи-

вает общее сечение проводов, то отпадает необходимость в подвеске усиливающих фидеров, которые имеются в простой цепной подвеске.

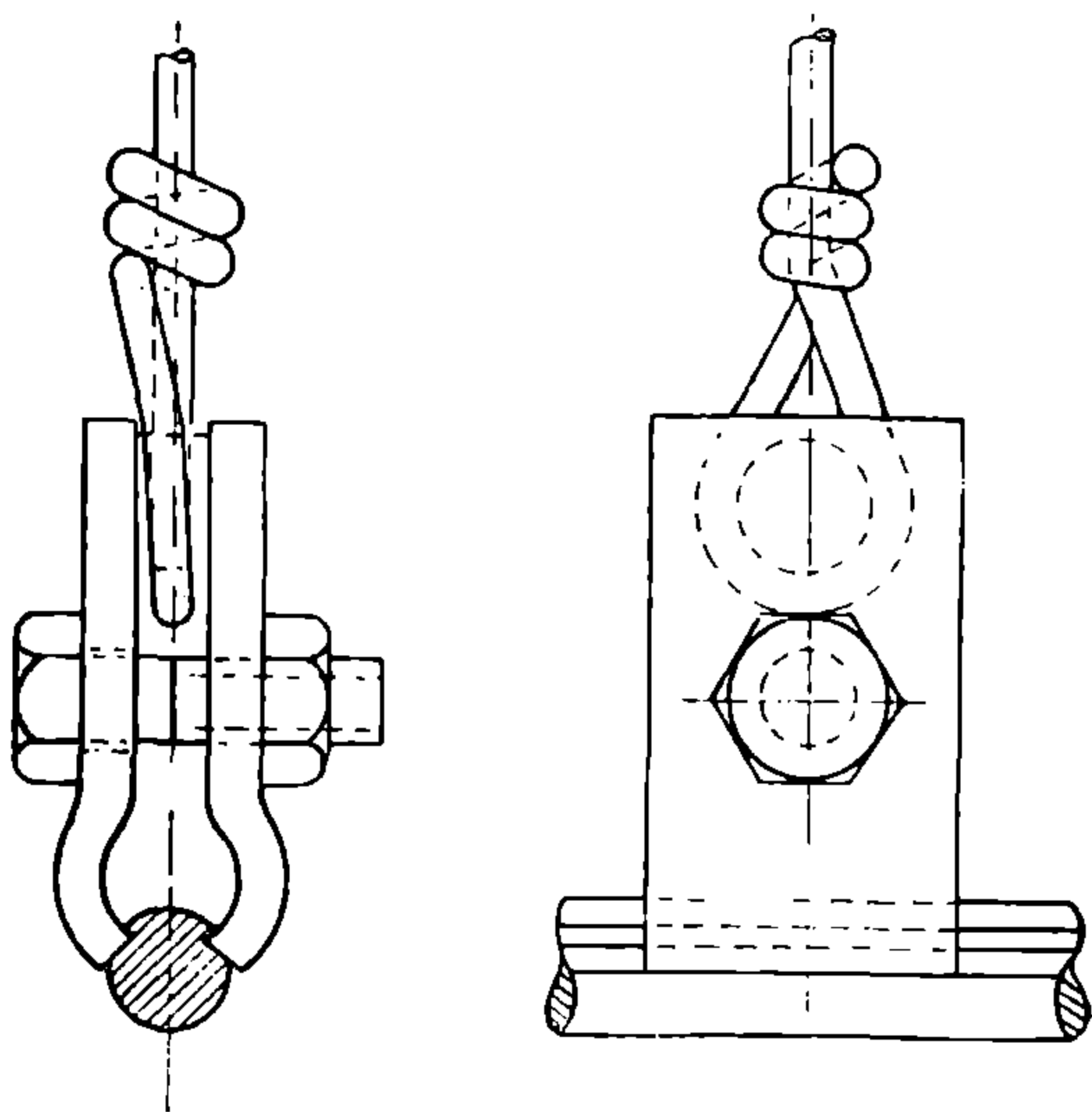


Рис. 114. Струновой зажим из оцинкованного железа, скрепляющийся болтом.

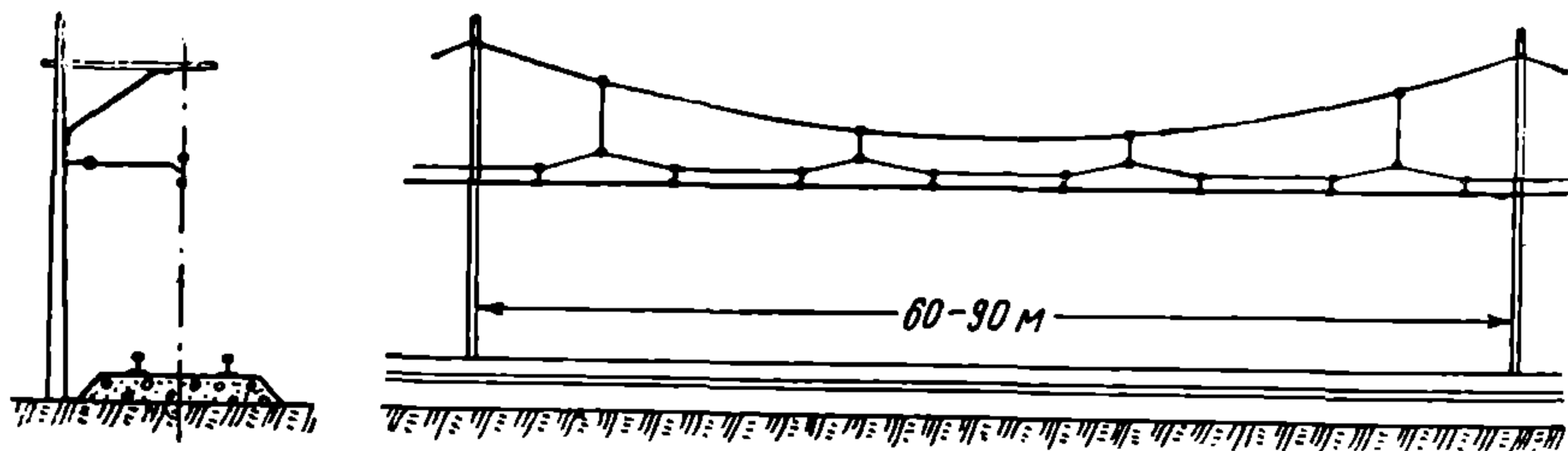


Рис. 115.

Система подвески компаунд в отношении монтажа сложнее, чем простая цепная подвеска, но с другой стороны, благодаря отсутствию усиливающих фидеров, дает в этой части экономию на стоимости изоляторов и монтажа их.

Вспомогательный трос прикрепляется к несущему тросу при помощи подвесок. Расстояние между подвесными струнами от 6 до 9 м. Контактный провод подвешивается к вспомогательному тросу струнами со специальными зажимами, расстояние между точками подвеса 4,5—6 метров.

Пролет между опорами при системе компаунд достигает до 90—100 метров.

При системе подвески-компаунд, несущий, вспомогательный и контактный провода устраиваются преимущественно в одной вертикальной плоскости, но могут, как это имеет место на Пенсильванской жел. дор. в Америке, располагаться и в разных плоскостях.

При простой цепной подвеске несущий трос и контактный провод на прямых участках пути располагаются как в одной, так и в разных вертикальных плоскостях.

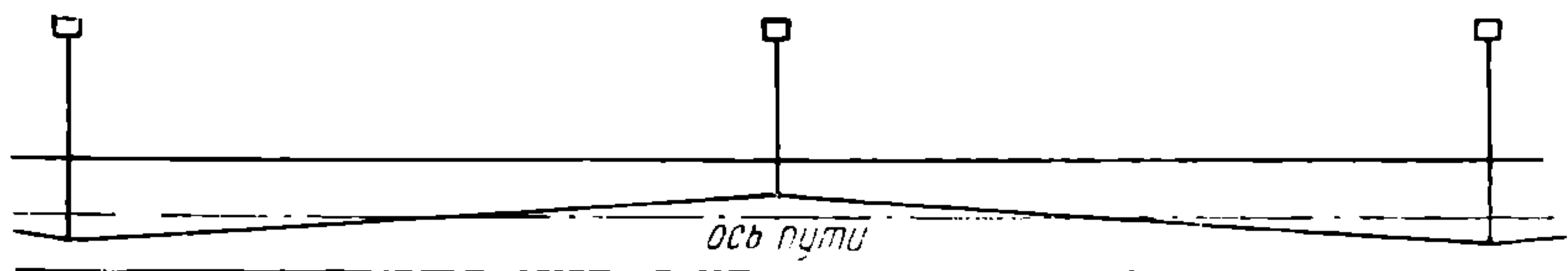


Рис. 116.

В целях обеспечения равномерного износа пантографа положению контактного провода в плане по отношению к оси пути придают некоторый зигзаг (рис. 116), который осуществляется на опорах при помощи фиксаторов.

Отклонение фиксатором контактного провода от оси пути может быть произведено или на каждой опоре, или через несколько пролетов. Величина зигзага ограничивается условием, чтобы при наличии его и действия ветра отклонение контактного провода от оси не выходило из пределов рабочей ширины лыжи пантографа, так как сход контактного провода с рабочей лыжи вызывает повреждение контактной сети и перерыв движения.

Несущий трос может находиться как в одной вертикальной плоскости с контактным проводом, так и вне, будучи расположен по оси пути. Последнее расположение контактного провода и несущего троса в плане принято как нормальное на германских железных дорогах. Зигзагообразное расположение в плане контактного провода и прямолинейные над осью пути несущего троса применены в СССР на электрифицируемом пригородном участке Сев. жел. дор. При таком расположении контактного провода и несущего троса струны у опоры наклонные, т. е. получается полукосая подвеска, являющаяся более устойчивой от действия ветра. При устройстве отклонения несущего троса от оси в обратную сторону от контактного провода получается косая цепная система

подвески. Косая цепная система подвески обладает еще большей устойчивостью от ветровых отклонений, но усложняет монтаж и вызывает удорожание контактной сети. Эта система подвески применена на некоторых американских дорогах: Чикаго – Южный берег – Мильвоки, Вестчестер – Бостон, и во Франции на Южной жел. дороге.

При косой системе подвески на кривых участках пути с малым радиусом ($R < 400$ м) допускается больший пролет, чем при других системах подвески, что и является ее преимуществом. На электрифицированных магистральных и пригородных жел. дорогах СССР применена простая цепная система подвески. Величина зигзага контактного провода определяется, исходя из приведенных выше условий, и не должна быть, согласно Т. У., больше 300 мм на прямых и 400 мм на кривых участках пути.

§ 34. Системы компенсирования контактной сети

Для сохранения контактного провода постоянно в положении параллельном плоскости головки рельса необходимо обеспечить постоянное в нем натяжение, которое не изменялось бы с изменением температурных условий. Постоянное натяжение контактного провода является одним из основных положений для обеспечения условий хорошего токоснимания.

Так как с повышением или с понижением температуры изменяется длина проводов, а следовательно изменяется величина его натяжения, то для обеспечения постоянного натяжения необходимо принять меры для компенсации этого температурного удлинения или укорочения проводов.

В каждой системе подвески контактной сети температурные изменения вызывают различные по величине изменения натяжения в проводах.

Наименьшее изменение в натяжении под действием температурных явлений происходит в косой подвеске, в особенности на кривых, так как в этом случае изменение длины контактного провода частично компенсируется автоматически изменением наклона струн.

В зависимости от способа компенсирования изменения длины проводов от температурных колебаний различаются следующие системы простой цепной подвески: вполне компенсированная система, полукompенсированная система с автоматической и с ручной регулировкой.

Для устройства компенсации проводов контактная сеть по длине разделяется на отдельные участки, называемые анкерными. Длина анкерных участков при различных системах различна и колеблется от 1 200 до 1 700 м.

На рис. 117 а, б и в схематически изображены различные системы компенсирования;

а — вполне компенсированная система,

б — полукompенсированная с автоматической компенсацией,

в — тоже с ручной сезонной регулировкой.

В вполне компенсированной системе компенсация контактного провода и несущего троса происходит автоматически, что дает в них постоянное натяжение. Эта система принята как нормальная для австрийских, норвежских и шведских железных дорог.

Вследствие малого сопротивления ветру длина пролета ограничивается 60 м.

В полукompенсированной системе компенсируется лишь контактный провод, трос же жестко закреплен на опоре.

Полукompенсированная система с автоматической компенсацией является нормальной для германских железных дорог и имеет следующие характеристики: длина пролета — 70—80 м, расстояние между струнами — 12,5 м, натяжение в контактном проводе — 900—1000 кг.

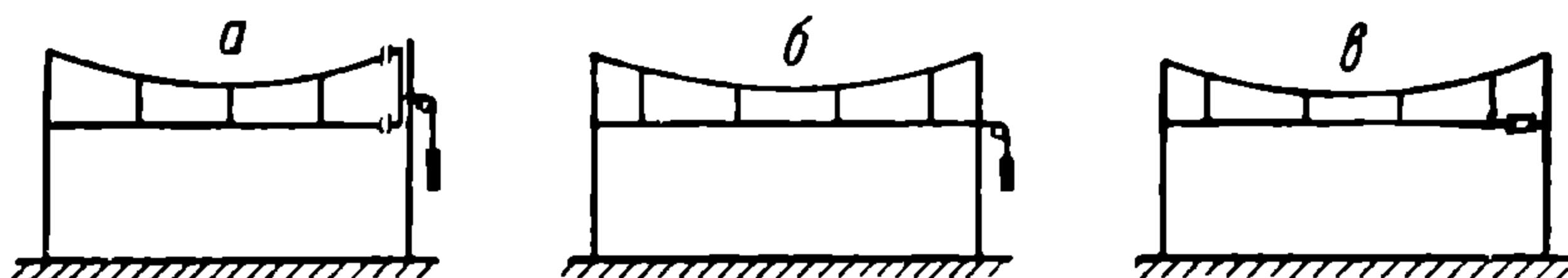


Рис. 117

В СССР эта полукompенсированная система с автоматической компенсацией применена на Северной жел. дор., на Сурамском перевале (участок Сталини-Тоннель) и на Луньевской линии Пермской жел. дор. и принята как нормальная для пригородных и магистральных железных дорог постоянного тока с напряжением 1500—3000 вольт.

Длина анкерного пролета 1400—1600 м на прямых участках и 1200—1300 м — на кривых участках пути. Анкеровка несущего троса и контактного провода осуществляется путем отвода цепной подвески в сторону на специальную анкерную опору.

Для компенсаторов применяются грузы бетонные. Постоянное натяжение в контактном проводе поддерживается снятием в нужное время части грузов с компенсаторов. Грузовые компенсаторы обычно устраиваются блочного типа: с одним подвижным и одним неподвижным блоками.

На рис. 118 показано крепление контактного провода на анкерной опоре через блоки посредством грузового компенсатора.

По сравнению с вполне компенсированной системой, при этой системе длина пролета больше. Вследствие применения больших расстояний между струнами, в случае обрыва контактного провода, обеспечивается заземление линии и тем предотвращение от повреждения контактной линии и пантографа. Уменьшение количества струн удешевляет стоимость контактной сети. Наибольшие преимущества полукompенсированная система с автоматической компенсацией имеет в случае применения ее на равнинных дорогах с небольшим количеством кривых, радиус которых $R \geq 600$ м.

На участках с большим количеством кривых и малого радиуса получается заедание провода в фиксаторах, в результате которого не сохраняется постоянное натяжение и тем ухудшаются условия токоснимания.

На таких участках более применима полукompенсированная система с сезонной ручной регулировкой натяжений в контактном проводе.

Эта система применена на магистральных железных дорогах: Чикаго—Мильвоки, Мексиканская, Паулиста, хотя американцы ее

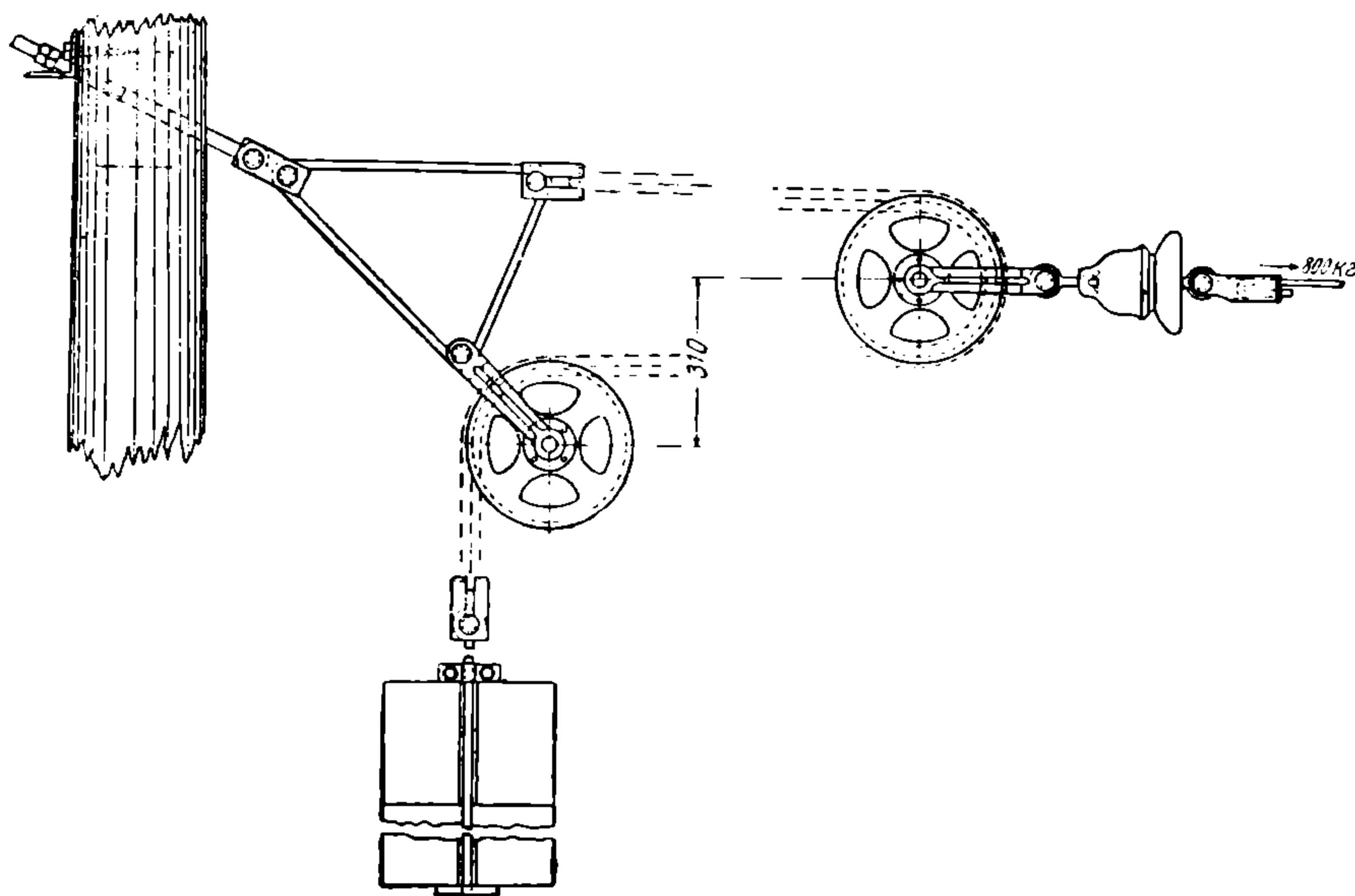


Рис. 118. Крепление контактного провода на анкерной опоре через блоки посредством грузового компенсатора.

считают наиболее пригодной для дорог с местным сообщением, а для магистральных железных дорог признают лучшей систему компаунд.

При полукompенсированной системе с ручной регулировкой расстояние между струнами 4,5—6 м, а длина пролета 45—60 м.

В СССР эта система применена на Сурамском перевале на участке Тоннель—Зестафони, где, в силу большого количества кривых малого радиуса, с одной стороны, и более мягкого климата с небольшой разностью в колебании температуры воздуха,—с другой, оказалась более целесообразной.

Ручная сезонная регулировка натяжения контактного провода осуществляется посредством муфты.

На горных дорогах с большим количеством кривых малого радиуса, но не менее 200 м, все же следует считать наиболее прием-

лемой цепную косую подвеску, несмотря на ее сложность в устройстве.

Как указывалось ранее, при цепной косой подвеске на участках с кривыми малого радиуса можно допустить большой пролет и кроме того в отношении натяжения контактного провода цепная косая подвеска в этих условиях имеет преимущество по сравнению с другими системами.

Сопряжение двух смежных анкерных участков контактной сети на перегоне (рис. 119) нормально производится на протяжении двух анкерных пролетов с постоянным электрическим соединением между проводами обоих пролетов.

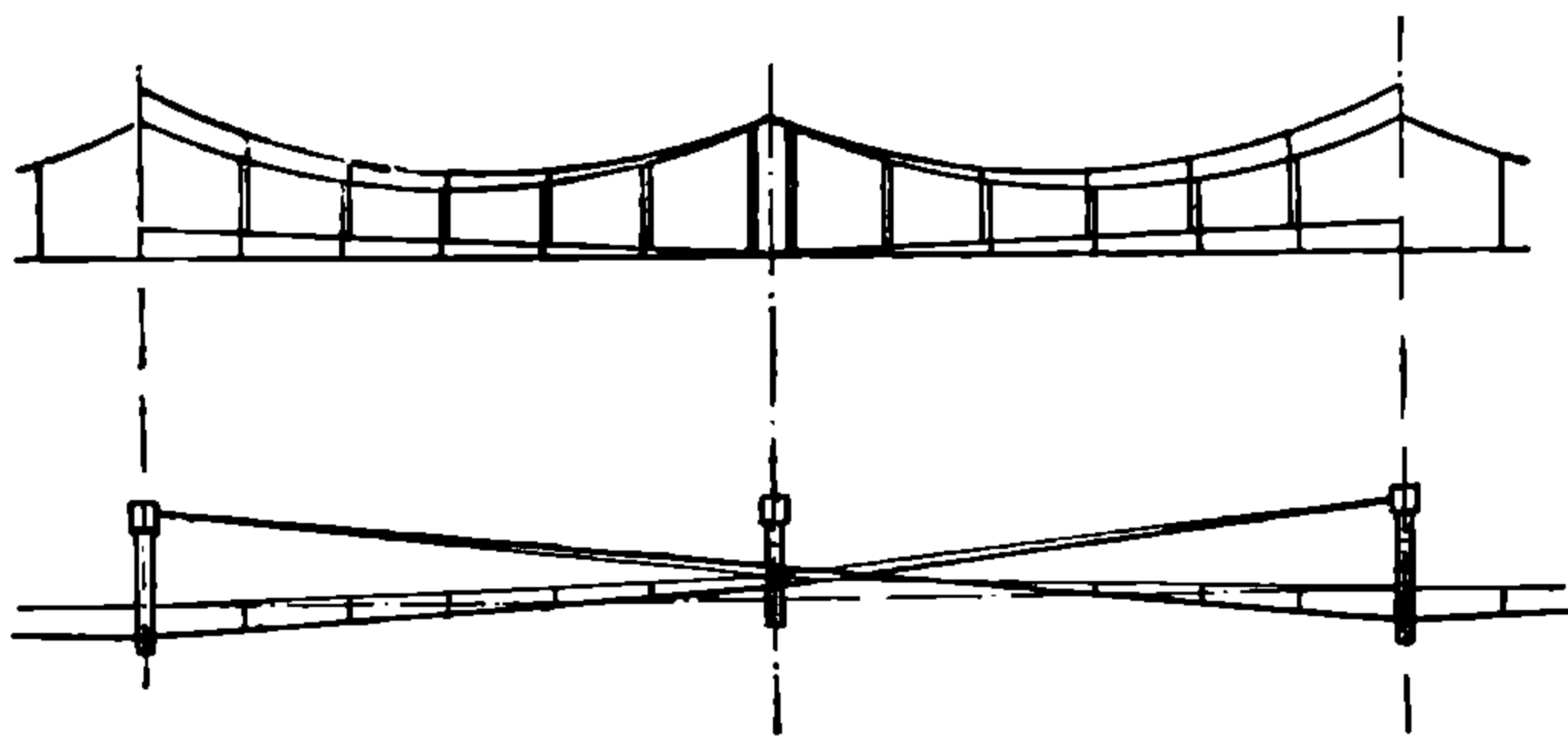


Рис. 119. Схема нормальной перегонной анкеровки цепной подвески.

Крайние опоры называются анкерными, а средняя — переходной (междуанкерной). Соединение контактных проводов у переходной опоры может быть осуществлено посредством их простого перекрещивания.

При сопряжении перегонной цепной подвески со стационарной подвеской устраивается воздушный промежуток, который является электрическим разделом между стационарной и перегонной подвесками.

В том случае, когда анкерные участки являются изолированными не только в механическом, но и в электрическом отношении, что в эксплуатационном отношении на случай быстрой локализации повреждения контактной сети имеет преимущество, сопряжение двух смежных анкерных участков производится при двух переходных опорах с устройством воздушного промежутка между проводами.

На рис. 120 приводится сопряжение двух смежных анкерных участков на двух переходных опорах с устройством воздушного промежутка между проводами.

Изоляция проводов одного и другого анкерных участков достигается тем, что несущие тросы и контактные провода в пролете между переходными опорами располагаются на расстоянии не менее 0,40 м одни от других.

Благодаря двум переходным опорам пантограф переходит с одного участка на другой в середине пролета между переходными опорами и этот переход совершается плавно, без толчковых ударов в контактной сети, почему этот способ сопряжения анкерных

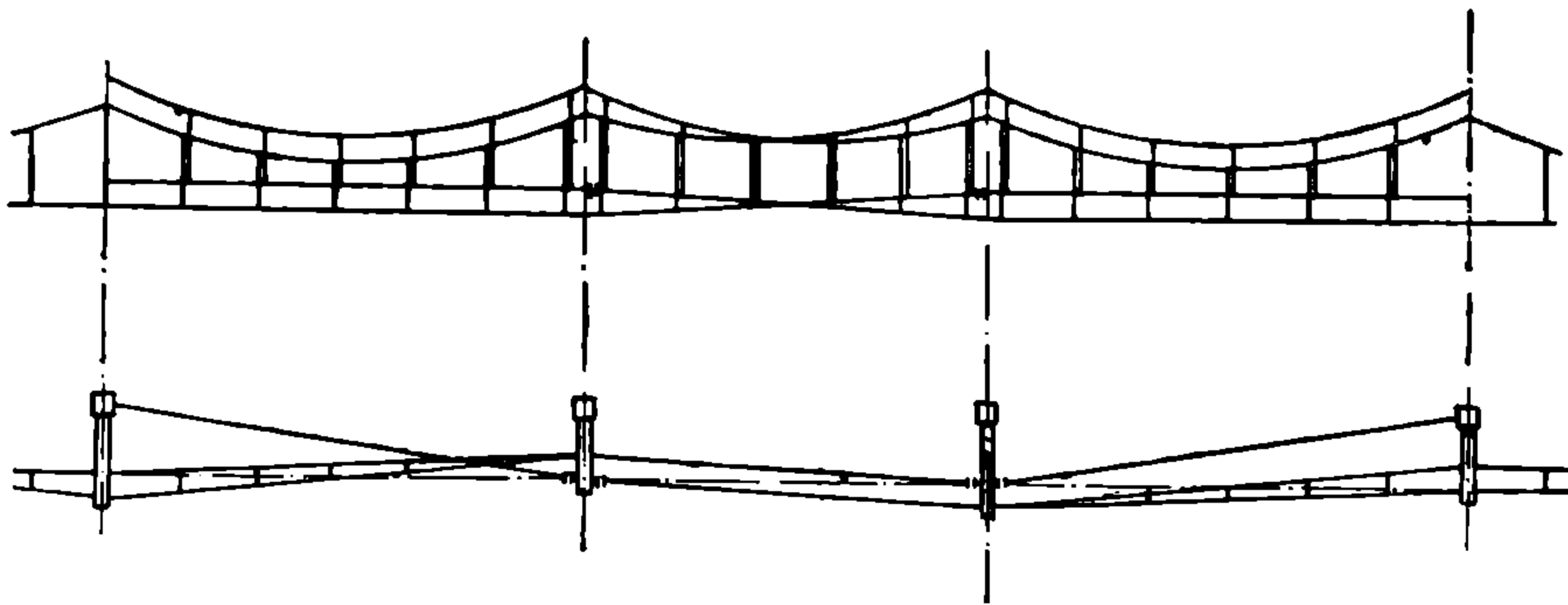


Рис. 120. Схема трехпролетной анкеровки с воздушным промежутком.

участков имеет преимущество по сравнению с приведенным ранее, но в части строительной стоимости дороже, вследствие большей потерянной длины контактного провода и несущего троса.

§ 35. Опорные конструкции и провода контактной сети

Опоры контактной сети бывают различных типов и их подразделение может быть приведено не только в зависимости от рода материала, из которого сделаны опоры, но и от их назначения.

На электрических жел. дор. магистрального значения опоры могут быть бетонные, железобетонные, металлические и деревянные.

Бетонные опоры из литого бетона, примененные на одной из американских жел. дор., и железобетонные, примененные на германских железных дорогах, не получили распространения и в настоящее время не применяются.

Наиболее распространенными опорами являются металлические и деревянные, которые применяются и в качестве промежуточных на перегоне, и в качестве переходных (междуанкерных) и анкерных, а также в случае устройства подвески контактных проводов на гибкой поперечине, что имеет место на станционных путях.

В СССР металлические опоры применены на Сурамском перевале (участок Сталиниси—Зестафони), на Северной ж. д. (на пригородном участке).

На Луньевской линии Пермской жел. дороги, а также на пригородных участках Казанской, Курской и других жел. дор. применены деревянные опоры, которые для электрифицируемых жел. дор. СССР приняты, как нормальные. На станционных путях в том случае, когда на гибкой поперечине подвешиваются контактные провода

над большим количеством путей, могут быть применены металлические опоры.

Для деревянных опор желательно применение хвойных пород леса—сосна, лиственница или же из лиственных—дуб, но допускается применение и других пород леса. Как правило, деревянные опоры, в целях защиты от быстрого загнивания, должны быть пропитаны антисептиком, но таким, который не снижал бы изоляционных свойств древесины.

Деревянные опоры в зависимости от необходимой механической прочности могут осуществляться или в виде одного столба, или двух сдвоенных, или А-образных, называемых соответственно: одиночная, сдвоенная, А-образная.

В зависимости от условий работы деревянные опоры устраиваются с металлическими оттяжками (одной или несколькими) или без оттяжки.

На рис. 121 приведена анкеровка проводов с устройством воздушного промежутка при деревянной опоре с металлическими оттяжками, примененная в СССР на Пермской жел. дор. на участке Кизел—Чусовая.

При сдвоенной деревянной опоре расположение столбов в плане в зависимости от характера нагрузки может быть или параллельно оси пути, как приведено на рис. 122, или перпендикулярно к оси, как указано на рис. 123.

Конструкция деревянной промежуточной опоры, примененная в СССР на электрифицируемой Южной жел. дор. (участок Дебальцево—Зверево), показана на рис. 124.

Высота опоры зависит от конструкции консоли, типа подвески и габаритных размеров возвышения контактного провода над уровнем головки рельса.

В СССР согласно Техническим условиям проектирования и устройства контактного оборудования электрических железных дорог, установлены следующие размеры возвышения контактного провода от головки рельса.

Высота контактного провода над уровнем головки рельса при наиболее неблагоприятных условиях температуры и нагрузки не должна быть меньше 5750 мм.

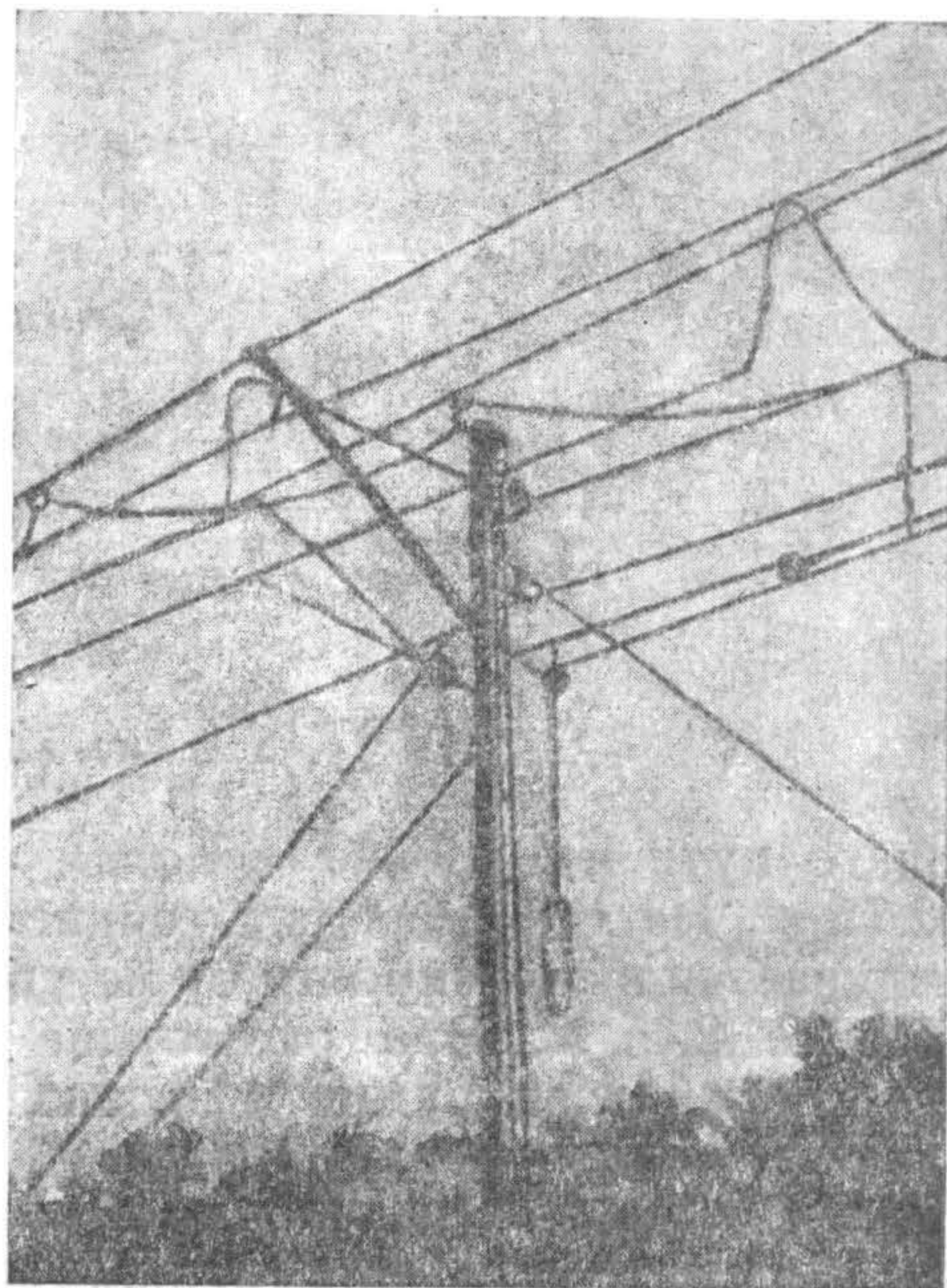


Рис. 121. Деревянная анкерная опора с металлическими оттяжками.

Наименьшая высота контактного провода на переездах, как общее правило, принимается 6 000 мм, причем во всех случаях на переездах ставятся габаритные ворота с высотой от головки рельса в свету на 500 мм ниже наинизшего (возможного) в этом месте положения провода.

Под капитальными сооружениями: путепроводами, мостами и в тоннелях высота контактного провода над головкой рельса при самых неблагоприятных условиях не должна быть меньше

5 500 мм. В особых случаях с разрешения НКПС эта высота может быть уменьшена.

Расположение опоры в плане относительно оси пути зависит от габарита подвижного состава.

В СССР установлен следующий габарит опор:

На прямых участках пути на перегонах расстояние от передней грани опоры до оси ближай-

шего пути на уровне головки рельса должно быть не меньше 2,75 м. На станциях расстояние опор от оси пути в свету устанавливается в зависимости от местных условий и во всяком случае не ближе 2,45 м. Это расстояние в случае установки опор на станционном междупутьи в исключительных случаях по разрешению НКПС может быть уменьшено до 2,2 м. На кривых эти расстояния увеличиваются соответственно выносу подвижного состава.

На перегонах, приведенное расстояние 2,75 м на кривых участках пути, в зависимости от радиуса кривой и расположения опоры, увеличивается на величину, приводимую ниже в таблице 26.

Таблица 26

Радиус кривой	При установке опор	
	с внутренней стороны кривой	с внешней стороны кривой
От 3 000 м и выше .	50 мм	15 мм
„ 2 000 „ до 3 000 м	75 „	20 „
„ 1 200 „ 2 000 м .	120 „	30 „
„ 1 000 „ 1 200 м	140 „	40 „
„ 800 „ 1 000 м	170 „	45 „
„ 700 „ 800 м	200 „	55 „
„ 600 „ 700 м	230 „	60 „
„ 500 „ 600 м	280 „	75 „
„ 400 „ 500 м	340 „	90 „
„ 300 „ 400 м	450 „	125 „
„ 200 „ 300 м	520 „	180 „

В продольном направлении пути расстояние между деревянными промежуточными опорами устанавливается расчетом из условия допустимых отклонений контактных проводов от действия ветра. На кривых участках пути, вследствие естественного большего отклонения контактного провода от оси пути, пролеты уменьшаются.

Металлические опоры устраиваются различных систем. В СССР преимущественное распространение имеют решетчатые.

На рис. 125 приведена конструкция железной решетчатой опоры, принятой на станциях с большим количеством путей на электрифицируемом участке Дебальцево — Зверово Южной железной дор.

Консоли, служащие для подвески проводов у опор и расположения их над путями, применяются различных типов, в зависимости от типа и месторасположения опоры в плане, способа прикрепления к ней консоли, рода материалов. Консоли могут применяться как железные, так и деревянные и железобетонные.

Преимущественное же распространение при деревянных опорах и исключительное при металлических—получили железные консоли.

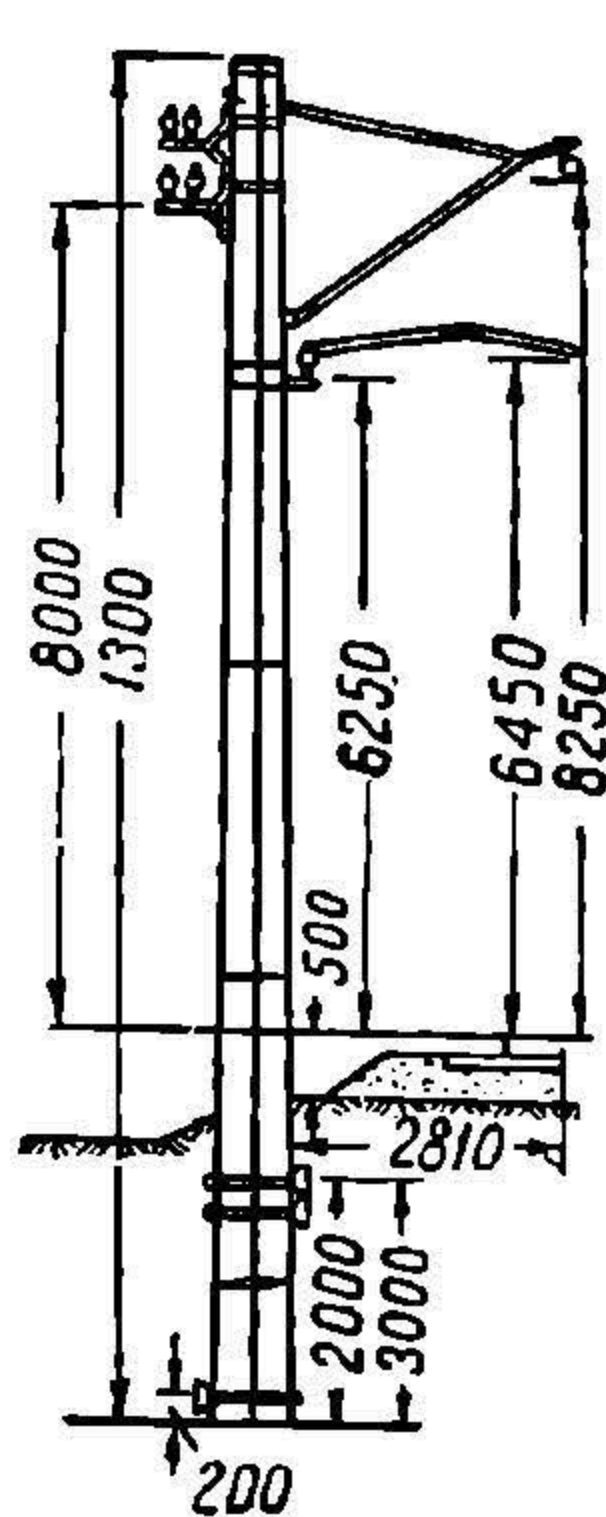


Рис. 124. Конструкция деревянной опоры.

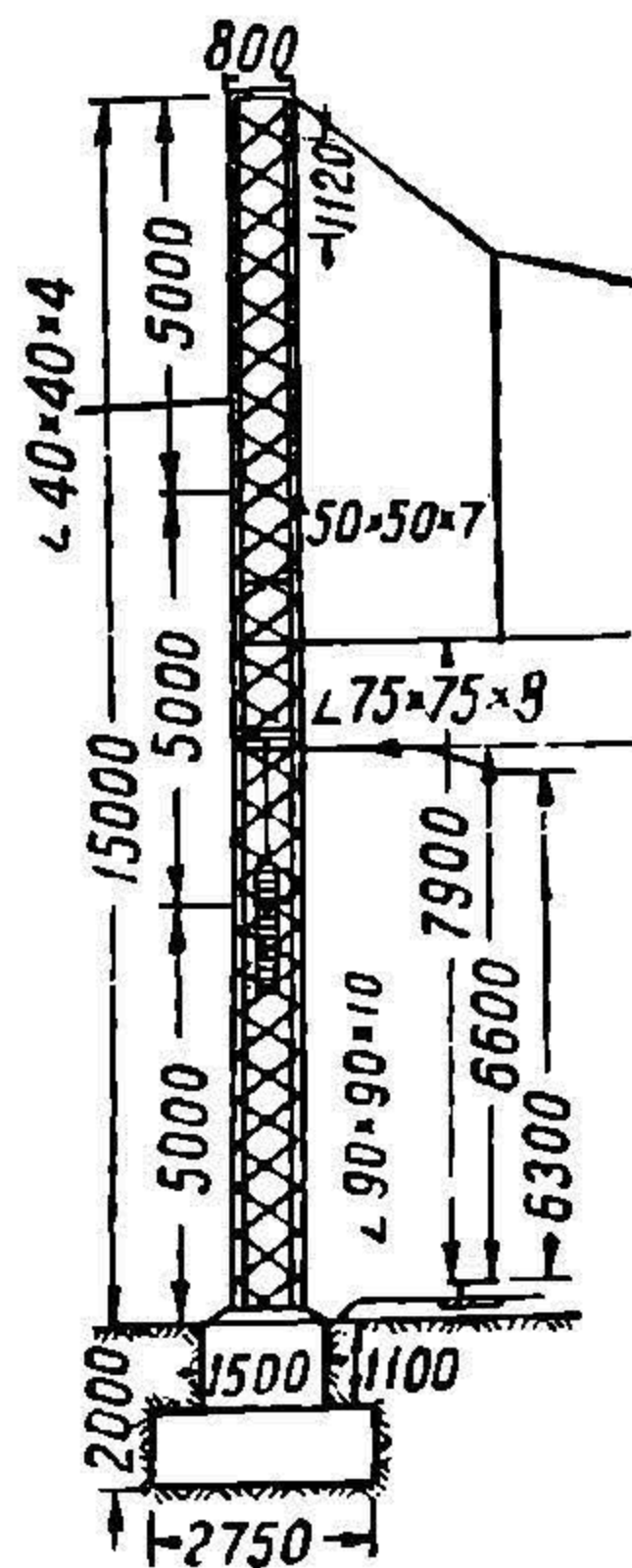


Рис. 125. Конструкция железной опоры.

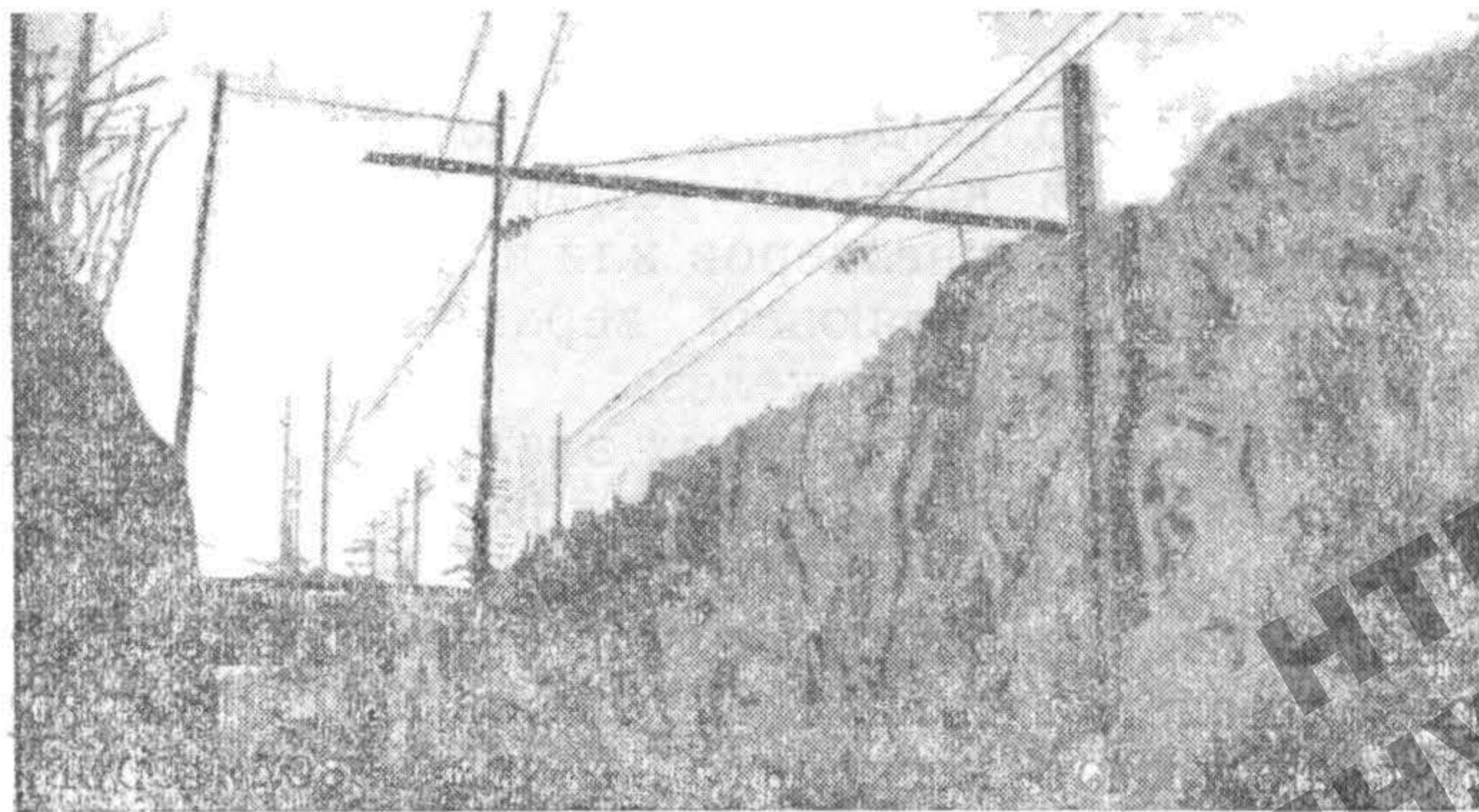


Рис. 126. Двухпутная консоль на Пенсильванской ж. д.

Консоли могут применяться как для поддержания проводов над одним путем, так и над двумя путями.

На рис. 126 приведена двухпутная консоль, примененная на Пенсильванской железной дороге в Америке.

Следует отметить, что двухпутные консоли такого типа не нашли широкого распространения. На двухпутных линиях большое применение имеют или устройство опор посередине с однопутными консолями, что встречается на американских жел. дор., или расположение опор по краям и устройство гибкой поперечины или однопутных консолей. Однопутные железные консоли могут быть расположены или горизонтально с подкосом или наклонно подняты кверху, с тягой. На рис. 127 приведено горизонтальное расположение консоли с подкосом на металлической опоре, примененной в СССР на Сурамском перевале на участке Сталини-Зестафони.

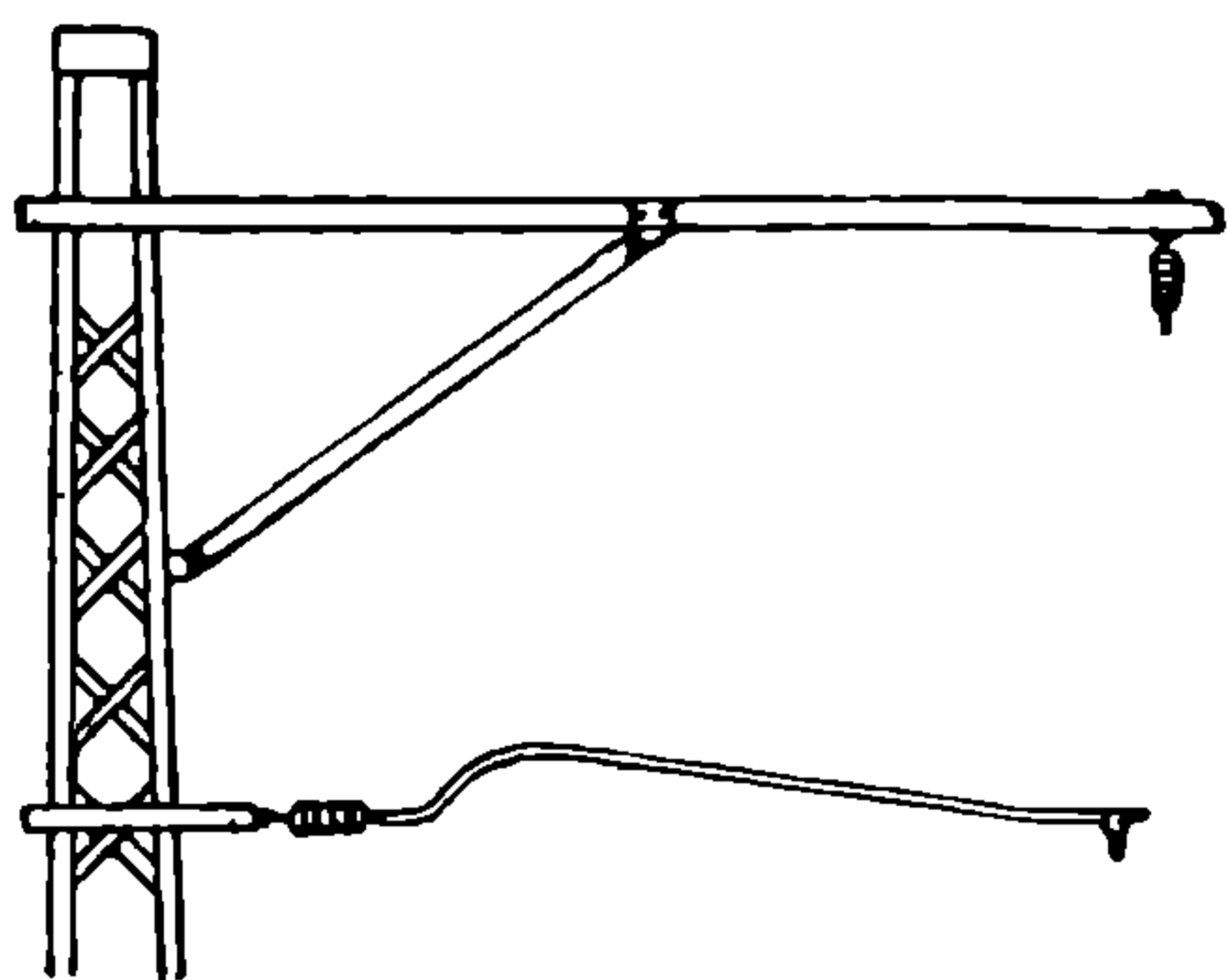


Рис. 127. Однопутная металлическая заделанная консоль с горизонтальным кронштейном и с подкосом.

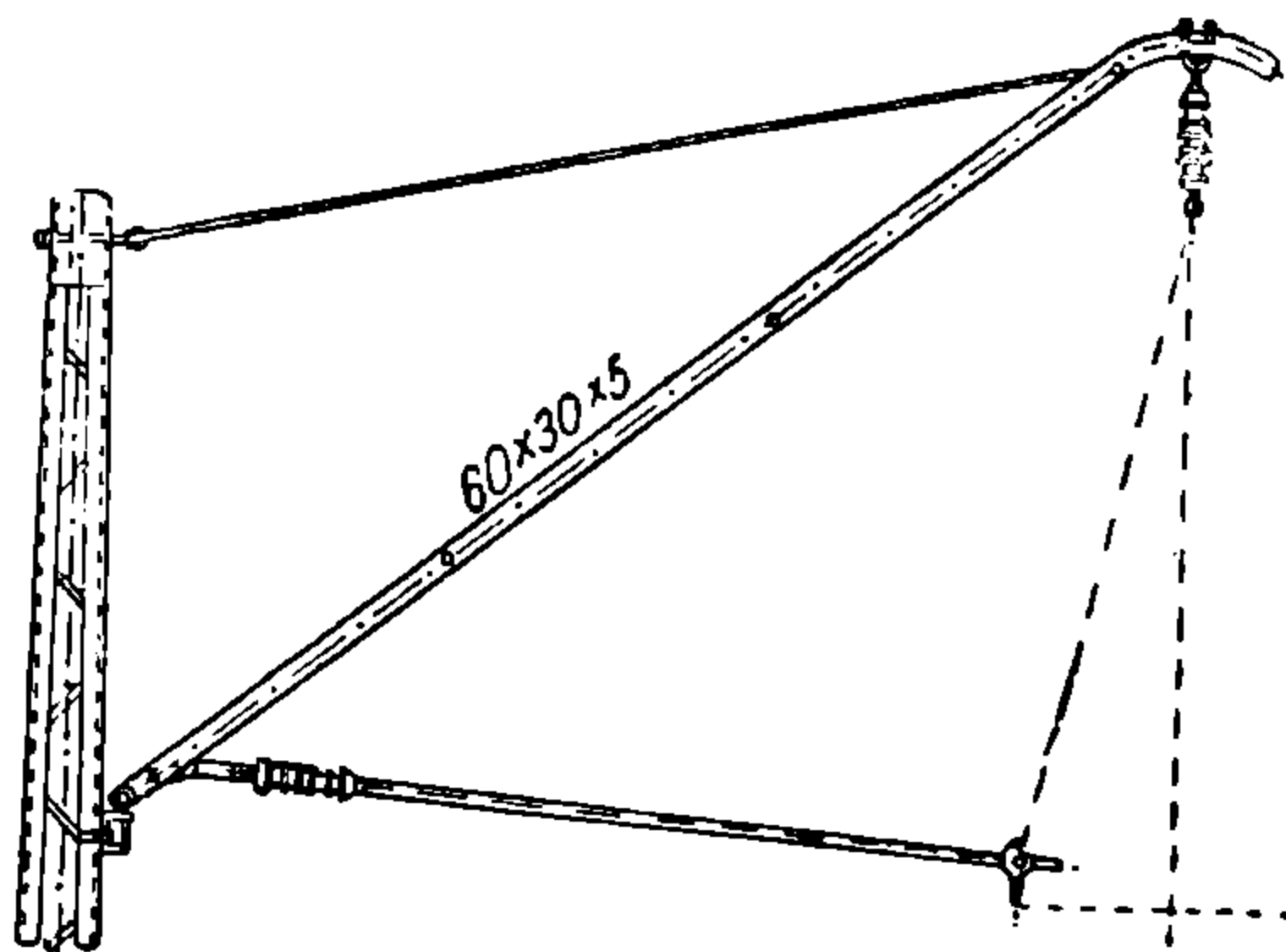


Рис. 128. Однопутная металлическая полузаделанная консоль с наклонным кронштейном и с тягой.

Приведенная горизонтальная консоль жестко заделана на опоре. Кроме жесткой заделки применяются полузаделанные и поворотные железные консоли. На рис. 128 приводится тип наклонной железной консоли с тягой (полузаделанная), а на рис. 129 — поворотная.

Кронштейн железной консоли устраивается преимущественно склепанным или из двух швеллеров или из двух уголков с зазором между ними. Тяга, соединяющая верхний конец кронштейна с опорой, обычно из круглого железа.

Одним из наиболее ответственных элементов конструкции подвески на опоре является изолятор, при помощи которого подвешивается несущий трос.

Изоляторы бывают фарфоровые или стеатитовые. Преимущественное распространение имеют фарфоровые. В конструктивном отношении существуют несколько типов изоляторов, из них наибольшее применение имеют штыревой изолятор и изоляторы палочные подвесные. Штыревые изоляторы преимущественно

применяются для подвески усиливающих фидеров и для крепления к опоре фиксаторов.

Палочные изоляторы имеют широкое применение для подвески несущего троса на германских железных дорогах.

В СССР этот тип изолятора применен на Северной жел. дор. и на Сураме.

Следует отметить, что штыревые изоляторы для несущего троса находят применение при металлических опорах, при деревянных опорах более целесообразно применять подвесной изолятор, так как от его подвижности улучшаются условия работы несущего троса. Исключительное применение подвесные изоляторы имеют при креплении несущего троса к гибкой поперечине на станционных путях.

На станциях и раз'ездах, так как число путей на них не менее 3, подвеска несущего троса производится к гибкой поперечине, соединяющей две опоры, расположенные по краям. Опоры могут быть деревянные или металлические. Последние применяются при большом количестве станционных путей.

Применяемая на станционных и раз'ездных путях гибкая поперечная подвеска состоит из следующих частей:

а) поперечно-несущий трос, на который передается вся вертикальная нагрузка от веса цепной подвески;

б) верхний фиксирующий трос, к которому крепятся точки подвеса цепной подвески к поперечно-несущему тросу, служащий для устранения раскачивания подвески от действия ветра;

в) нижний фиксирующий трос, служащий для фиксации контактного провода;

г) струны, при помощи которых соединяются отдельные тросы гибкой поперечной подвески;

д) фиксаторы, посредством которых контактные провода крепятся к нижнему фиксирующему тросу.

Существуют несколько типов гибкой поперечной подвески, которые в основном отличаются друг от друга наличием или отсутствием изоляции от опор некоторых из тросов, а также применением жестких элементов.

Наиболее распространенной конструкцией гибкой поперечной подвески как на европейских, так и американских жел. дор. и принятой в СССР (как нормальной), является конструкция с неизолированным поперечно-несущим и верхне-фиксирующим тросами с изолированным нижним фиксирующим тросом. Разделение путей

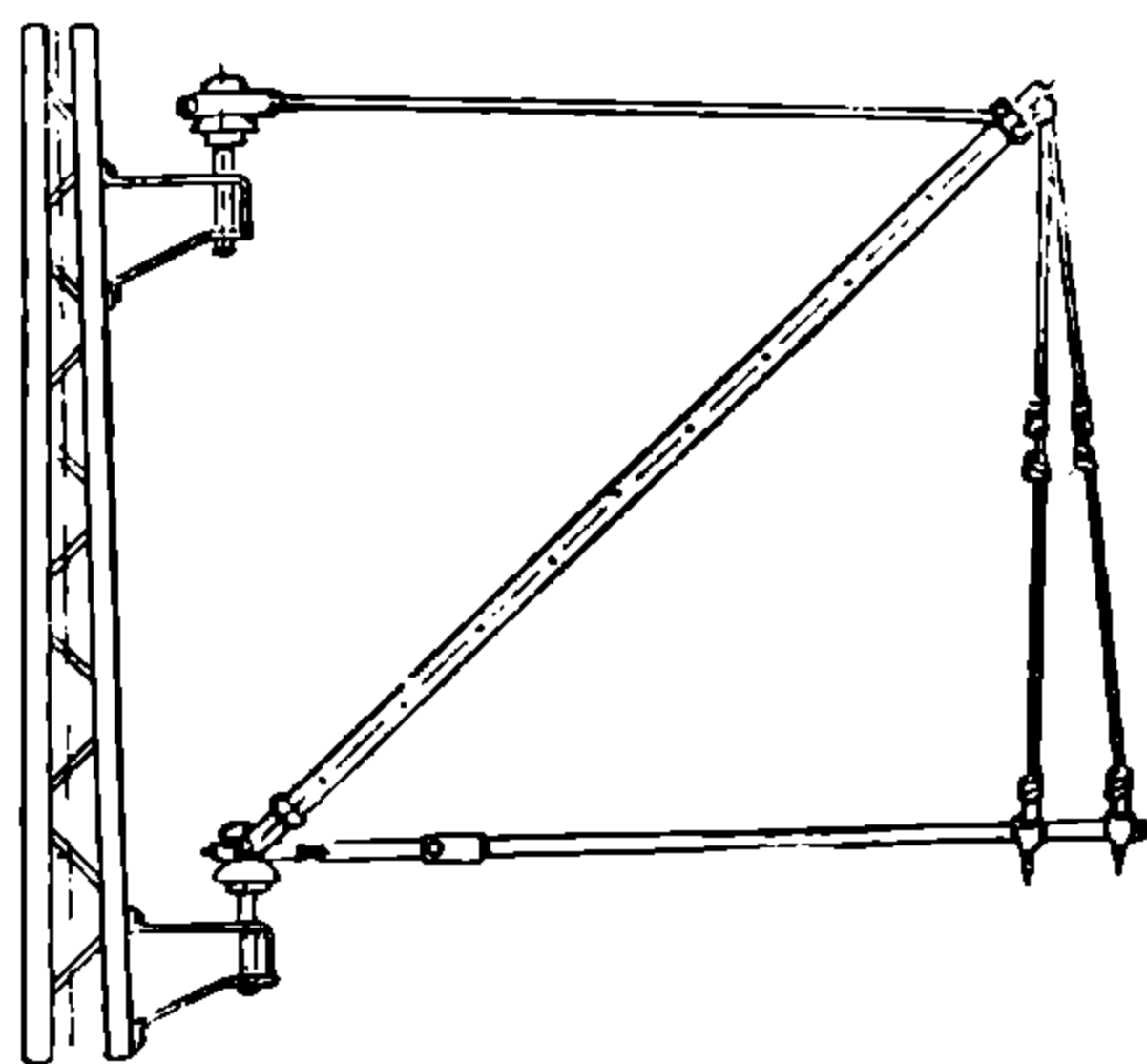


Рис. 129. Однопутная металлическая поворотная консоль с наклонным кронштейном и с тягой.

на группы, что важно для эксплуатации при секционировании контактной сети, осуществляется при помощи изоляторов, включаемых в нижний фиксирующий трос. На рис. 130 приведена эта конструкция гибкой поперечной подвески.

Следует отметить, что нижний фиксирующий трос в тех случаях, когда по условиям ветровых отклонений фиксация контактных проводов не является необходимой, не применяется.

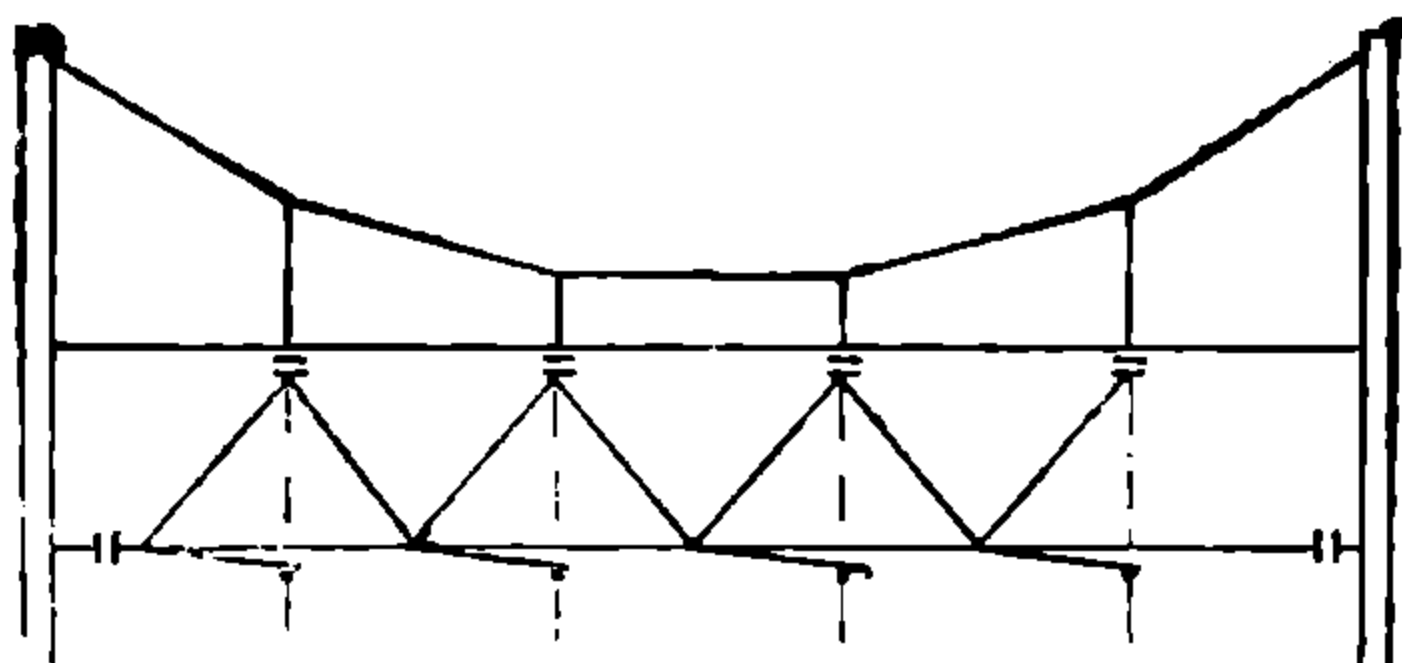


Рис. 130. Схема конструкции гибкой поперечной подвески на станционных путях, принятая как нормальная на электрифицированных ж. д. СССР.

В качестве проводов контактной сети могут служить медные, бронзовые, биметаллические, стальные и алюминиевые. Контактные провода имеют сплошное сечение, все остальные применяются витыми в виде тросов.

Контактные провода изготавливаются специального профиля из твердотянутой электролитической меди.

При компаундной цепной подвеске без автоматической компенсации применяется бронзовый контактный провод, который как материал представляет сплав электролитической меди с кадмием или другими металлами. Сечение контактных проводов бывает от 60 до 120 мм².

В СССР для всех электрифицируемых жел. дор. установлены два стандартных сечения контактного провода из твердотянутой электролитической меди—80 мм² и 100 мм², профиля которых приведены на рис. 131.

Следует заметить, что размеры и формы вырезов профиля сделаны одинаковыми как в том, так и в другом, что позволяет унифицировать тип зажимов для подвески проводов. Эти провода имеют следующие основные характеристики:

Удельный вес	8,9 · 10 ⁻³ кг/см ³
Коэффициент линейного расширения .	17 · 10 ⁻⁶
Модуль упругости	13 000 кг/мм ²
Удельное сопротивление при +15° С	17,5 Ом/мм ²
Временное сопротивление разрыву	35—36 кг/мм ²
Удлинение при разрыве .	2,75—3%
Допускаемое напряжение	12 кг/мм ²

Для контактных проводов, располагаемых на станционных путях, могут иметь применение биметаллические провода.

В качестве несущего троса применяются как стальной, так и бронзовый трос. При тяжелой компаундной подвеске в Америке применяется биметаллический несущий трос. Недостатком стального троса является подверженность его ржавлению, вследствие чего он применяется обычно оцинкованным. Бронзовый трос в этом отношении является устойчивым. При применении в качестве

несущего бронзового троса его сечение при электрическом расчете контактной сети учитывается как рабочее, что дает возможность уменьшить сечение усиливающих фидеров.

В настоящее время у нас применяется в качестве несущего исключительно стальной оцинкованный трос. Сечения стальных тросов 35, 50, 70, 95 и 120 мм², наиболее часто применяемы 50, 70 и 95 мм². Стальной оцинкованный трос имеет следующие основные характеристики.

Удельный вес $7,95 \cdot 10^{-3}$ кг/см³-

Коэффициент линейного расширения $12,6 \cdot 10^{-6}$

Модуль упругости 20 000 —
21 000 кг/мм²

Проводимость при 15°C 6,25—5,70.

В отношении сопротивления стального несущего троса разрыву, различают несколько степеней прочности.

Ниже в таблице 27 приводятся нормы на стальные тросы различных степеней прочности

Таблица 27

Норм. диам. в мм	Чис- ло жил	Диам. жилы в мм	Сече- ние в мм ²	Вес 1 п. м. в кг	Разрывающее усилие T_{max} в кг		
					Обыкновенная прочн. σ_{max} 50—60 кг/мм ² $\epsilon=10-15\%$	Повышенная прочность σ_{max} 95—118 кг/мм ² $\epsilon=5-7,5\%$	Высшая проч- ность $\sigma_{max}=$ 150—175 кг/мм ² $\epsilon=4-5,5\%$
7,6	7	2,52	35	0,274	1 800	3 450	5 350
9,1	7	3,02	50	0,394	2 400	4 500	7 200
10,7	7	3,57	70	0,550	3 150	6 000	11 050
10,9	19	2,17	70	0,552	3 150	6 000	11 050
12,6	19	2,52	95	0,774	4 900	9 400	14 550
41,2	19	2,84	120	0,945	5 950	11 350	17 800

Примечание: T_{max} —разрывающее усилие в кг при испытании в целом виде, σ_{max} —временное сопротивление разрыву отдельной проволоки, ϵ —удлинение в процентах при длине образца в 300 мм.

В качестве усиливающих проводов-фидеров применяются преимущественно алюминиевые тросы. Алюминиевые тросы имеют малую механическую прочность, вследствие чего они не могут быть применены в качестве несущих тросов.

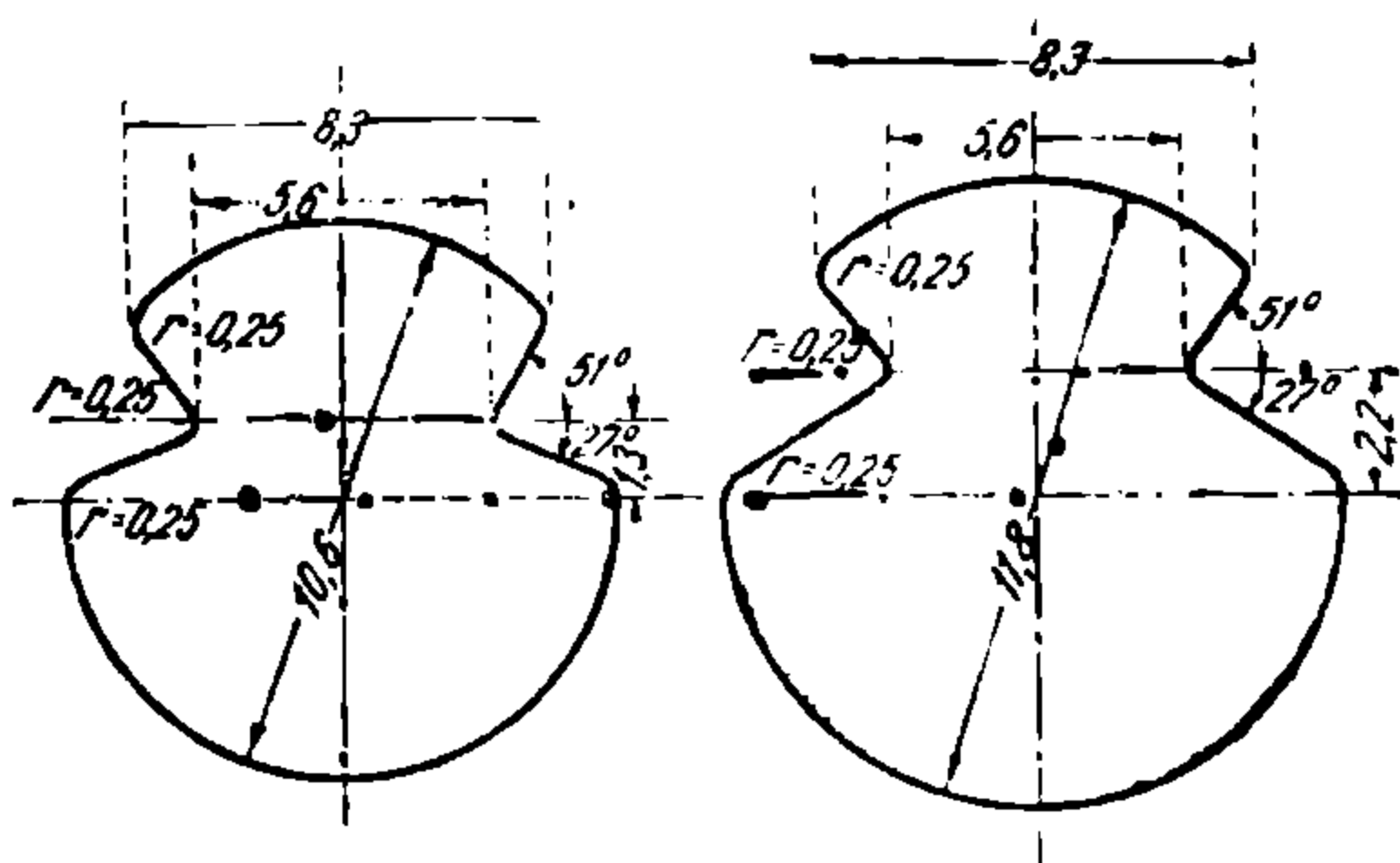


Рис. 131. Сечения медных контактных проводов, принятые на электрифицированных жел. дор. СССР.

Применяемые сечения алюминиевых тросов приведены в § 3.

Наиболее часто применяемые сечения алюминиевых тросов следующие: А—50, А—70, А—95, А—120, А—150, А—185 мм².

Основные характеристики алюминиевых проводов:

Удельный вес	2,75.10 ⁻³ кг/см ³
Коэффициент линейного расширения.	23.10 ⁻⁶
Модуль упругости.	5 400 кг/мм ²
Временное сопротивление разрыву	18—16 кг/мм ²
Допускаемое напряжение	7 кг/мм ²
Удельное сопротивление.	28,9 Ω км/мм ²

Как видно из приведенных данных, сопротивление алюминиевых проводов в 1 65 раза больше, чем медных.

§ 36. Рельсы, как обратный провод

Ходовые рельсы на электрических железных дорогах обычно являются в то же время и в качестве обратных проводов в общей замкнутой цепи прохождения тока.

Следует отметить, что направление тока в рельсах может быть и иное, т. е. обратным проводом будет контактная сеть, так как рельсы могут быть присоединены как к отрицательной, так и к положительной шине подстанции. В данном изложении, независимо от способа присоединения рельсов к шинам подстанции, рельсы названы обратным проводом условно.

На электрических железных дорогах к ходовым рельсам предъявляется ряд требований, обеспечивающих условия надежной и хорошей их проводимости тока и изоляции их от земли.

Если вдоль линии жел. дор. в земле имеются металлические сооружения, то в целях защиты от электролиза (о чем говорится далее в § 38), вредно действующего на металлические сооружения в земле, ходовые рельсы электрических жел. дорог постоянного тока должны быть возможно лучше изолированы от земли.

Баласт и шпалы являются в данном случае элементами изоляции рельсов от земли, представляющие собой сопротивление прохождению тока из рельсов в землю, т. е. обладают определенным переходным сопротивлением, величина которого, характеризующая степень изоляции рельс от земли, зависит от шпал и от состояния и рода баласта: при щебеночном баласте величина переходного сопротивления больше, чем при песчаном, и поэтому применение его очень желательно, а если вдоль линии электрической жел. дороги находятся в земле металлические сооружения, то применение щебеночного баласта следует признать необходимым.

Однако отсюда не следует делать вывода, что на электрических железных дорогах во всех случаях всегда должен быть только щебеночный баласт.

Если в земле вдоль линии железной дороги нет ответственных металлических сооружений (нефтепровод, керосинопровод, водо-

проводные трубы, кабели), то возможно применение и песчаного баласта хорошего качества.

Шпалы на электрических жел. дор. являются изолятором рельсов от земли, а потому пропитка их должна производиться таким составом, который не ухудшал бы изоляционных свойств.

Пропитка шпал смолой или креозотом с каменноугольным дегтем (25% креозота и 75% каменноугольного дегтя) в этом отношении является наилучшей. Могут применяться и применяются другие виды антисептиков, не понижающие изоляционных свойств, но ни в коем случае не допускается пропитка шпал хлористым цинком.

Таким образом рельсы электрических железных дорог должны представлять и хороший обратный проводник в общей электрической цепи контактной сети и в тоже время должны быть хорошо изолированы от земли. На проводимость рельсов, как обратного-провода, влияет состояние стыков, которые представляют значительное сопротивление прохождению тока. Стыковые накладки не обеспечивают хорошей проводимости, поэтому рельсовый стык без дополнительного оборудования, увеличивающего проводимость, имеет иногда сопротивление, которое по величине эквивалентно сопротивлению рельса длиной 25 м. Эту величину сопротивления стыка следует считать выше обычно среднего. Для уменьшения сопротивления всей рельсовой цепи необходимо на стыках соединить рельсы проводником. Существуют различные конструкции стыковых соединений, отличающиеся между собой как родом материала проводника, соединяющего на стыке рельсы, так и способом прикрепления его к рельсу. Лучшим проводником в отношении проводимости является медный провод, который и имеет широкое применение.

Конструкция стыкового соединения должна обладать следующими свойствами:

- а) высокой электрической проводимостью стыков,
- б) достаточной прочностью от действия проходящих по путям поездов,
- в) простотой устройства, позволяющей легко обнаружить неисправности при осмотре.

Наибольшее распространение получила конструкция стыкового соединения из медного гибкого троса, сечением 95 мм², концы которого заделаны в муфты, привариваемые к головке рельса.

Эта конструкция стыкового соединения применяется на электрифицируемых дорогах СССР. В качестве гибкого провода, вместо медного, может быть применен биметаллический, который приводится на рис. 132.

Несмотря на устраиваемые стыковые соединения, электрическое сопротивление стыка больше, чем непосредственно рельса и эквивалентно сопротивлению 1,5—2,5 метрам рельса. Следовательно, при меньшем числе стыков, что имеет место при длинных рельсах, или при сварке рельсов, сопротивление рельсовой цепи уменьшается.

Сопротивление непосредственно рельса зависит от сечения рельса и от химического состава рельсовой стали. Удельное сопротивление рельсовой стали можно принять равным $\rho_p = 0,195 \text{ ом/м/мм}^2$. При площади сечения рельса $S \text{ см}^2$, сопротивление 1 км рельса будет равно

$$R_p = \frac{0,195 \cdot 1000}{100S}$$

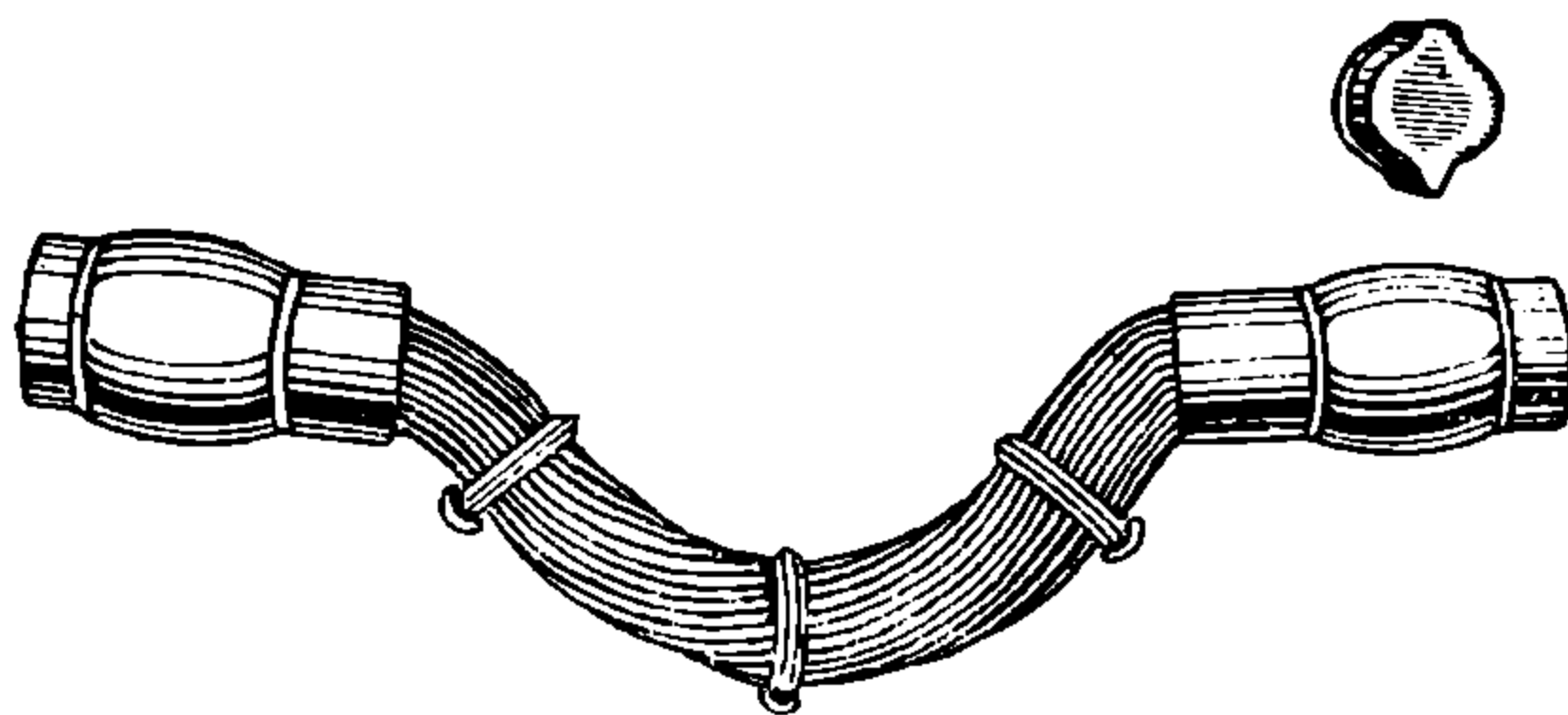


Рис. 132. Биметаллический трос для стыковых соединений.

Вес погонного метра рельса при удельном весе рельсовой стали 7,83 равен

$$G = \frac{S \cdot 100 \cdot 7,83}{1000} \text{ кг/м пог.}$$

Площадь сечения, выраженная через вес рельса, будет равна

$$S = \frac{1000 \cdot G}{783}$$

и сопротивление 1 км рельса равно

$$R_p = \frac{1,53}{G} \text{ ом/км.}$$

Сопротивление стыка в среднем можно принять равным 2 пог. м рельса, что при n числе стыков на 1 км дает дополнительное сопротивление рельсовой нитки, равное.

$$R_p = \frac{1,53}{G} \cdot \frac{n \cdot 2}{1000} \text{ ом/км.}$$

Принимая дополнительное сопротивление от стыков равным 20%, формула для определения сопротивления 1 км рельсовой нитки примет вид

$$R_p = \frac{1,53}{G} \left(1 + \frac{n \cdot 2}{1000} \right) = \frac{1,53}{G} \cdot 1,20 = \frac{1,84}{G} \text{ ом/км.}$$

Для двух рельсов однопутной линии сопротивление 1 км будет равно

$$R = \frac{1,84}{G \cdot 2} = \frac{0,92}{G} \Omega/\text{км}.$$

При рельсах типа Ia, IIa, IIIa и IVa, находящихся на наших жел. дорогах, величина сопротивления рельсовой цепи одиночного пути на 1 км равна:

при типе	Ia	весом	43,567 кг/пог. м,	$R = 0,0210 \Omega/\text{км}$
»	IIa	»	38,416 кг/пог. м,	$R = 0,0240$
»	IIIa	»	33,480 кг/пог. м,	$R = 0,0275$
»	IVa		30,890 кг/пог. м,	$R = 0,0330$ »

В том случае, когда на дороге применена сварка некоторых стыков, то при длине сваренных рельсов $l_{св}$ сопротивление одного километра рельсовой цепи определяется из выражения

$$R = \frac{0,76}{G} \left(\frac{l_{св} + 2}{l_{св}} \right) \Omega/\text{км}.$$

На двухпутных участках, при соединении двух путей, сопротивление может быть принято в два раза меньше. Следует отметить, что в расчетах при определении сопротивления рельсового пути в Германии часто применяют следующую эмпирическую формулу

$$R = \frac{1}{G} \Omega/\text{км}.$$

Проф. А. Б. Лебедев для определения сопротивления 1 км рельсовых путей рекомендует следующую формулу:

$$R_n = \left(\frac{1,5}{G} + 1,10 \cdot 10^{-4} n \right) \frac{1}{N_p} \Omega/\text{км},$$

где N_p — число рельсовых ниток,
 n — число стыков на 1 км.

В целях обеспечения лучшей проводимости в работе двух рельсовых ниток как обратного провода, на электрических жел. дор. необорудованных автоблокировкой, устраиваются через каждые 150—200 метров соединения двух ниток металлическими проводниками, называемых междурельсовыми соединениями. В качестве междурельсового соединения применяется круглое полосовое или квадратное железо или стальной трос, которые прикрепляются к рельсу обычно при помощи сварки.

На двухпутных участках, кроме междурельсовых соединений, устраивают через 300—400 метров междупутные соединения из таких же проводов, что и междурельсовые и тем же способом прикрепления.

На электрических железных дорогах, оборудованных автоблокировкой, так как в этом случае должно быть обязательно обес-

печено изолирование одной рельсовой нитки от другой для тока автоблокировки, ни междурельсовые, ни междупутные соединения без дополнительно включенных сопротивлений, припятствующих прохождению блокировочного тока, в середине блок-участка не могут применяться. Кроме того, на дорогах с автоблокировкой для разделения перегона на отдельные блок-участки имеются изолированные рельсовые стыки, являющиеся границей и местом разрыва тока сигналов автоблокировки.

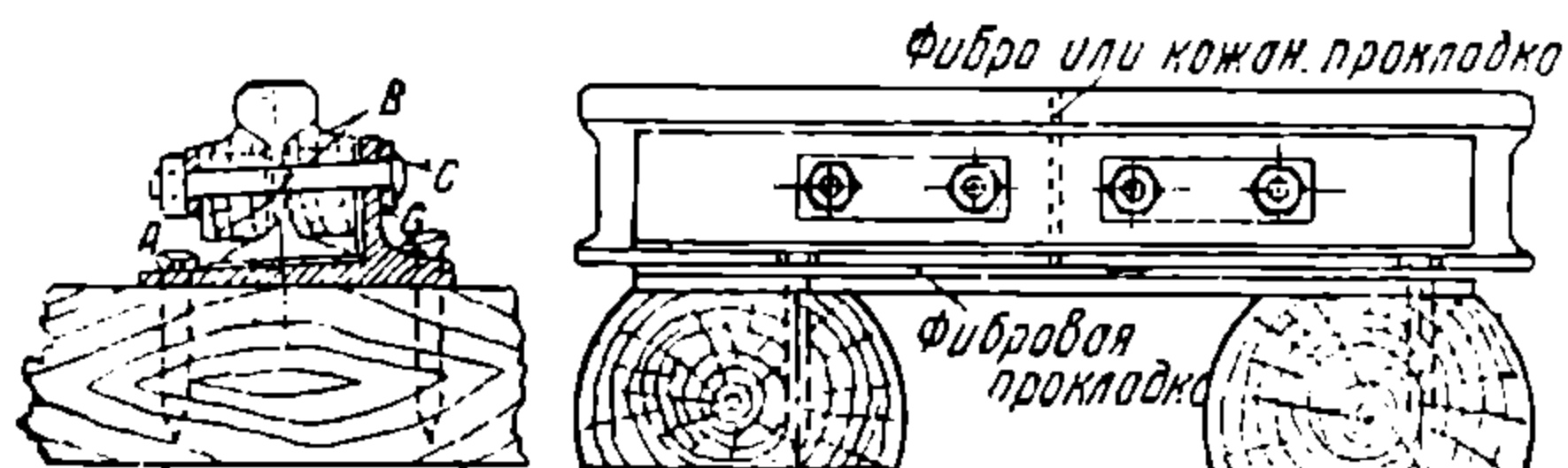


Рис. 133. Изолированный стык системы Вебера.

Изолированные стыки устраиваются посредством применения деревянных накладок и изолирующих прокладок, в качестве которой применяется фибра или дерево. Могут применяться и металлические накладки с хорошей изоляционной прокладкой. В СССР приняты два типа изолированных стыков: стык системы Вебера и деревянный стык системы Б. П. Андреянова, оба с деревянными накладками. Стык системы Вебера располагается на нормально раздвинутых шпалах. На шпалы под подошвы рельсов кладется железное уголковое основание, изоляция которого от рельса осуществляется посредством фибровой прокладки. Фасонные деревянные накладки делаются из бука. Этот тип стыка наиболее пригодный при рельсах типа IIa для магистральной жел. дор.

Деревянный стык системы Андреянова располагается на сдвинутых шпалах и без применения металлической подкладки под подошвы рельсов, ввиду чего отпадает необходимость в изолирующей фибровой прокладке. Этот тип изолированного стыка может иметь применение преимущественно на станционных путях.

Таким образом на электрических жел. дорогах с автоблокировкой в отношении изолированных стыков пред'являются два противоречивых требования: с одной стороны, чтобы стык не пропускал блокировочного тока и тем гарантировал правильное показание светофоров, с другой, — необходимо обеспечить непрерывное прохождение в рельсовой цепи тяговому току.

Следует отметить, что на электрифицируемых жел. дор. постоянного тока автоблокировка оборудуется, как правило, на переменном токе.

В рельсовой цепи, следовательно, получаются два рода тока: постоянный тяговый и переменный блокировочный.

Для того, чтобы дать возможность проходить через изолированные стыки постоянному тяговому току и воспрепятствовать прохождению токов автоблокировки применяются индуктивные стыковые соединения.

На рис. 134 приведена одна из схем индуктивных стыковых соединений, примененная на Пенсильванской жел. дор. в Америке.

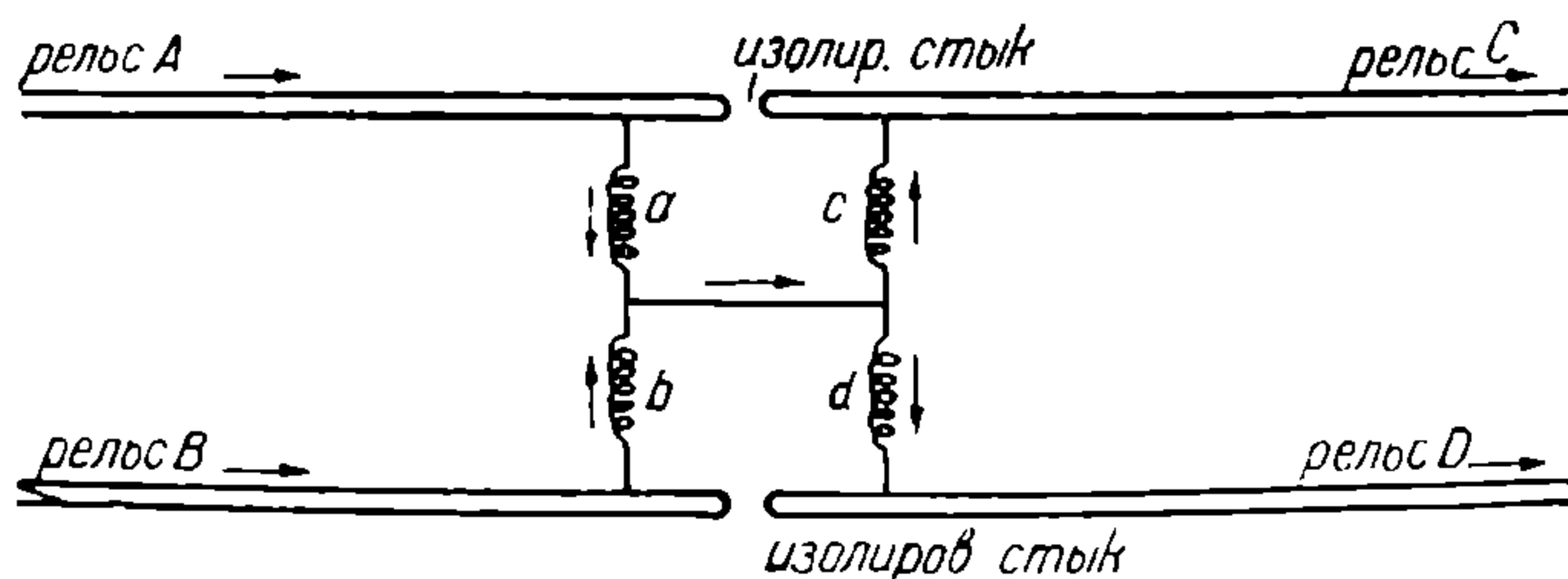


Рис. 134. Схема индуктивных стыковых соединений.

Катушки *а* и *б*, также как и катушки *в* и *г*, смонтированы на одном сердечнике и имеют большое индуктивное сопротивление, что для переменного блокировочного тока является препятствием к прохождению от одного какого-либо рельса к другому. Омическое же сопротивление катушек очень незначительно, поэтому для постоянного тягового тока создается как бы непрерывное соединение рельсов. Прохождение тягового тока по рельсам *А*, *С*, *В*, *Д* указано стрелками.

§ 37. Питание и секционирование контактной сети

Питание контактной сети от тяговых подстанций производится или подземным кабелем или при помощи воздушных питательных фидеров.

Существуют два способа: одностороннее и двухстороннее питание контактной сети.

В случае одностороннего питания каждая тяговая подстанция, будучи расположена в середине участка, питает только свой участок, как показано на рис 135а.

При двухстороннем питании, которое имеет преимущественное применение, каждая подстанция, расположенная у границ участка, питает оба смежные участки (рис. 135б).

Кроме того, в отношении двухпутных линий различают раздельное и нераздельное смешанное питание. При раздельном питании контактная сеть одного пути изолирована от другого, при нераздельном — электрически соединена.

При нераздельном питании получается меньшее падение напряжения в проводах и небольшая экономия меди, но в эксплуатационном отношении имеются недостатки, заключающиеся в том, что

в случае повреждения где-либо контактной сети нарушается движение на двух направлениях и установить быстро место повреждения затруднительно.

В целях быстрого установления места повреждения в контактной сети и ограничения влияния его лишь на коротком участке и одном направлении движения, устраивается в середине между подстанциями пост секционирования с автоматическими секционными выключателями, устанавливаемыми в так называемой контактной будке. При технико-экономической целесообразности контакторные будки устраиваются и на однопутных линиях.

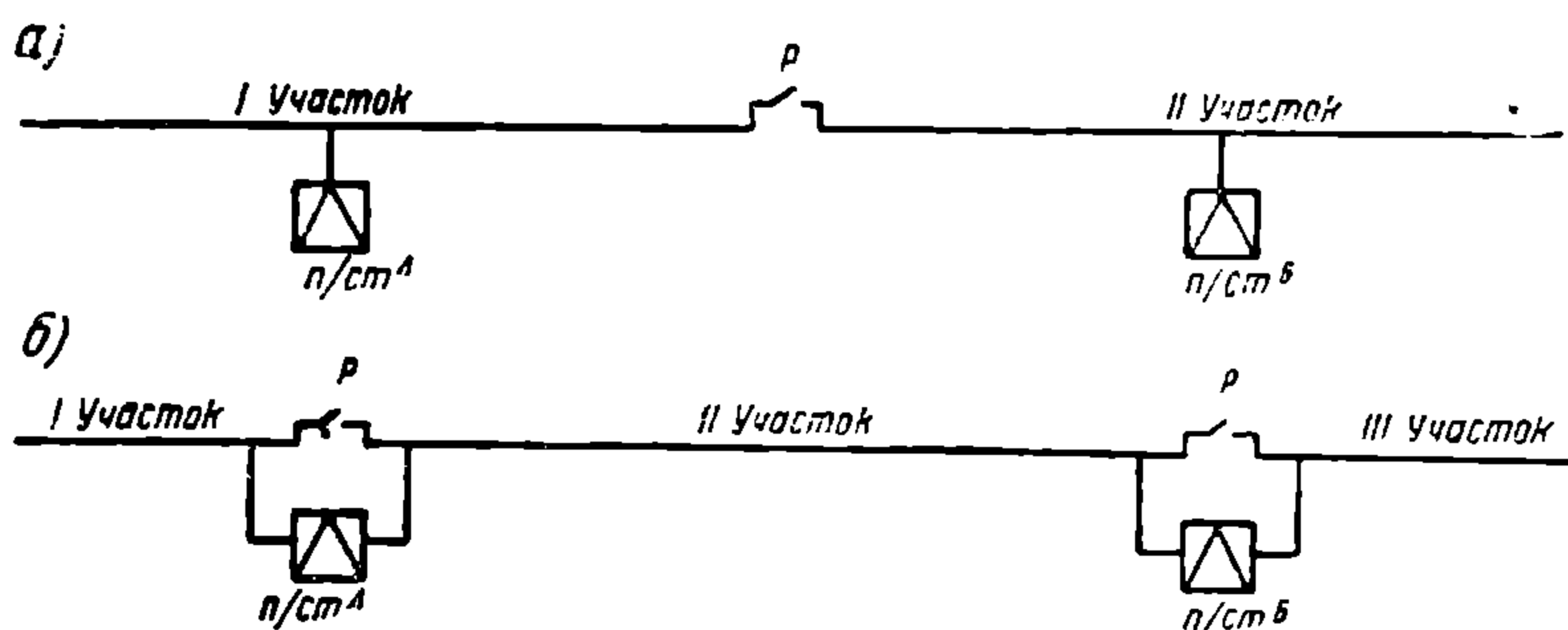


Рис. 135.

При двухстороннем раздельном питании каждый участок контактной сети питается от двух тяговых подстанций. В каждом конце участка присоединяется питающий фидер. В целях возможного отключения его от контактной сети (в случае его повреждения) в месте присоединения питательного фидера к контактной сети устанавливается разединитель (выключатель).

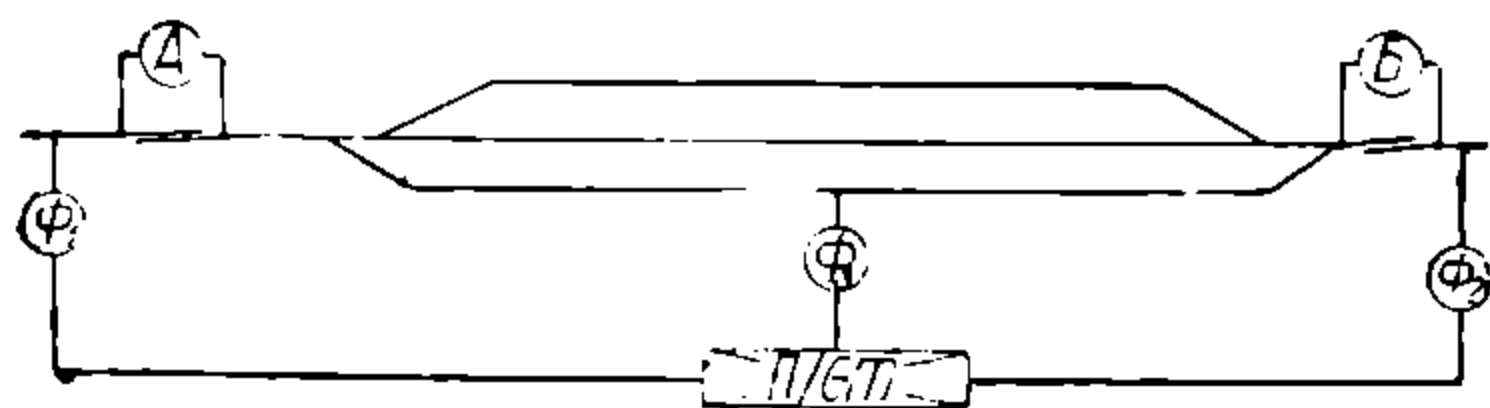


Рис. 136.

Так как тяговые подстанции, как правило, располагаются на станциях и разъездах, то от каждой тяговой подстанции (помимо питающих фидеров для контактной сети перегонов) отходит еще фидер для питания станционных путей, обычно изолированных от перегонов.

Каждый питающий фидер присоединяется через посредство фидерного разединителя. На двухпутных линиях для каждого главного пути по ту или другую сторону станции или разъезда подводится от тяговой подстанции отдельный питающий фидер, а для станционных путей, так же, как и при однопутном участке, подводится отдельно фидер, который присоединяется к путям через посредство группы из трех разединителей. На рис. 136 приводится схема питания от тяговой подстанции малой станции и разъезда однопутной дороги,

а на рис. 137—схема питания малой станции или раз'езда двухпутной дороги.

В приведенных схемах питания на рис. 136 и 137 буквы А, Б, В, Г означают секционные раз'единители, которые дают возможность электрически соединять и раз'единять главные пути перегона

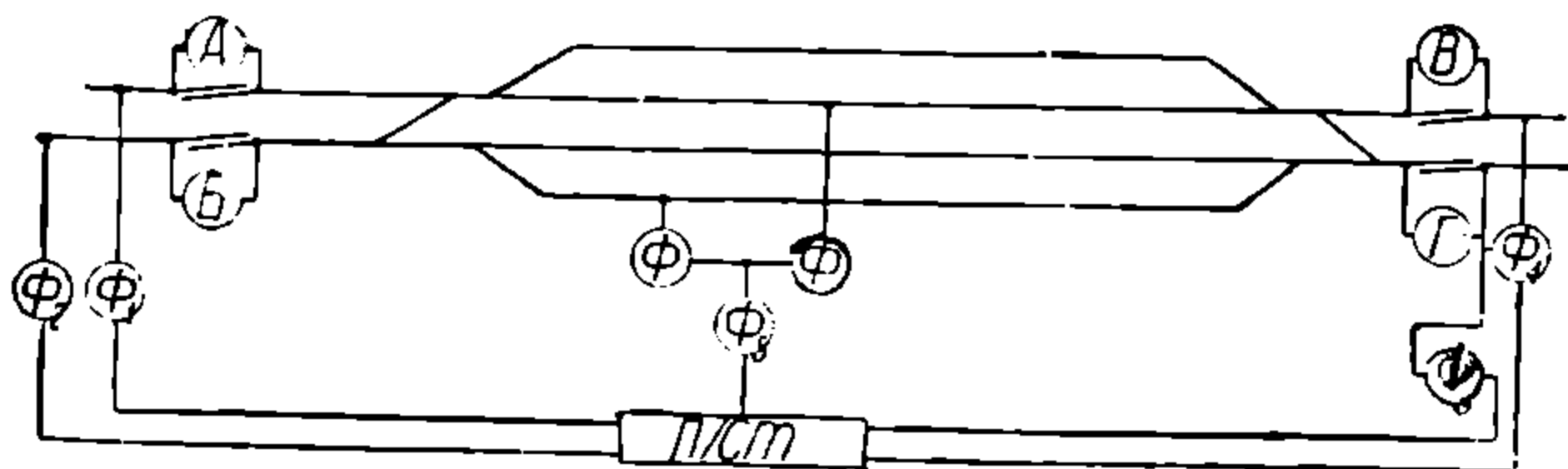


Рис. 137.

от станционных. Секционные раз'единители устанавливаются, как правило, в конце станции за стрелками. Секционные раз'единители могут быть или с автоматическим или с ручным приводом управления. При автоматических секционных раз'единителях управление ими осуществляется из одного пункта. На раз'ездах и станциях, находящихся в пролете между тяговыми подстанциями, по обеим сторонам каждой из них также устанавливаются секционные раз'единители, которые нормально находятся в включенном положении.

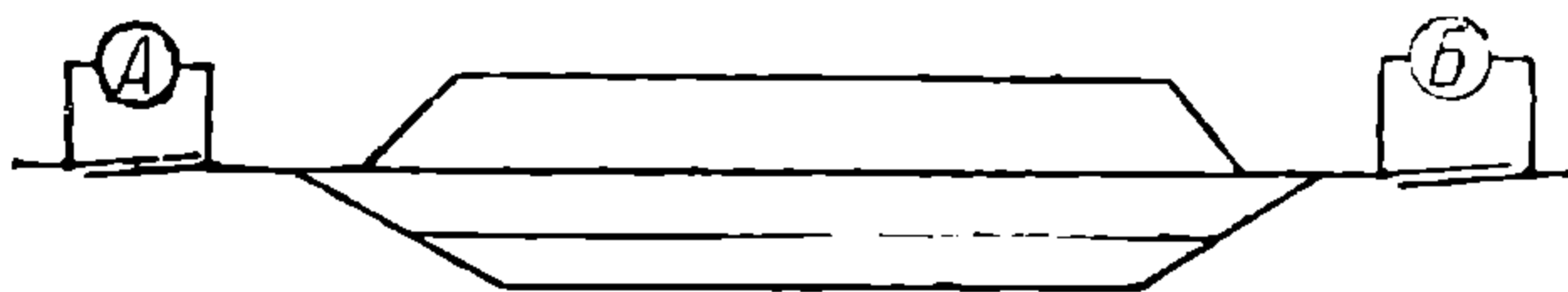


Рис. 138.

На рис. 138 показана схема малой станции, находящейся в пролете между тяговыми подстанциями, с расположением на ней секционных раз'единителей.

В том случае, когда количество станционных путей велико, применяются кроме того еще поперечные секционные раз'единители.

На рис. 139 на станции с большим количеством путей показано расположение поперечных секционных раз'единителей, которые обозначены буквой П.

Таким образом все станции и раз'езды, находящиеся на электрифицируемой дороге, в независимости от положения их относительно тяговых подстанций, имеют с каждой стороны секционные раз'единители, что дает возможность в случае какой-либо аварии быстро выключить поврежденный участок, сохраняя движение на всем остальном протяжении. Исправление поврежденного участка,

благодаря хорошо организованной аварийной службе на электрифицируемой жел. дор., производится быстро и, таким образом, перерыв движения и на поврежденном участке по продолжительности времени незначительный.

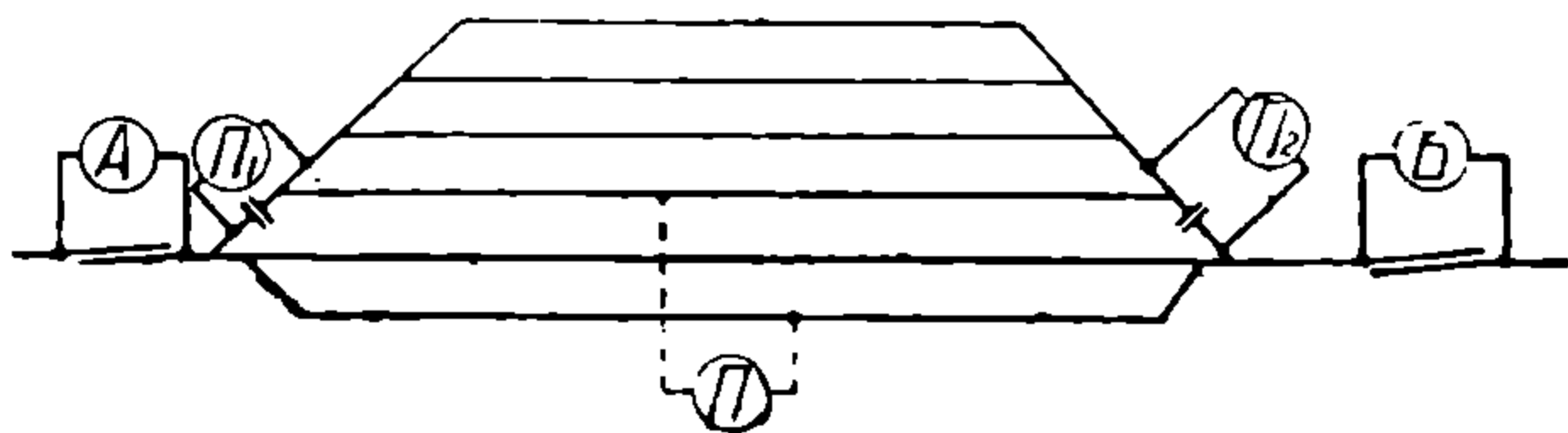


Рис. 139.

Установление схемы питания и секционирования контактной сети электрифицируемых жел. дор. производится, исходя из условия обеспечения технической надежности в эксплуатации и быстрой локализации аварии, если таковая возникнет по каким-либо причинам. На рис. 140 показана схема питания и секционирования контактной сети, принятая в СССР на участке Кизел—Чусовая Пермской жел. дор.

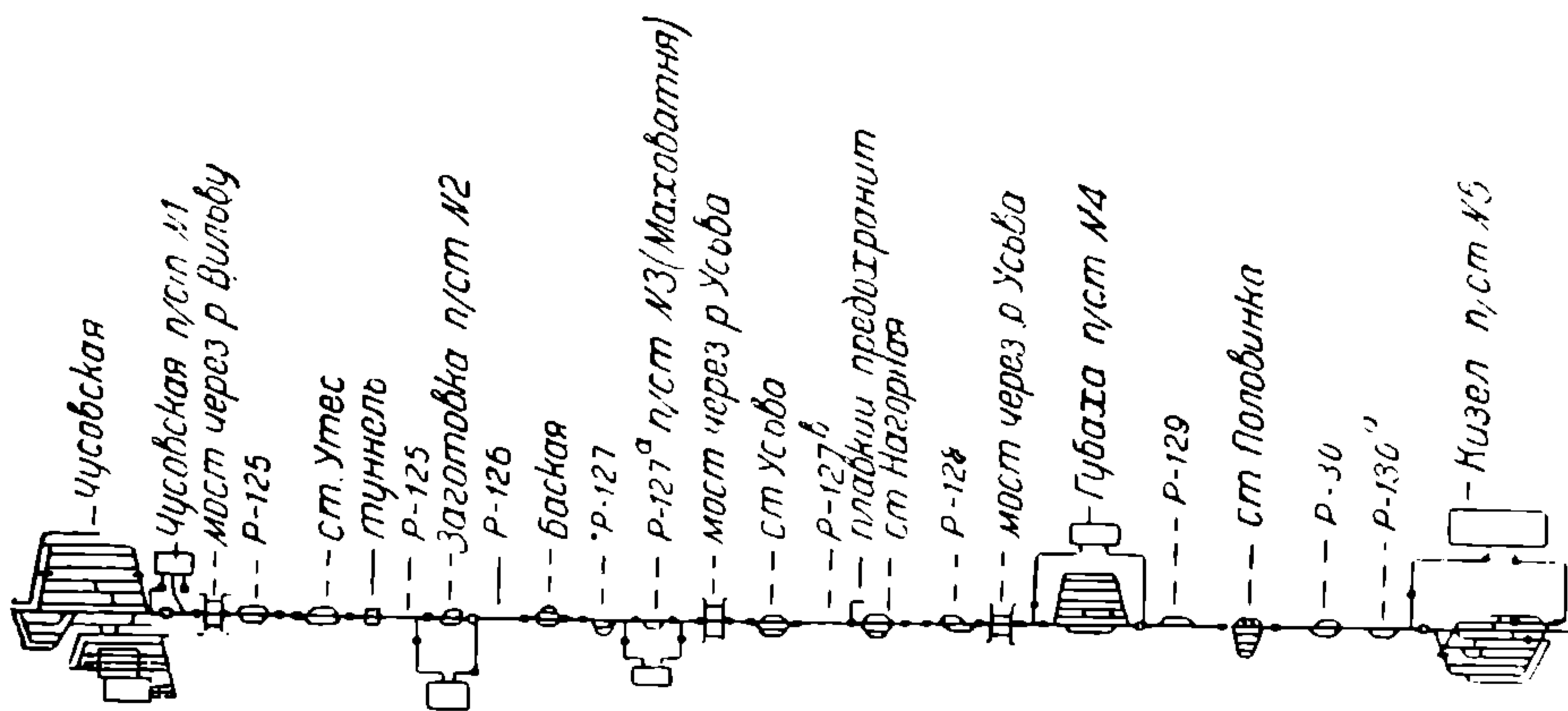


Рис. 140. Схема питания и секционирования контактной сети участка Кизел—Чусовая Пермской жел. дор.

Условные обозначения:

● — Включен нормально. ○ — Выключен нормально.

На приведенной схеме показано выделение в отдельные секционные участки крупных мостов через реки Вильву и Усьву.

Отделение одного участка контактной сети в продольном направлении от другого осуществляется посредством устройства воздушного промежутка между разделяемыми электрическими проводами одного и другого участков, которые в то же время могут быть связаны между собой через секционный раз'единитель.

Секционный раз'единитель в целях гашения вольтовой дуги, которая возникает при включении и выключении под нагрузкой, устанавливается обычно с отдельными рогами, как показано на рис. 141.

Помимо воздушного промежутка секционирование может быть осуществлено посредством секционного изолятора, но так при больших скоростях движения получается возможность повреждения как пантографа электровоза или мотор-вагона, так и секционного изолятора, последний применяется лишь в пределах станции, в местах, где скорость движения не более 30 км/час.

При секционном изоляторе изолирование друг от друга смежных проводов как несущего троса, так и контактного провода осуществляется посредством соединения их изоляторами. Для того, чтобы получить плавный проход пантографа, под изолятором контактного провода применяются фасонно-выгнутые отрезки контактного провода.

На рис. 142 приведен тип секционного изолятора завода Динамо, который применен на Сев. жел. дор.

Существуют много других типов конструкций секционных изоляторов, которые отличаются между собой главным образом при-

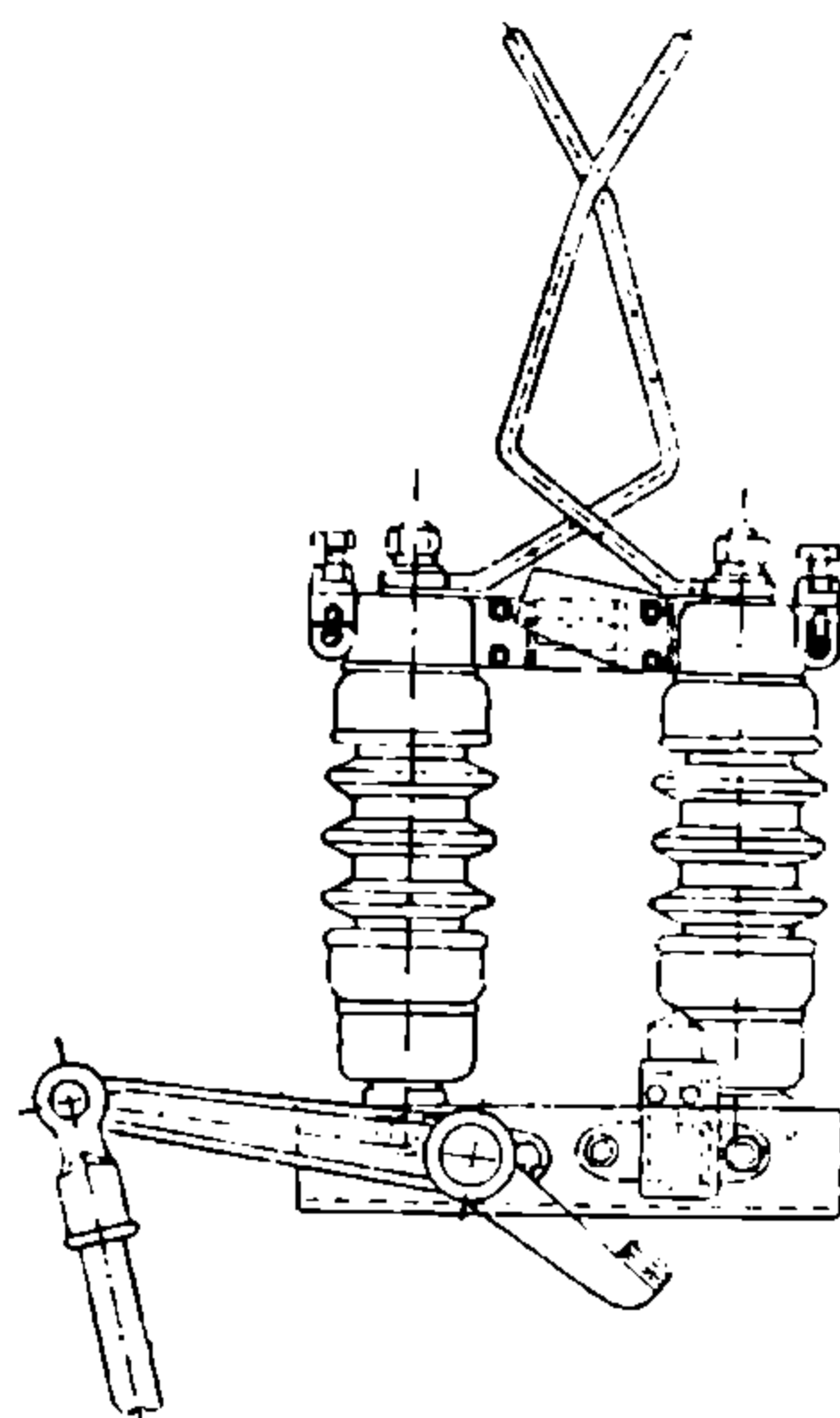


Рис. 141. Секционный раз'единитель.

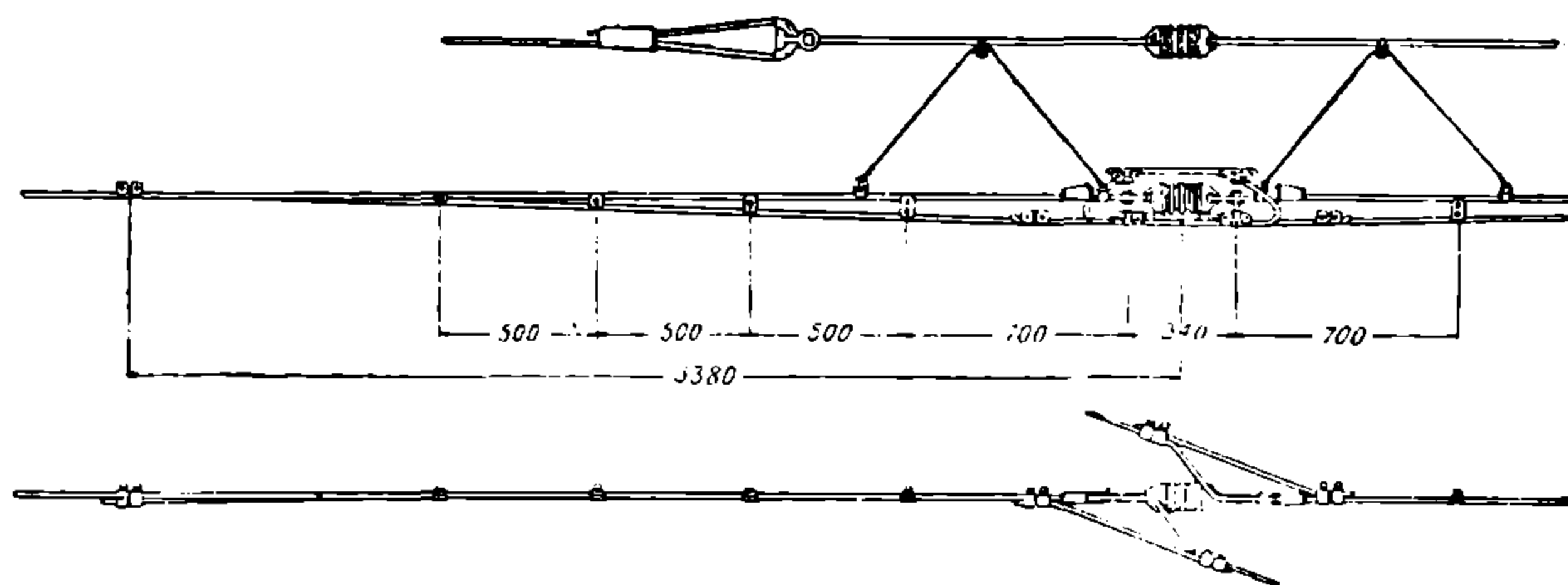


Рис. 142.

менением изоляторов. На Сев. жел. дор. помимо секционного изолятора типа Динамо применены еще секционные изоляторы фирмы ВВС, у которых в несущем тросе включены два изолятора, находящиеся по обеим сторонам фасонно-выгнутого отрезка контактного провода.

§ 38. Электролиз и защита подземных металлических сооружений

Ходовые рельсы электрических жел. дор., служащие обратным проводником тока, не являются абсолютно изолированными от земли.

Ток, проходящий по рельсам, все же, преодолев переходное сопротивление шпал и баласта, частично уходит в землю. Величина тока, отходящего в землю, очевидно будет зависеть от величины переходного сопротивления шпал и баласта.

Следует отметить, что еще до настоящего времени нет достаточно точных данных о величинах переходного сопротивления, а следовательно и о распределении тока между рельсом и землей. Можно считать лишь бесспорным, что часть тока ответвляется от рельсов в землю, т. е. происходит утечка тока. Токи, проходящие в земле, называются блуждающими токами.

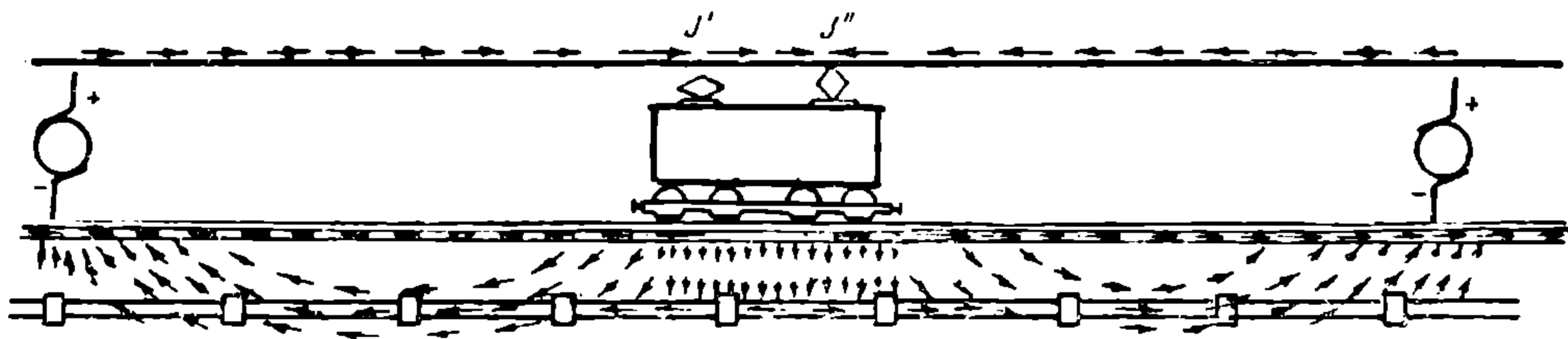


Рис. 143.

Если в земле вдоль линии железной дороги проходит металлическая труба, то ток пройдет по трубе, причем наблюдается определенный характер ответвления тока от рельса в землю и прохождение его по трубе.

На рис. 143 показана двухсторонняя схема питания электровоза и возвращение тока по рельсу, ответвление его в землю и прохождение по металлической трубе.

Из приведенной схемы видно, что наибольшее ответвление тока от рельса в землю происходит под электровозом и далее, после прохода по трубе, он возвращается к рельсам у тяговой подстанции. В местах возвращения тока от трубы к рельсам, вследствие того, что земля содержит в себе растворенные соли различных металлов и кислот, происходит электролитическое раз'едание током металла трубы, что и называется электролизом. Явления электролиза имеют место не только при постоянном токе, но и при переменном, но действие его при переменном токе незначительно, а поэтому опасений в разрушении металлических сооружений не вызывает.

Немецкие данные дают следующие соотношения действия электролиза при переменном токе по сравнению с постоянным: при переменном токе с частотой 15 пер/сек эффект раз'едания

составляет 1,7%, а при частоте 50 *пер/сек* — всего лишь 1% против постоянного тока.

Электролитическое раз'едание металла при постоянном токе достигает больших размеров. Кент. Т. Хилли приводит следующие величины: теоретически при нормальных условиях током в 1 *амп* в течение года разлагается 9 *кг* железа и 35 *кг* свинца. При больших тяговых токах, которые имеют место на электрических железных дорогах постоянного тока, электролиз может вызывать большие разрушения металлических сооружений, находящихся в земле.

Интересно отметить, что разрушение металлической трубы обычно происходит не сплошь по поверхности трубы а разбросанно, в отдельных



Рис. 144.

местах. На рис. 144 приведен характер раз'едания трубы, проле-
ающей к земле около Баку-Сабунчинской жел. дор. в СССР.

В отношении радиуса действия блуждающих токов на металлические сооружения, находящиеся в земле, точно установленных данных нет. Встречается указание, что при нахождении металлического сооружения на расстоянии более 200 м от полотна жел. дороги, оно не подвергается действию электролиза, но с другой стороны инж. В. Коновалов указывает, что в произведенных обследованиях в районе Баку-Сабунчинской жел. дор. обнаружены большие токи в трубах, расположенных на расстоянии более 200 м от железной дороги.

Действие электролиза на металлические сооружения с приближением их к полотну жел. дороги увеличивается

Для устранения вредного действия электролиза существует много различных мероприятий, но ни одною из них до настоящего времени не может гарантировать полного уничтожения явления электролиза.

Как одно из мероприятий по защите от действия электролиза, можно привести устройство изоляционных стыков в металлических трубах, имеющее широкое применение в практике американских жел. дор.

Существуют несколько типов изоляционных стыков в зависимости от рода изоляции.

На рис. 145 показан тип изоляционного стыка: конструкция и род примененных изоляционных материалов видны на чертеже.

Одним из наиболее распространенных мероприятий по борьбе с электролизом является так называемый дренаж, заключающийся

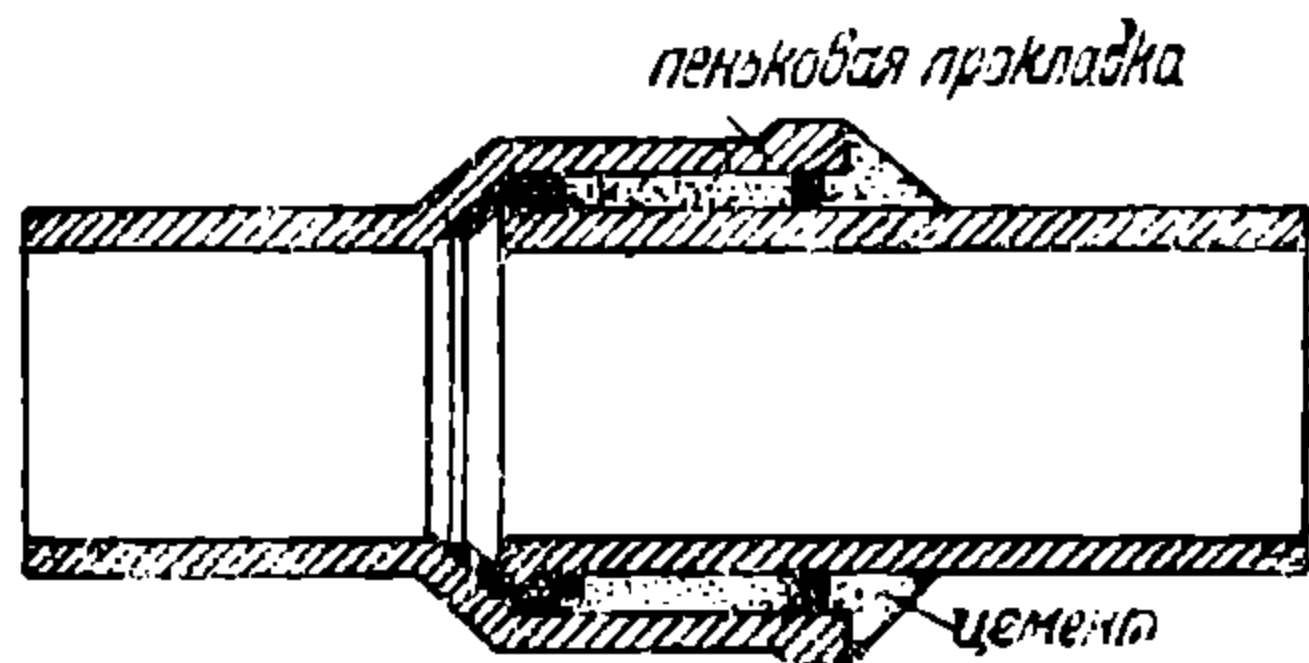


Рис. 145.

в том, что трубы соединяются проводами или с рельсами и со специальным уложенным в земле отрицательным фидером.

Дренажная система защиты от электролиза преследует цель уничтожения возможности перехода тока из трубы непосредственно в землю, так как эти места являются самыми опасными.

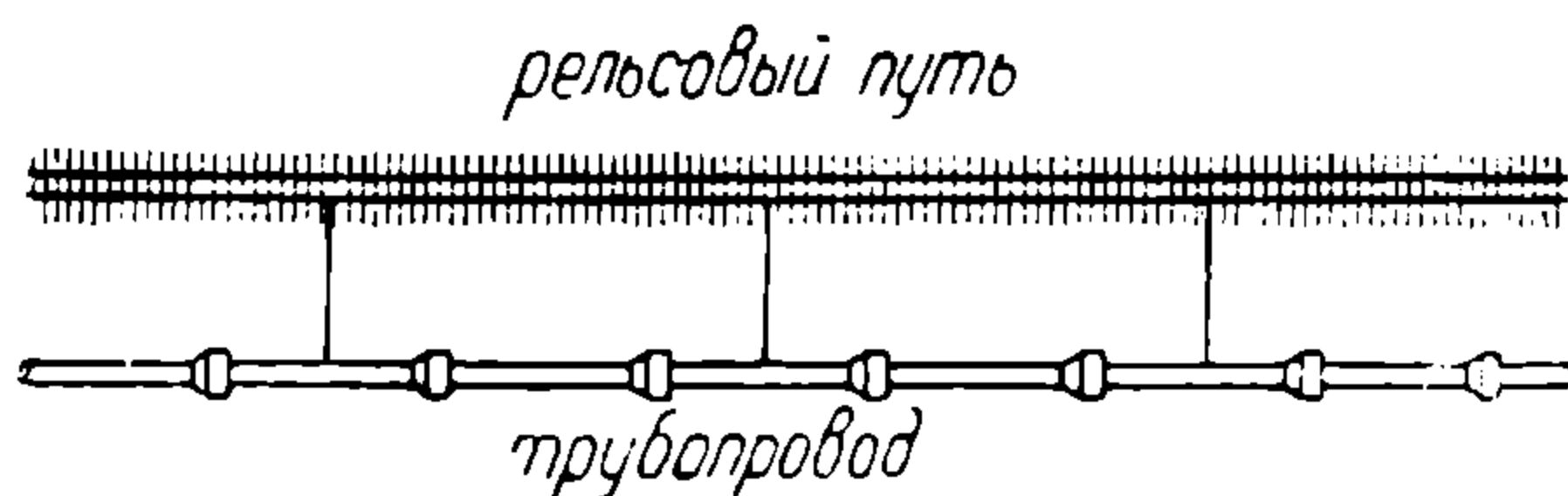


Рис. 146.

Провода, соединяющиеся с трубой, выполняют роль дренажей, по которым проходит ток, почему это мероприятие носит название «дренаж». Так как с изменением положения электровоза или мотор-вагона изменяется характер распределения токов вдоль трубы, то очевидно, что система таких поперечных проводов должна быть по всей длине трубы.

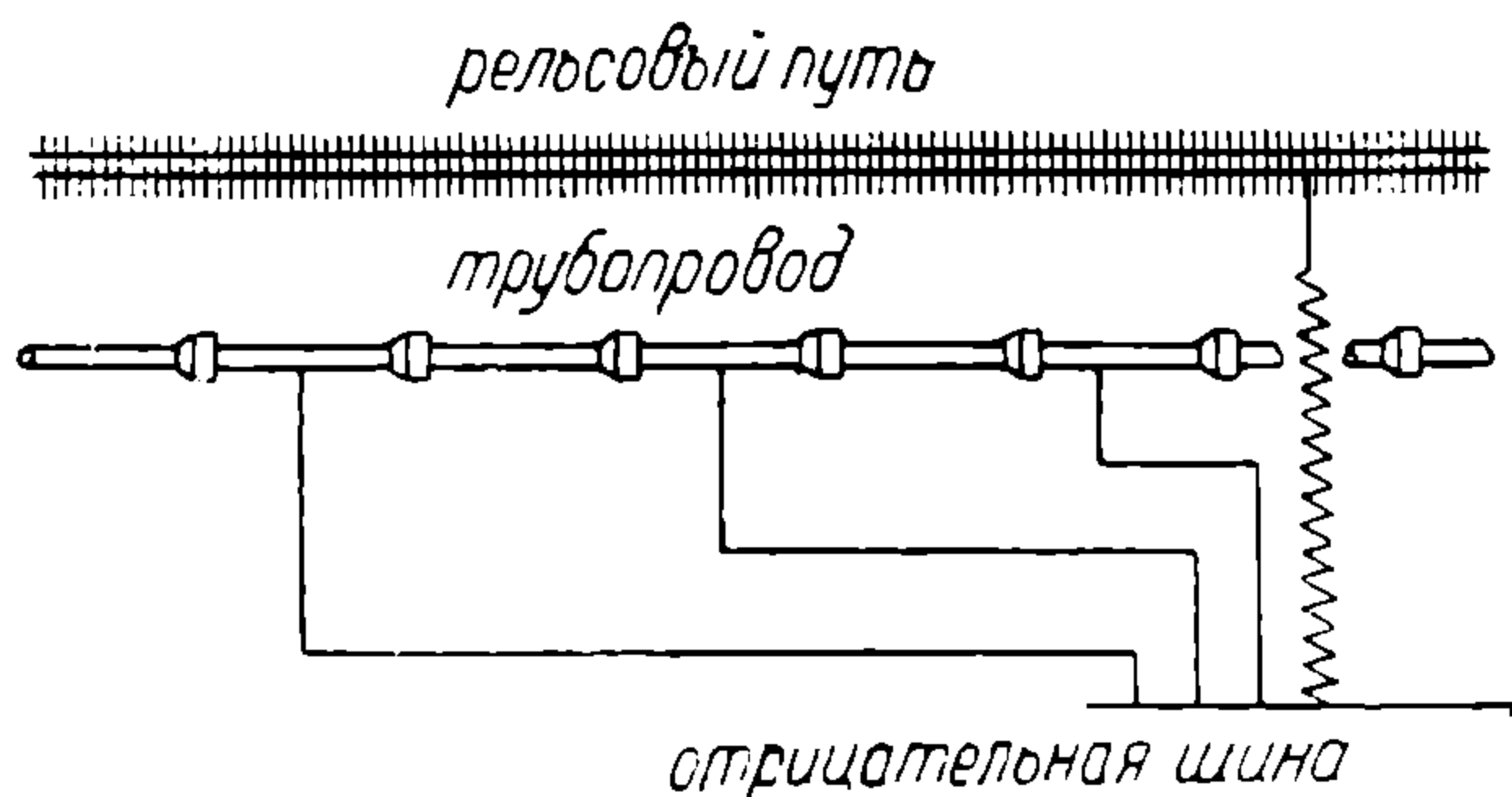


Рис. 147.

При устройстве дренажа путем соединения трубы с рельсом увеличивается утечка тока от рельсов в землю, и по трубе в этом случае будет проходить большой ток, но так как он отходит от трубы через металлический проводник, то не вызывает электролитического раз'едания металла трубы.

Существуют различные системы устройства дренажа. Самой простой схемой является соединение металлического сооружения, находящегося в земле, трубопровода или кабеля по всей длине проводниками с ходовым рельсом.

Недостатком этой системы дренажа является увеличение тока, что представляет опасность, особенно по отношению к кабелям.

При большой разности потенциалов между двумя соединениями (что иногда случается) сила тока может достигнуть такой величины, которая вызовет не только сильное нагревание, но (при свинцовой оболочке кабеля) и плавление.

Система дренажа, обеспечивающая от такого увеличения тока и являющаяся в американской практике наиболее распространенной, приведена на рис. 147

При этой системе дренажа трубопровод соединяется при помощи фидеров с отрицательной шиной тяговой подстанции. Между рельсами и отрицательной шиной включено небольшое сопротивление, благодаря которому устраняется возможность образования большой разности потенциалов между трубами и рельсами вблизи самой подстанции.

Кроме этих мероприятий, для устранения вредного действия электролиза применяют изолированные от земли соединения отрицательных шин тяговой подстанции с рельсами. Все приведенные выше мероприятия все же не устраняют полностью вредного действия электролиза.

Одним из основных мероприятий в этом отношении является надлежащее состояние верхнего строения пути и содержание в исправности стыковых и междурельсовых соединений.

Статья 6. РАСЧЕТ КОНТАКТНОЙ СЕТИ

§ 3). Принцип электрического расчета контактной сети

Электрический расчет контактной сети заключается в установлении сечения проводов, исходя из допустимых, — среднего за период движения и максимального в отдельные моменты падений напряжения до токоприемника поезда.

При установленном сечении проводов должно быть произведено определение величины тока при коротком замыкании в целях проверки на выключение в случае какой-либо аварии на линии, быстродействующих автоматов тяговых подстанций при принятой схеме секционирования контактной сети.

Величина среднего падения напряжения за данный промежуток времени определится из выражения:

$$\Delta E_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T \Delta E dt,$$

где T — период времени, за который определяется среднее падение напряжения,

ΔE — падение напряжения в отдельные моменты dt .

При определении величины среднего падения напряжения до токоприемника поезда величина T представляет собой $\sum t$ сумму тех отдельных моментов времени, в течение которых поезд потребляет энергию, моменты же без потребления тока в величину полного рассматриваемого промежутка времени T не входят.

В тех случаях, когда определяется величина среднего падения напряжения до токораздела рельсовой цепи, что является характеристикой и служит суждением с точки зрения опасности от блуждающих токов, величина T представляет полное время, включающее как моменты движения поезда с потреблением тока, так и без тока.

Величина ΔE — падение напряжения в отдельные моменты времени, представляющая собой сумму падений напряжений в проводах и рельсах, зависит от положения поездов относительно тяговых подстанций, схемы питания и величины потребляемых ими токов.

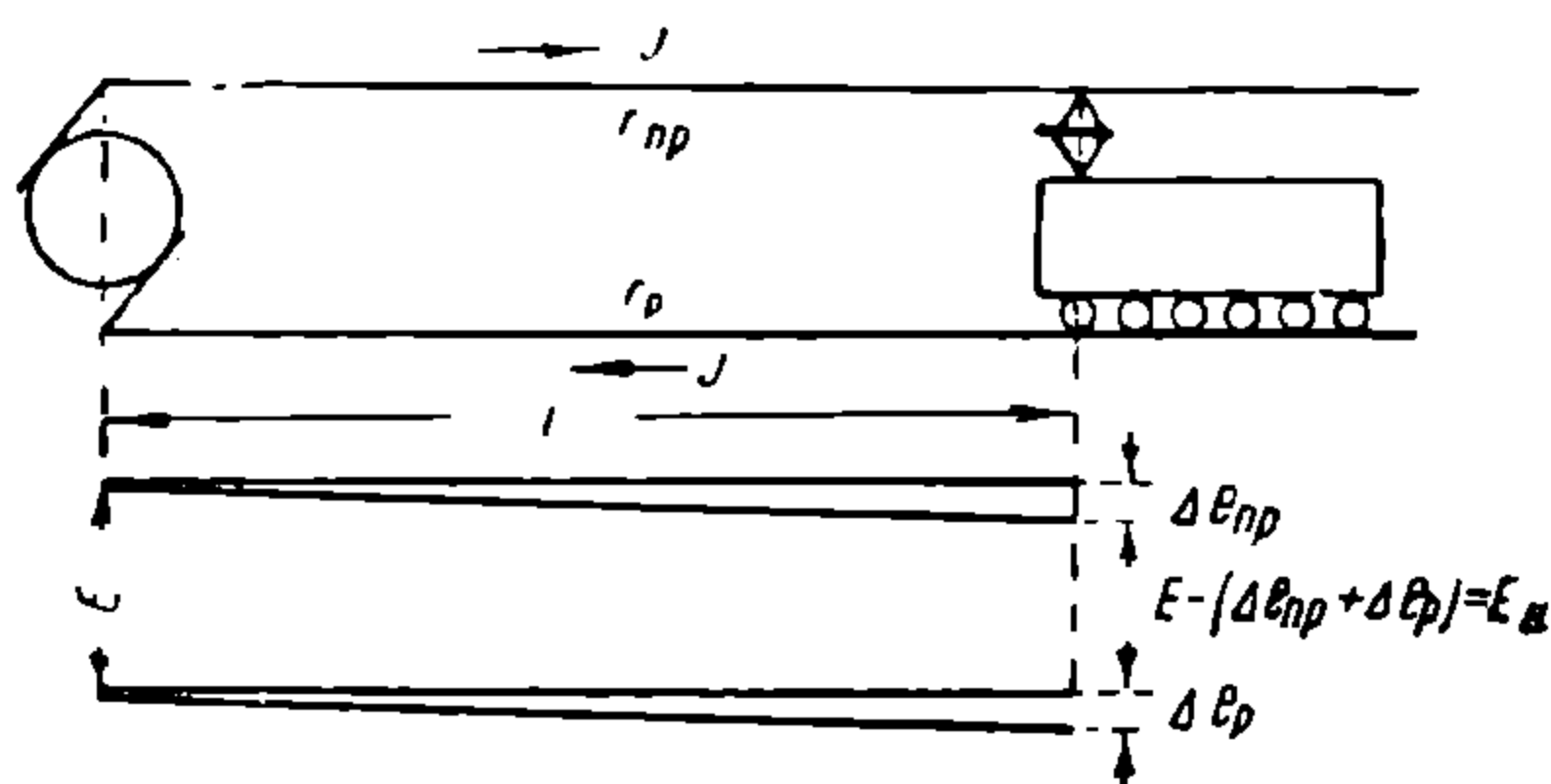


Рис. 148.

При данном напряжении на шинах подстанции величина падения напряжения в рабочих проводах и рельсах определяет собой величину напряжения на пантографе электровоза.

Рассмотрим наиболее простой случай: одностороннее питание и один поезд, находящийся на расстоянии l от тяговой подстанции (рис. 148).

Положим, что поезд потребляет ток J и обозначим через r_{np} — сопротивление провода и через r_p — сопротивление рельсов на всей длине l .

Тогда падение напряжения в проводах и рельсах равно:

$$\Delta E = Jr_{np} + Jr_p = \Delta e_{np} + \Delta e_p$$

Если напряжение на подстанции E , то напряжение на пантографе электровоза будет равно:

$$E_k = E - (\Delta e_{np} + \Delta e_p) = E - \Delta E.$$

Обозначив через

ρ_{np} — удельное сопротивление проводов $\Omega \text{ км/мм}^2$,

q_{np} — сечение проводов в мм^2 ,

R — сопротивление единицы длины рельсовой цепи получим:

$$\Delta E = \Delta e_{np} + \Delta e_p = Jl \frac{\rho_{np}}{q_{np}} + JlR = Jl \left(\frac{\rho_{np}}{q_{np}} + R \right).$$

Отсюда видно, что величина падения напряжения зависит от величины силы тока, поступающего к электровозу, и расстояния его от тяговой подстанции.

При одной и той же величине силы тока, потребляемого электровозом, величина падения напряжения будет изменяться с изменением положения поезда и будет уменьшаться с приближением

его к тяговой подстанции, а следовательно величина напряжения на пантографе электровоза будет увеличиваться.

Так как скорость вращения якорей электродвигателей зависит от подводимого к ним напряжения, и с увеличением напряжения увеличивается, то, следовательно, скорость движения поезда будет увеличиваться с приближением его к тяговой подстанции.

В рассматриваемом случае одностороннего питания ток, потребляемый электровозом, поступал от одной подстанции. При двухстороннем питании, когда электровоз будет получать ток от двух тяговых подстанций, величина падения напряжения будет меньше.

При нескольких поездах, находящихся на участке при той или другой схеме питания, очевидно, что падение напряжения до токоприемника каждого из них будет различно, в зависимости от их расположения и потребляемых сил тока, и в этом случае необходимо определить величину падения напряжения до токоприемника того поезда, для которого эта величина будет наибольшей. Так как положение поездов изменяется по времени, то необходимо определять значение этих величин наибольших падений напряжений для каждого момента движения и установить среднее падение напряжения за данный промежуток времени.

Исходя из допустимого среднего падения напряжения и определяется сечение проводов контактной сети.

Чем больше допустимая величина падения напряжения, тем, очевидно, меньше потребуются сечение проводов, но это вызовет уменьшение скоростей движения и увеличение потери энергии в проводах.

Величина среднего допустимого падения напряжения должна устанавливаться на основании технико-экономических расчетов.

В практике эксплуатации электрических жел. дор. колебание напряжений на пантографе электровоза допускается в определенных пределах. Величина максимально допустимого падения напряжения в отдельные моменты зависит от допустимых для электрооборудования подвижного состава толчков напряжения, устанавливаемых для тяговых электродвигателей заводом.

В расчетах величина среднего допустимого падения напряжения может приниматься как разность между нормальным напряжением на шинах тяговых подстанций и нормальным напряжением на пантографе электровоза или мотор-вагона. На электрифицируемых магистральных жел. дорогах СССР на постоянном токе нормальное напряжение на подстанции—3300 вольт, напряжение на пантографе электровоза—3000 в, что дает среднее допустимое падение напряжения 300 вольт. На пригородных участках с мотор-вагонной тягой, при напряжении на шинах подстанции 1650 вольт и на пантографе мотор-вагона—1500 вольт—средняя допустимая величина падения напряжения будет 150 вольт. Обычно величина среднего допустимого падения напряжения выражается в процентах. Величина максимального кратковременно-допустимого

падения напряжения, при отсутствии заводских данных о допустимых величинах для электрооборудования подвижного состава в предварительных расчетах может быть принята в 30 — 40% от нормального напряжения на токоприемнике подвижного состава.

§ 40. Токораспределение и определение падения напряжения до токоприемника поезда

Как указывалось ранее существуют два основных способа питания контактной сети: одностороннее (консольное) и двухстороннее.

Рассмотрим токораспределение при этих способах питания и установим выражения для определения падений напряжения до токоприемников поездов.

А. Одностороннее питание

В рассмотренном ранее наиболее простом случае (при одном поезде) величина падения напряжения до токоприемника поезда определена выражением

$$\Delta E = J l \left(\frac{\rho_{np}}{q_{np}} + R \right),$$

откуда

$$q_{np} = \frac{J l \rho_{np}}{\Delta E - J l R} \text{ (мм}^2\text{)}.$$

Возьмем общий случай n поездов с расстоянием их от тяговой подстанции $l_1, l_2, l_3, \dots, l_n$ и при потребляемых ими токах соответственно $J_1, J_2, J_3, \dots, J_n$.

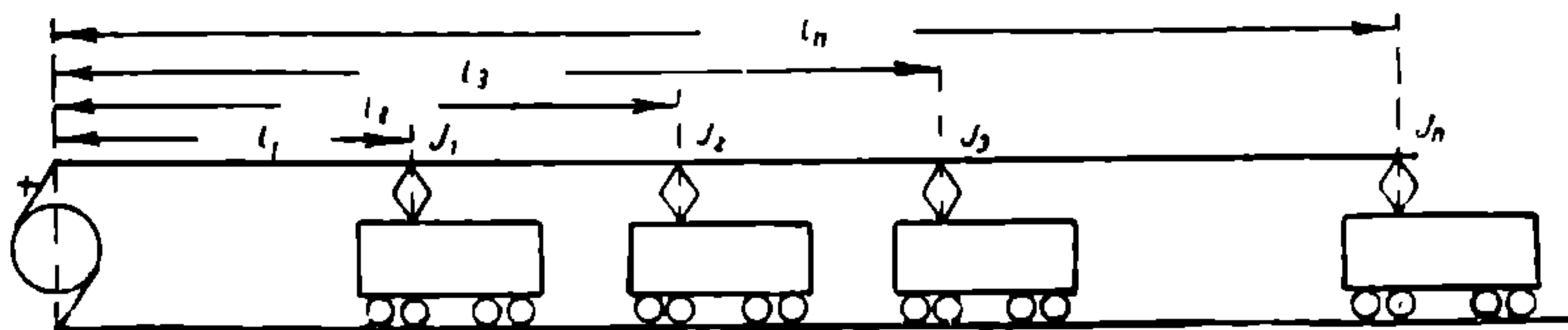


Рис. 149.

Падение напряжения в проводах и рельсах соответственно будет равно

$$\begin{aligned} \text{От 1-го поезда } \Delta E_1 &= J_1 l_1 \left(\frac{\rho}{q} + R \right), \\ \text{2-го } \Delta E_2 &= J_2 l_2 \left(\frac{\rho}{q} + R \right), \\ \text{3-го } \Delta E_3 &= J_3 l_3 \left(\frac{\rho}{q} + R \right), \\ \text{n-го } \Delta E_n &= J_n l_n \left(\frac{\rho}{q} + R \right). \end{aligned}$$

НТБ
ДНУЖТ

Наибольшее падение напряжения будет до токоприемника последнего n -го поезда и равно сумме падений напряжений каждого из поездов, т. е.

$$\begin{aligned} \Delta E = \Delta E_1 + \Delta E_2 + \Delta E_3 + \dots + \Delta E_n &= J_1 l_1 \frac{\rho}{q} + J_1 l_1 R + J_2 l_2 \frac{\rho}{q} + J_2 l_2 R + \\ &+ J_3 l_3 \frac{\rho}{q} + J_3 l_3 R + \dots + J_n l_n \frac{\rho}{q} + J_n l_n R = \\ &= \left(J_1 l_1 + J_2 l_2 + J_3 l_3 + \dots + J_n l_n \right) \left(\frac{\rho}{q} + R \right) = \sum_1^n J l \left(\frac{\rho}{q} + R \right) \end{aligned}$$

Выражение для определения сечения проводов будет

$$q = \frac{\rho \sum_1^n J l}{\Delta E - R \sum_1^n J l}$$

Сопоставляя с формулой, полученной ранее для случая одного поезда, видим, что вместо величины Jl имеем $\sum Jl$, что представляет собой сумму моментов сил тока относительно тяговой подстанции, если рассматривать потребляемые токи, как грузы на консольной балке.

Величина падения напряжения

$$\Delta E = \left(\frac{\rho}{q} + R \right) \sum Jl$$

зависит лишь от моментов сил токов, и поэтому для определения величины падения напряжения при различных положениях поездов необходимо определить лишь значения моментов сил тока.

В том случае, когда сечение проводов известно, падение напряжения до токоприемника каждого поезда может быть легко определено графически, путем построения веревочного многоугольника.

Графическое определение падения напряжения до токоприемника каждого из трех поездов, потребляющих токи J_1, J_2, J_3 и находящихся на расстоянии соответственно l_1, l_2, l_3 от тяговой подстанции показано на рис. 150.

По силам тока J_1, J_2, J_3 , откладывая их последовательно по вертикали, построен силовой многоугольник с полюсным расстоянием

$$H = \frac{1}{\left(\frac{\rho}{q} + R \right)}.$$

Параллельно лучам 1, 2, 3, 4 силового многоугольника построены лучи 1', 2', 3' и 4' веревочного многоугольника. Проведя из

точки пересечения луча $1'$ с вертикалью, проходящей через подстанцию A , линию $4''$, параллельную $4'$, получаем, что отрезки, заключенные между линией $4''$ и веревочным многоугольником, дают падение напряжения до токоприемника каждого из поездов.

Из построений на рис. 150 имеем

$$\frac{J_1}{H} = \frac{a_1}{l_1}; \quad \frac{J_2}{H} = \frac{a_2}{l_2} \quad \text{и} \quad \frac{J_3}{H} = \frac{a_3}{l_3}.$$

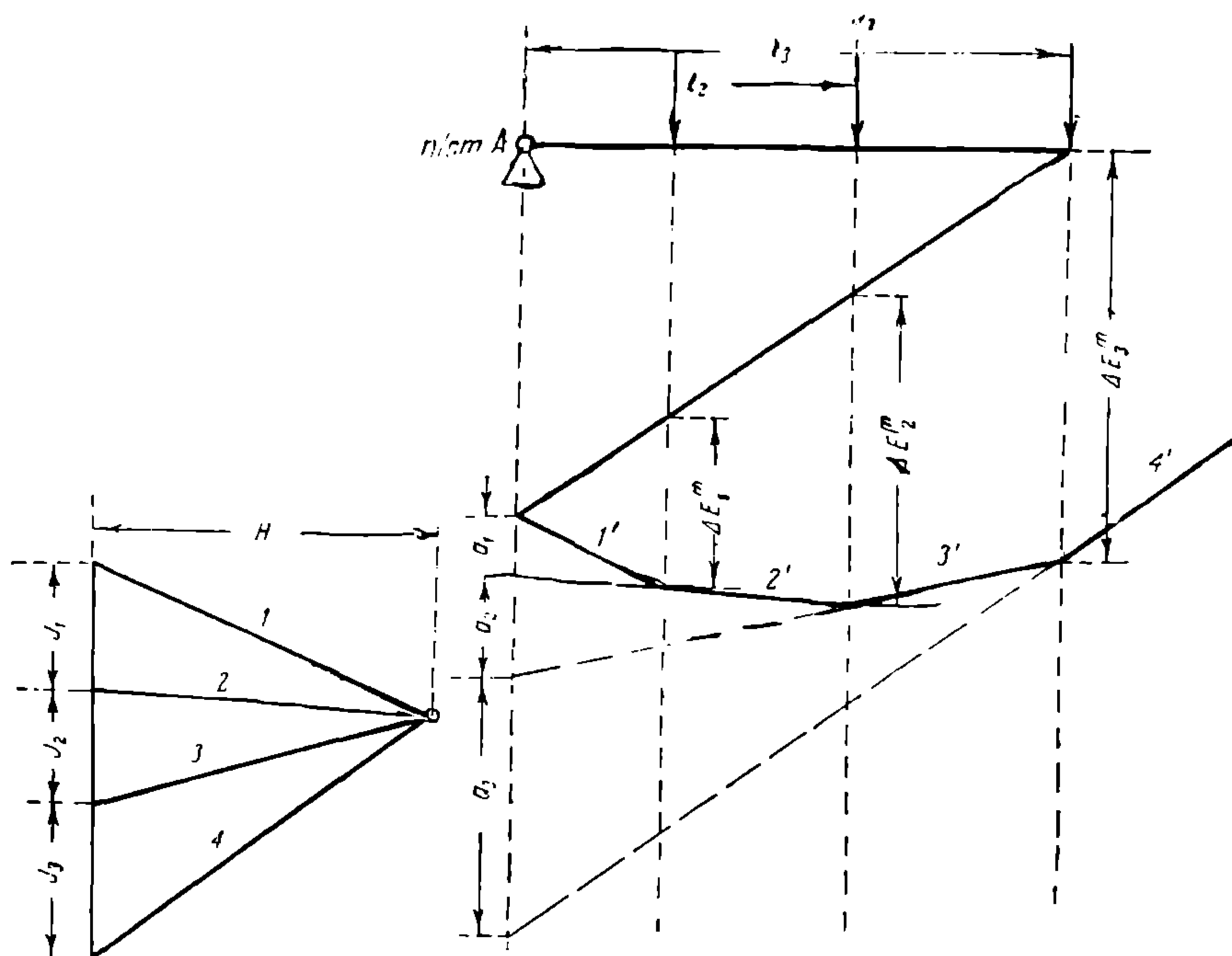


Рис. 150.

Падение напряжения до токоприемника третьего поезда равно:

$$\Delta E_3^T = a_1 + a_2 + a_3 = \frac{1}{H} \left(J_1 l_1 + J_2 l_2 + J_3 l_3 \right) = \left(\frac{\rho}{q} + R \right) \Sigma J l.$$

Аналогично можно доказать, что отрезки E_2^T и E_1^T представляют собой падение напряжения до токоприемника соответственно второго и первого поездов.

Б. Двухстороннее питание

При двухстороннем питании участка контактной сети, как указывалось ранее, снабжение энергией поездов происходит от двух подстанций, расположенных по концам участка. Прежде чем

перейти к определению в этом случае падения напряжения до токоприемников поездов, рассмотрим токораспределение при этой схеме питания.

Вначале возьмем наиболее простой случай—между подстанциями находится один поезд (рис. 151).

Поезд находится на расстоянии l_A от тяговой подстанции A и на расстоянии l_B от подстанции B . Расстояние между подстанциями— L . Сила тока, потребляемая поездом— J .

Обозначим силу тока, получаемую поездом от подстанции A , через J_A , а от подстанции B —через J_B .

Падения напряжения, вызываемые током J_A на участке l_A и током J_B на участке l_B равны между собой, так как не может быть на пантографе электровоза, как и в любой точке цепи, двух напряжений. Следовательно, можно написать, что

$$\Delta E_A = \Delta E_B.$$

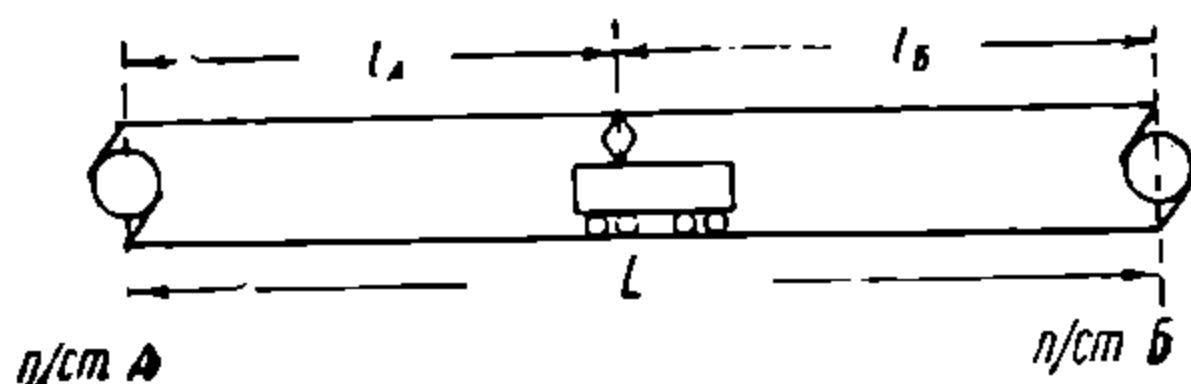


Рис. 151

Заменяя ΔE через соответствующие значения силы тока и сопротивления проводов и рельсов, сечения которых по всему участку остаются без изменения, получим:

$$J_A l_A \frac{\rho}{q} + J_A l_A R = J_B l_B \frac{\rho}{q} + J_B l_B R.$$

или

$$J_A l_A \left(\frac{\rho}{q} + R \right) = J_B l_B \left(\frac{\rho}{q} + R \right),$$

следовательно:

$$J_A l_A = J_B l_B,$$

откуда

$$\frac{J_A}{J_B} = \frac{l_B}{l_A}.$$

Таким образом в отношении токораспределения получаем следующие положения.

Силы тока, потребляемые поездом от каждой из подстанций, при одинаковом сечении проводов по всему участку, обратно пропорциональны расстояниям поезда от подстанций.

Это распределение тока, при одинаковом сечении проводов по участку, не зависит от величины сечения проводов и их электрических свойств.

Имея отношение

$$\frac{J_A}{J_B} = \frac{l_B}{l_A}.$$

и произведя преобразование, получаем:

$$\frac{J_A + J_B}{J_B} = \frac{l_B + l_A}{l_A}$$

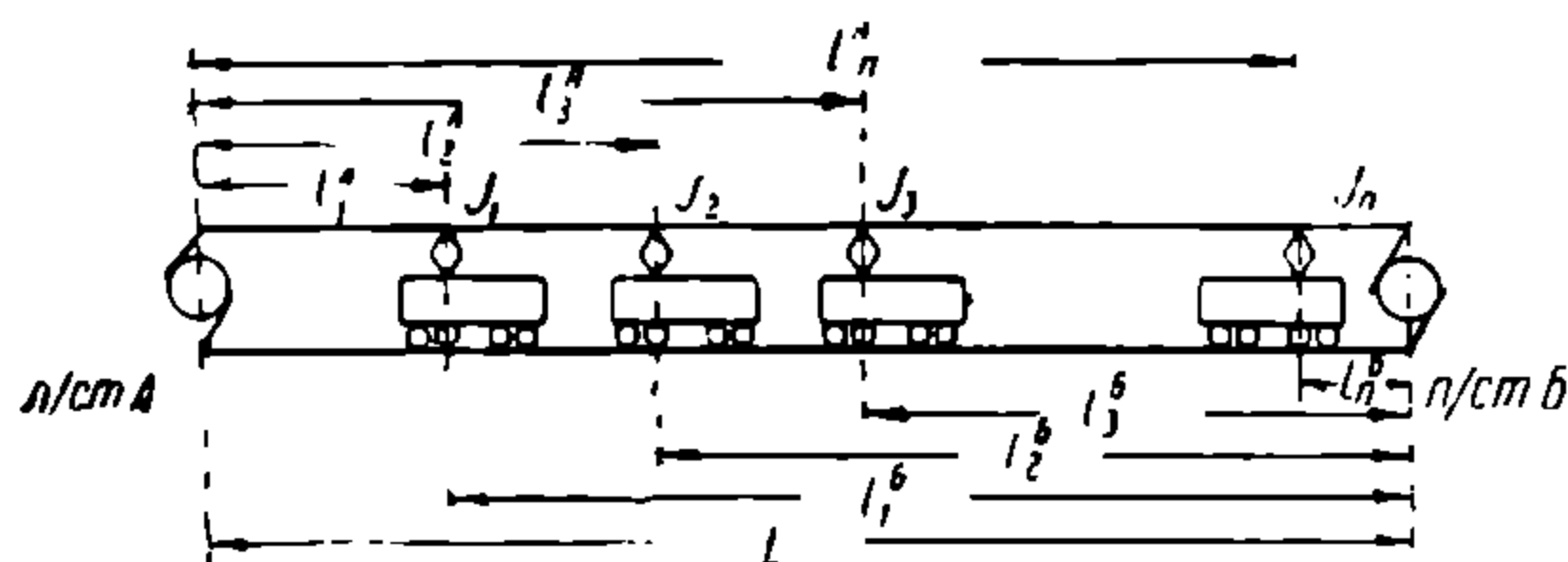


Рис. 152.

Следовательно

$$\frac{J}{J_B} = \frac{L}{l_A}$$

Откуда

$$J_B = \frac{Jl_A}{L}.$$

Аналогично можно получить значение J_A , которое будет равно

$$J_A = \frac{Jl_B}{L}$$

Из рассмотрения этих выражений определения значений J_B и J_A можно заключить, что токи, получаемые поездом от подстанции А и В, являются как бы опорными реакциями балки с пролетом L от груза J .

Так как величина падения напряжения до токоприемника поезда, являющегося в данном случае точкой токораздела участка l_A и участка l_B , равна между собой, то, следовательно, определение сечения проводов контактной сети может быть произведено или из выражения падения напряжения на участке l_A или на участке l_B .

Рассмотрим токораспределение при нескольких поездах в пролете между подстанциями. Пусть токи, потребляемые поездами, будут $J_1, J_2, J_3, \dots, J_n$ и расстояние их от подстанций А соответственно $l_1^A, l_2^A, l_3^A, \dots, l_n^A$ (рис. 152), а от подстанции В соответственно $l_1^B, l_2^B, l_3^B, \dots, l_n^B$.

Приведенный ранее (для случая одного поезда) метод определения сил тока, отдаваемых каждой подстанцией, применим и здесь, так как при рассмотрении каждого поезда в отдельности, он не зависит от количества поездов, находящихся между подстанциями. Сила тока, отдаваемая подстанцией А:

$$\text{для первого поезда} = J_1^A = \frac{J_1 l_1^B}{L}$$

$$\begin{aligned} \text{для второго поезда} &= J_2^A = \frac{J_2 l_2^B}{L} \\ \text{третьего} &= J_3^A = \frac{J_3 l_3^B}{L} \\ n\text{-го} &= J_n^A = \frac{J_n l_n^B}{L} \end{aligned}$$

Полная сила тока, отдаваемая подстанцией А для всех поездов, равна

$$J_A = J_1^A + J_2^A + J_3^A + \dots + J_n^A = \frac{J_1 l_1^B + J_2 l_2^B + J_3 l_3^B + \dots + J_n l_n^B}{L}$$

Аналогично при рассмотрении каждого поезда в отдельности определится сила тока, отдаваемая подстанцией В,

$$\begin{aligned} \text{для первого поезда} &= J_1^B = \frac{J_1 l_1^A}{L} \\ \text{второго} &= J_2^B = \frac{J_2 l_2^A}{L} \\ \text{„ третьего} &= J_3^B = \frac{J_3 l_3^A}{L} \\ n\text{-го} &= J_n^B = \frac{J_n l_n^A}{L} \end{aligned}$$

Полная сила тока, отдаваемая подстанцией В для всех поездов, равна

$$J_B = J_1^B + J_2^B + J_3^B + \dots + J_n^B = \frac{J_1 l_1^A + J_2 l_2^A + J_3 l_3^A + \dots + J_n l_n^A}{L}$$

Очевидно, что сумма сил токов, отдаваемых подстанциями А и В, равна сумме сил токов, потребляемых всеми поездами, т. е.

$$J_A + J_B = J_1 + J_2 + J_3 + \dots + J_n.$$

При определении сил тока, отдаваемых подстанцией, мы рассматривали каждый поезд в отдельности и считали, что к этому поезду ток поступает от двух подстанций.

Это правильно в отношении определения величины полной силы тока, отдаваемой каждой подстанцией для всех поездов, но поступление тока от подстанции к тому или другому поезду будет в действительности иное.

Лишь один какой-то поезд будет получать ток от той и другой подстанции, остальные поезда, находящиеся влево от него, будут получать ток от подстанции, расположенной слева; поезда, находящиеся справа, будут получать ток от другой подстанции и расположенной справа. Положение того поезда, который получает

ток и от одной и от другой подстанции, называется точкой токораздела.

Для установления характера распределения потребляемых поездами токов в пролете между подстанциями и определения точки токораздела рассмотрим конкретный пример.

Положим, в пролетах между подстанциями находятся три поезда с расстоянием и силами тока, потребляемыми каждым поездом, указанными на рис. 153.

На основании установленного ранее уравнения, величина тока, отдаваемая подстанцией для питания указанных поездов, равна

$$J_A = \frac{300(9 + 6 + 6) + 200(6 + 6) + 400 \cdot 6}{30} = 370 \text{ амп.}$$

Ток, отдаваемый подстанцией Б, равен

$$J_B = \frac{300 \cdot 9 + 200(9 + 9) + 400(9 + 9 + 6)}{30} = 530 \text{ амп.}$$

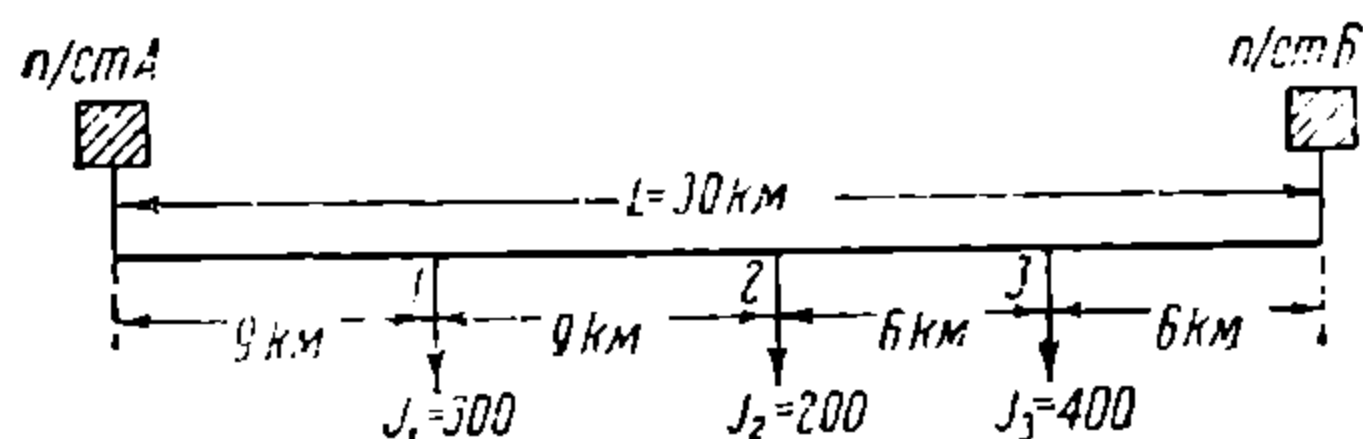


Рис. 153.

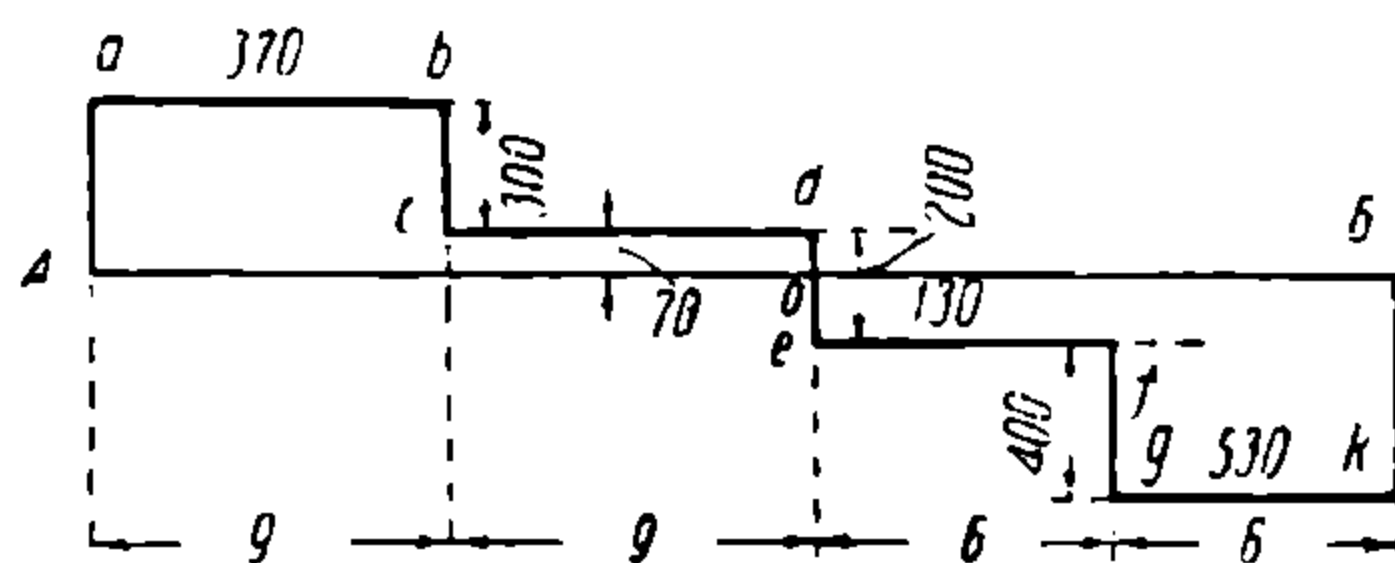


Рис. 154.

Так как $J_A - J < J_2$, то очевидно, что второй поезд потребляет ток и от подстанции А и от подстанции Б, а следовательно положение второго поезда—точка 2 является точкой токораздела.

Распределение токов по участкам изображено в виде диаграммы на рис. 154, в которой силы тока, поступающие от подстанции А, расположены выше оси АБ, а токи, поступающие с подстанции Б,—ниже оси АБ.

Подстанция А для питания поездов отдает ток 370 амп, из которых 300 амп потребляет первый поезд, а 70 амп—второй, который, кроме того, от подстанции Б получает ток 130 амп.

Точка О — положение второго поезда—называется точкой токораздела.

Сумма моментов сил тока слева от точки токораздела, равная площади $Aavcdo$, равна сумме моментов сил тока справа, выражающейся площадью $oefgkB$.

Действительно, слева от точки токораздела имеем

$$\sum J l = J_1 l_1 + (J_A - J_1) l_2 = 300 \cdot 9 + (370 - 300) \cdot 18 = 3960$$

или, что то же,

$$\sum J l = 370 \cdot 9 + 70 \cdot 9 = 3960$$

Справа от точки токораздела:

$$\sum_{\text{пр}} I l = 400 \cdot 6 + (530 - 400) \cdot 12 = 530 \cdot 6 + 130 \cdot 6 = 3960.$$

Наибольшее падение напряжения будет до токоприемника второго поезда, т. е. в точке токораздела, и определится из выражения

$$\Delta E = \left(\frac{\rho}{q} + R \right) \sum I l = \left(\frac{\rho}{q} + R \right) 3960.$$

Величина падения напряжения до токоприемника каждого поезда при двухстороннем питании может быть определена графически, путем построения веревочного многоугольника, аналогично произведенному для случая одностороннего питания.

Для рассмотренного ранее конкретного примера определим графически наибольшее падение напряжения до токоприемника второго поезда.

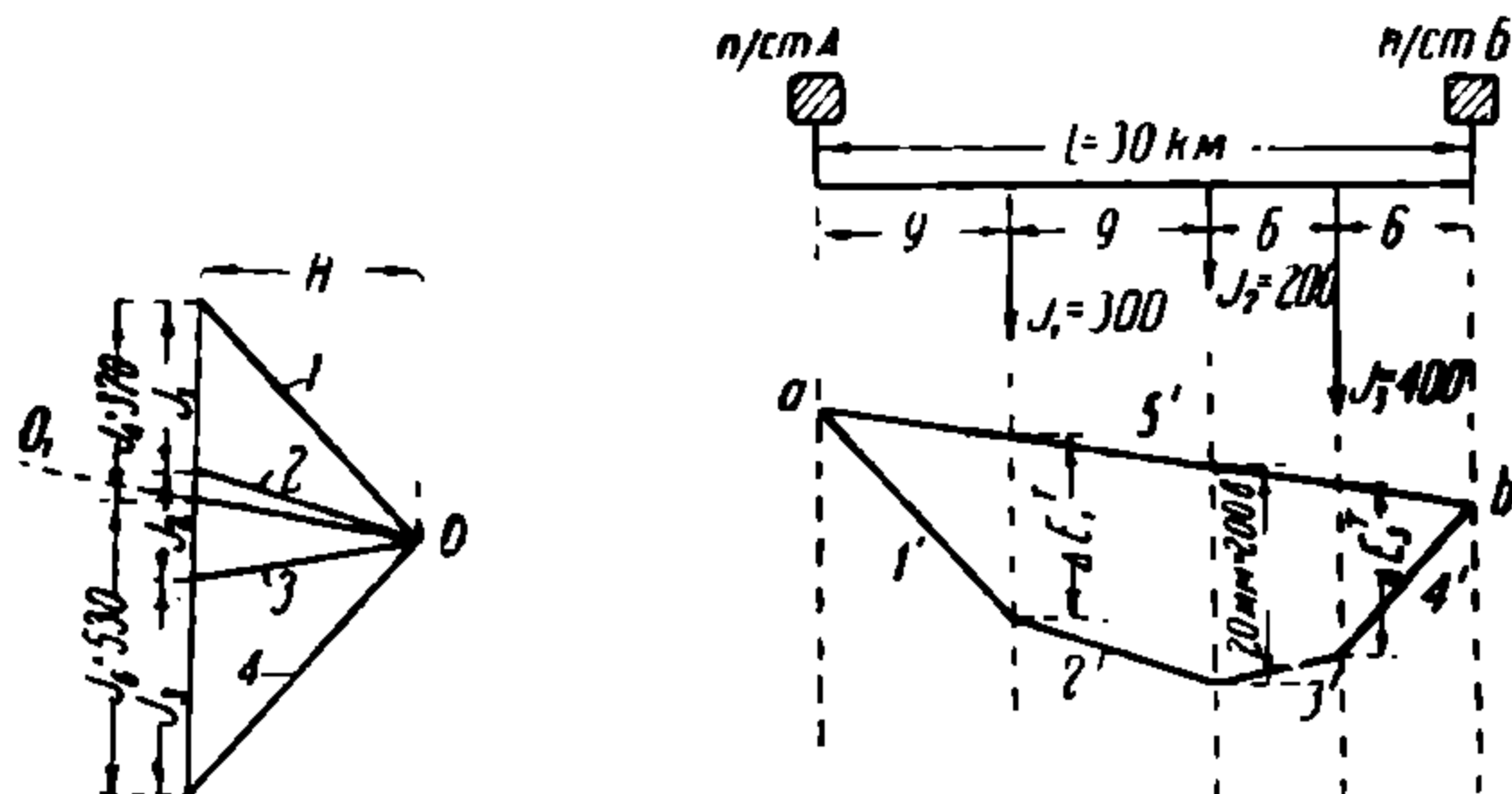


Рис. 155.

Так как для получения падения напряжения до токоприемника, помимо расположения поездов и токов, потребляемых ими, необходимо знать еще сопротивление проводов и рельсов, то примем условно, что сопротивление проводов контактной сети и рельсовой цепи на один км равно

$$r = \left(\frac{\rho}{q} + R \right) = 0,05 \text{ } \Omega/\text{км}.$$

При построении силового и веревочного многоугольников (рис. 155) примем следующие масштабы:

Масштаб сил тока $1 \text{ см} = a \text{ амп} = 400 \text{ амп},$
 " напряжения $1 \text{ см} = b \text{ в} = 200 \text{ в},$
 " расстояний $1 \text{ см} = c \text{ км} = 10 \text{ км}.$

Тогда величина полюсного расстояния силового многоугольника будет равна

$$H = \frac{b}{a \cdot c \cdot r} = \frac{200}{400 \cdot 10 \cdot 0,05} = 1 \text{ см}.$$

Метод построения по силовому многоугольнику веревочного многоугольника аналогичен описанному ранее и виден из рис. 155.

Проведя замыкающую линию 5' веревочного многоугольника, соединяющую точки a и b , полученные как пересечение луча 1' с вертикалью, проходящей через подстанцию A , и дуга 4' с вертикалью, проходящей через подстанцию B , имеем величину падения напряжения до токоприемника второго поезда, равную графически 10 мм, что в масштабе соответствует 200 в.

Из аналитического расчета, произведенного ранее, величина падения напряжения до токоприемника второго поезда определяется из выражения

$$\Delta E = \left(\frac{\rho}{q} + R \right) \Sigma Il = r \Sigma Il$$

и равна

$$\Delta E = 0,05 \quad 3\,960 = 198 \text{ в.}$$

Разность в два вольта объясняется неточностью построения вследствие малого масштаба. Помимо определения величины падения напряжения до токоприемника каждого поезда веревочный и силовой многоугольники позволят графически определить силы тока, отдаваемые каждой из подстанций на питание поездов.

Если через полюс силового многоугольника провести линию oo' , параллельную ab замыкающей веревочного многоугольника, то линия oo' отсечет на вертикали силового многоугольника отрезки, представляющие собой в масштабе ток с подстанции A , $J_A = 370$ амп, и ток с подстанции B , $J_B = 530$ амп.

Так как при этом графическом методе определения падения напряжения необходимо знать сопротивление проводов и рельсов, то он применяется преимущественно для проверки падения напряжения в контактом проводе, на основании которых могут быть построены кривые изменения напряжения, а по ним определены потери мощности по времени и стоимость потеряннй энергии в проводах при данном их сечении.

Для целей определения сечения проводов контактной сети, по заданному допустимому падению напряжения до токоприемника поезда, более удобным является аналитический метод определения суммы моментов сил тока до точки токораздела, т. е.

$$\Delta E = \left(\frac{\rho}{q} + R \right) \Sigma Il,$$

откуда сечение проводов определится из выражения

$$q = \frac{\rho \Sigma Il}{\Delta E - R \Sigma Il}.$$

В рассмотренных ранее схемах расположения поездов между тяговыми подстанциями принималось, что все поезда потребляют токи.

При этом для случая двухстороннего питания устанавливалась одна точка токораздела, которая и являлась точкой наибольшего падения напряжения.

В случае симметричного расположения поездов с числом, кратным 2, могут быть две точки, граничащие с областью раздела тока, но каждая из них является точкой наибольшего падения напряжения.

Все рассмотренное ранее относится к движению поездов без применения рекуперации энергии.

При рекуперации энергии, если среди поездов, находящихся между тяговыми подстанциями, имеются поезда, рекуперирующие энергию, т. е. являющиеся сами как бы подстанцией, отдающей ток в контактную сеть, то токораспределение по участкам в этом случае будет иное.

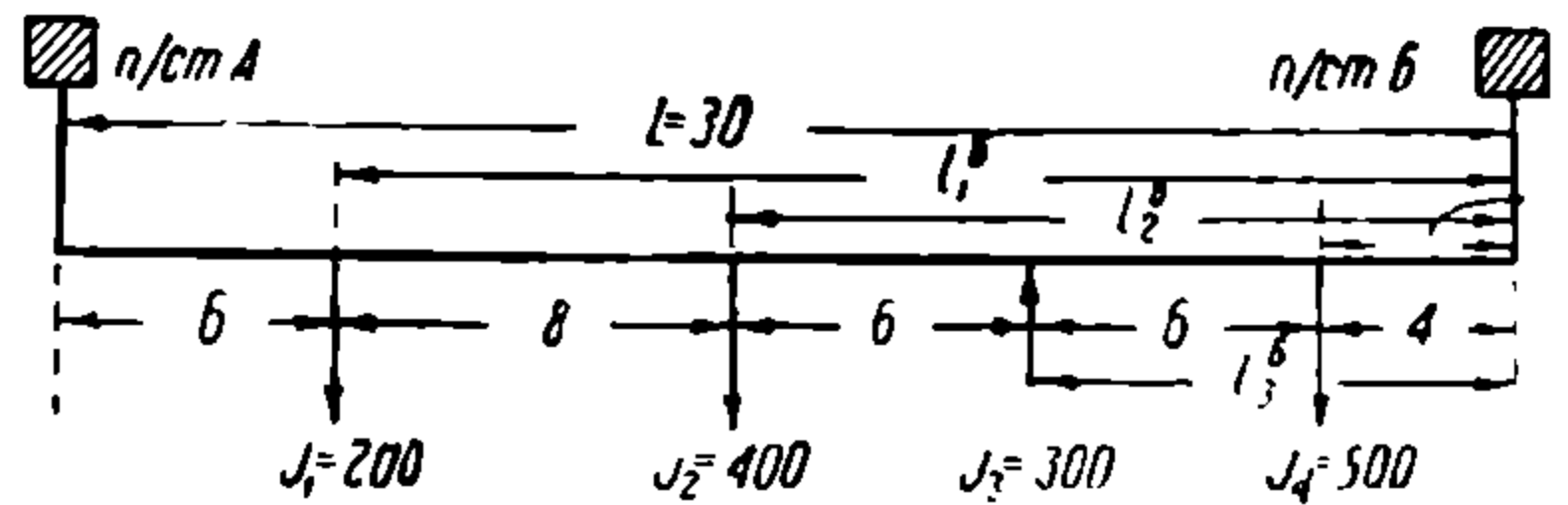


Рис. 156.

Ток, отдаваемый в сеть рекуперирующим поездом, потребляется поездом, идущим в под'ем, что уменьшает и расход тока с подстанций и падение напряжения в контактной сети.

Положим, что в пролете между тяговыми подстанциями А и Б (рис. 156) находятся три поезда, потребляющие токи J_1 , J_2 и J_4 и один рекуперирующий поезд, отдающий в сеть ток J_3 , который обозначен на рисунке стрелкой, обращенной в сторону, обратную потребляющим токам.

Рассматривая поездные токи, как грузы в пролете между подстанциями и учитывая их знак, определим выражение опорных реакций, которые, как указывалось ранее, представляют собой токи, отдаваемые подстанциями.

Тогда ток, отдаваемый подстанцией А, равен

$$J_A = \frac{J_1 l_1^B + J_2 l_2^B - J_3 l_3^B + J_4 l_4^B}{L}$$

Ток, отдаваемый подстанцией Б, равен

$$J_B = \frac{J_1 (L - l_1^B) + J_2 (L - l_2^B) - J_3 (L - l_3^B) + J_4 (L - l_4^B)}{L}$$

С другой стороны, ток подстанции Б может быть определен из уравнения

$$J_B = J_1 + J_2 - J_3 + J_4 - J_A.$$

Таким образом при наличии на участке между подстанциями кроме потребляющих, рекуперирующих поездов, определение токов, отдаваемых каждой подстанцией, производится так же, как и для случая поездов только потребляющих энергию, но в этом случае

значение сил токов рекуперации необходимо принимать с обратным знаком.

Для установления характера токораспределения по участкам при наличии рекуперирующего поезда рассмотрим конкретный пример.

Положим, что между подстанциями находятся четыре поезда, из которых три потребляют токи, а один—рекуперирует.

Значение поездных токов и расположение поездов между подстанциями приведено на рис. 156.

Ток, отдаваемый подстанцией А, при этой схеме расположения поездов будет равен

$$\begin{aligned}
 &= \frac{J_1 l_1^B + J_2 l_2^B - J_3 l_3^B + J_4 l_4^B}{L} = \\
 &= \frac{200 (8 + 6 + 6 + 4) + 400 (6 + 6 + 4) - 300 (6 + 4) +}{30} \\
 &\quad + \frac{500}{30} 4 = 340.
 \end{aligned}$$

Ток подстанции В равен

$$J_B = J_1 + J_2 - J_3 + J_4 - J_A = 200 + 400 - 300 + 500 - 340 = 460.$$

Из полученных значений токов, отдаваемых подстанциями, вытекает следующий характер распределения токов по участкам.

От подстанции А поступает ток 340 амп, который потребляется двумя поездами: первым поездом 200 амп и вторым поездом—140 амп. Недостающие 260 амп второй поезд получает от рекуперирующего поезда.

Остальные 40 амп от рекуперирующего поезда текут к четвертому поезду, который, кроме того, получает от подстанции В силу тока 460 амп. Диаграмма распределения токов по участкам для этого случая изображена на рис. 157.

Также, как в рассмотренных ранее диаграммах, и в этом случае сумма площадей диаграммы, расположенных выше оси АВ, равна сумме площадей, лежащих ниже оси.

Действительно, сумма площадей диаграммы выше оси равна.

$$\Sigma M = 340 \cdot 6 + 140 \cdot 8 + 40 \cdot 6 = 3400 \text{ амп. км}$$

тоже расположенных ниже оси

$$\Sigma M = 260 \cdot 6 + 460 \cdot 4 = 3400 \text{ амп. км.}$$

Однако, несмотря на эти равенства площадей, которые аналогичны случаю нахождения на участке поездов только с потреблением тока, в этой схеме при наличии рекуперирующего поезда получается существенное отличие в отношении нахождения величины наибольшего падения напряжения до токоприемника поезда.

Из диаграммы распределения токов по участкам на рис. 157 видно, что имеются две точки раздела токов, поступающих от подстанций, а именно: для токов, поступающих от подстанции А разделом является точка 2, а для поступающих от подстанции Б — точка 4, находящиеся соответственно под вторым и четвертым поездами.

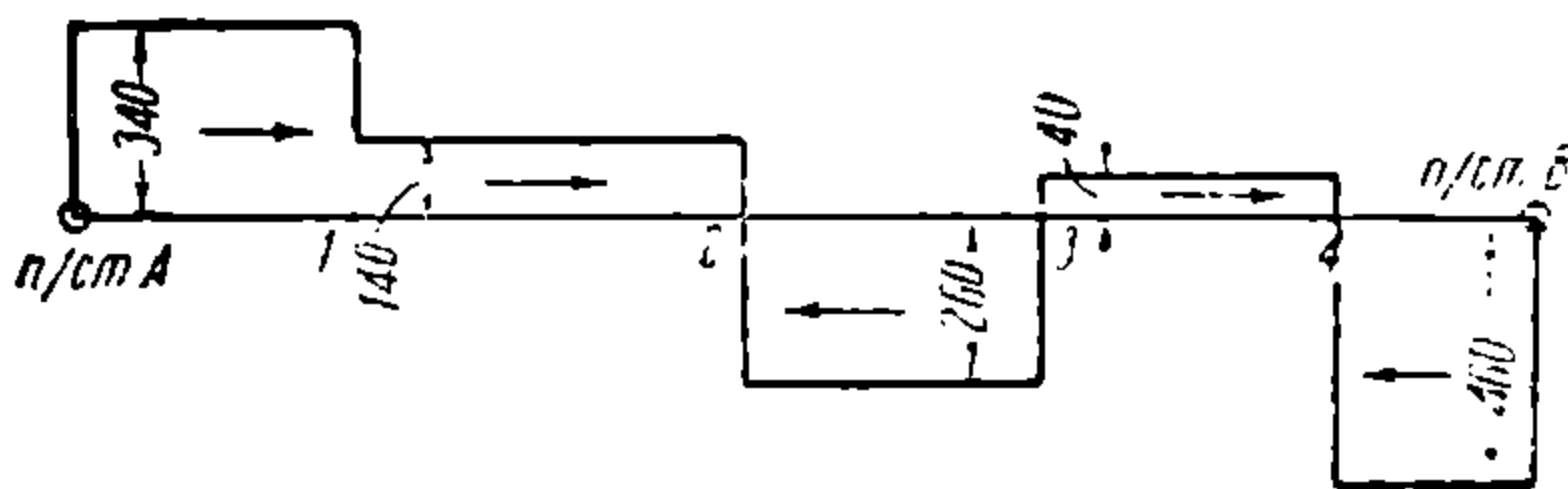


Рис. 157.

Для определения величины наибольшего падения напряжения до токоприемника поезда при этой схеме необходимо установить ту точку раздела токов, которая соответствует этому положению. Так как величина падения напряжения пропорциональна моментам сил токов, то задача сводится к установлению той точки раздела токов, сумма моментов сил токов до которой будет наибольшей, что может быть получено из рассмотрения положений

$$\sum_A^n JI \geq \sum_B^m JI.$$

Для приведенного примера сумма моментов сил токов до точки раздела 2 равна

$$\sum_A^2 JI = 340 \cdot 6 + 140 \cdot 8 = 3160 \text{ амп. км.}$$

$\sum_B^m JI$ до точки раздела 4 равна

$$\sum_B^4 JI = 460 \cdot 4 = 1840 \text{ амп. км.}$$

Следовательно $\sum_A^n JI > \sum_B^m JI$, т. е. $3160 > 1840$

и точка 2 раздела тока является местоположением того поезда, на токоприемнике которого будет наибольшее падение напряжения.

Характер изменения падения напряжения до токоприемника каждого поезда и величина падения напряжения видны на рис. 158 из веревочного многоугольника, построенного для данного рассмотренного случая.

§ 41. Электрический расчет сечения проводов контактной сети методом сечений графика движения

Сечение проводов контактной сети определяется из условия, чтобы среднее падение напряжения до токоприемника поезда за период движения и максимальное — в отдельные моменты не превышали заданной допустимой величины.

Так как поезда, потребляющие токи от тяговых подстанций, находятся в движении и величина потребляемых ими токов зависит от уклона пути, на котором они находятся, то следовательно нагрузка контактной сети будет изменяться по времени. Для определения среднего за период движений падения напряжения до токоприемника поезда необходимо установить мгновенные падения напряжения в отдельные моменты времени. Определение мгновенных падений напряжения до токоприемника поезда может быть произведено лишь тогда, когда известно расположение поездов относительно тяговых подстанций и величина силы тока, потребляемого каждым поездом.

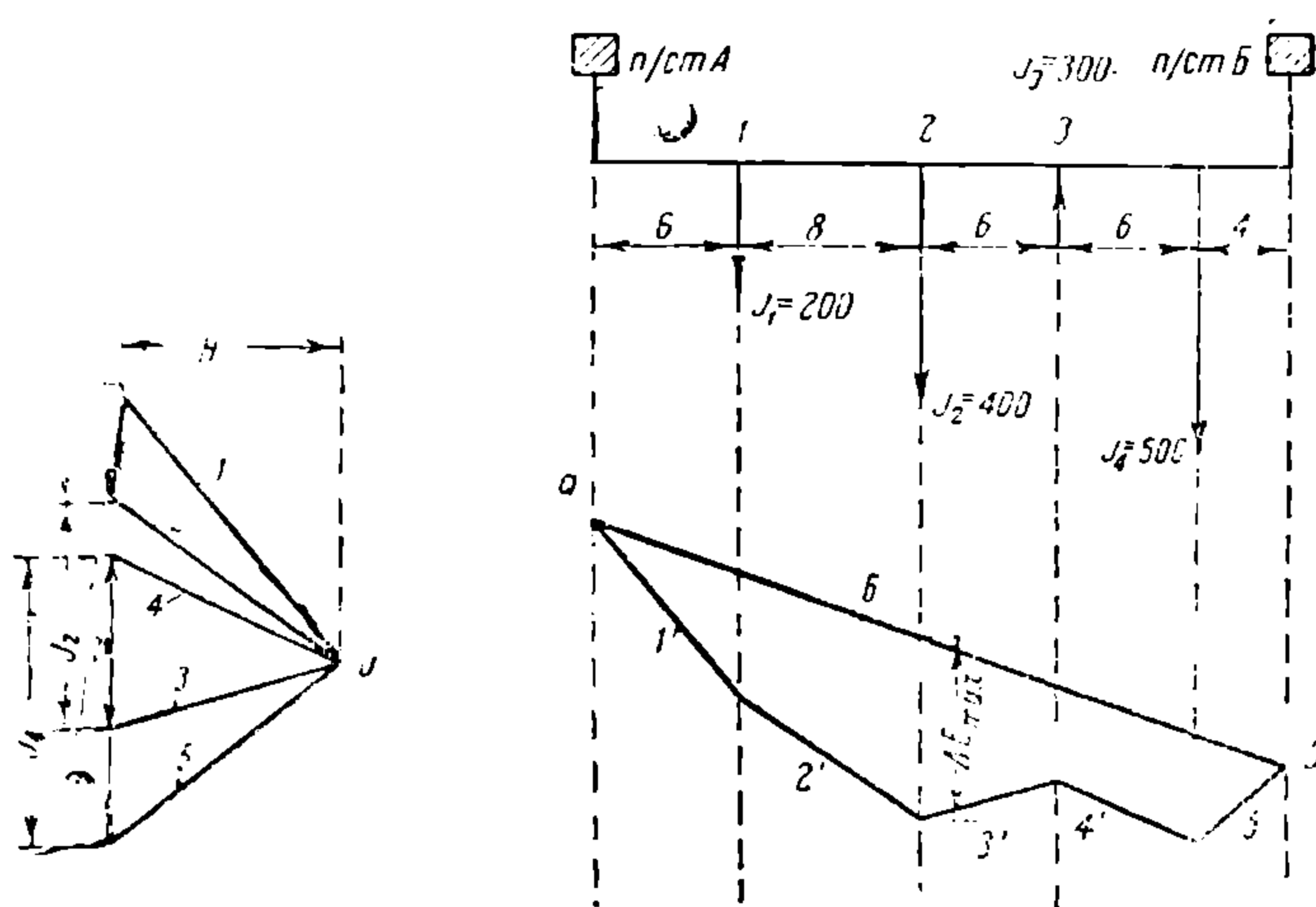


Рис. 158.

Следовательно, для определения среднего за период движения падения напряжения до токоприемника поезда, необходимо знать расположение поездов между тяговыми подстанциями и токи, потребляемые ими в каждый отдельный момент движения.

Определение местонахождения поездов относительно тяговых подстанций в каждый момент движения легко может быть произведено по графику движения поездов.

Действительно, так как график движения поездов строится в координатах времени и пути, причем преимущественно по оси абсцисс—время, а по оси ординат—путь, то, проводя через определенные промежутки времени сечения, параллельные оси пути, пересекаем линии движения поездов и, снеся точки пересечения на ось пути, получаем в масштабе пути расстояния поездов от тех или других отдельных пунктов.

Зная местонахождение тяговых подстанций на отдельных пунктах, легко могут быть определены расстояния поездов от тяговых подстанций.

Если на том же графике движения нанести по оси пути кривую расхода тока поездов по перегону в функции пути, т. е. $J=f(s)$, построенную при производстве тяговых расчетов, то тогда определятся и токи, потребляемые поездами в каждый момент движения.

В том случае, когда тяговые расчеты по определению скоростей движения, времени хода и расхода тока производились не графическим, а графо-аналитическим методом, расход тока $J=f(s)$, в зависимости от пути, изобразится на графике в виде ступенчатой ломанной линии, конечно не сплошной, а на тех элементах пути, где поезд потребляет ток. Для графиков пригородного движения с мотор-вагонной тягой следует иметь кривую расхода тока в функции пути из произведенных тяговых расчетов графическим методом.

Для магистральных жел. дор. с электровагонной тягой наличие кривой $J=f(s)$ из тяговых расчетов желательно, но не является обязательно необходимым.

Для удобства нахождения токов, потребляемых поездами, идущими в том или другом направлении, кривую $J=f(s)$ лучше располагать по обеим сторонам графика для каждого направления отдельно.

На рис. 159 приведен вид графика движения на однопутном участке в наиболее интенсивные часы движения поездов с построенными по обеим сторонам графика кривыми $J=f(s)$ для каждого направления движения отдельно.

Проведя на графике сечения $I—I$ и снося точки пересечения поездов a, b, c на соответствующие направлению движения поездов кривые $J=f(s)$, находим токи, потребляемые каждым поездом в этот момент движения.

Расстояние же поездов относительно тяговых подстанций, расположенных на ст. А и на раз. Б, определяются графически отрезками пути.

Во втором сечении $II—II$ с изменением положения поездов изменились и токи, потребляемые поездами, при этом один из поездов, находящихся между подстанциями, не потребляет ток.

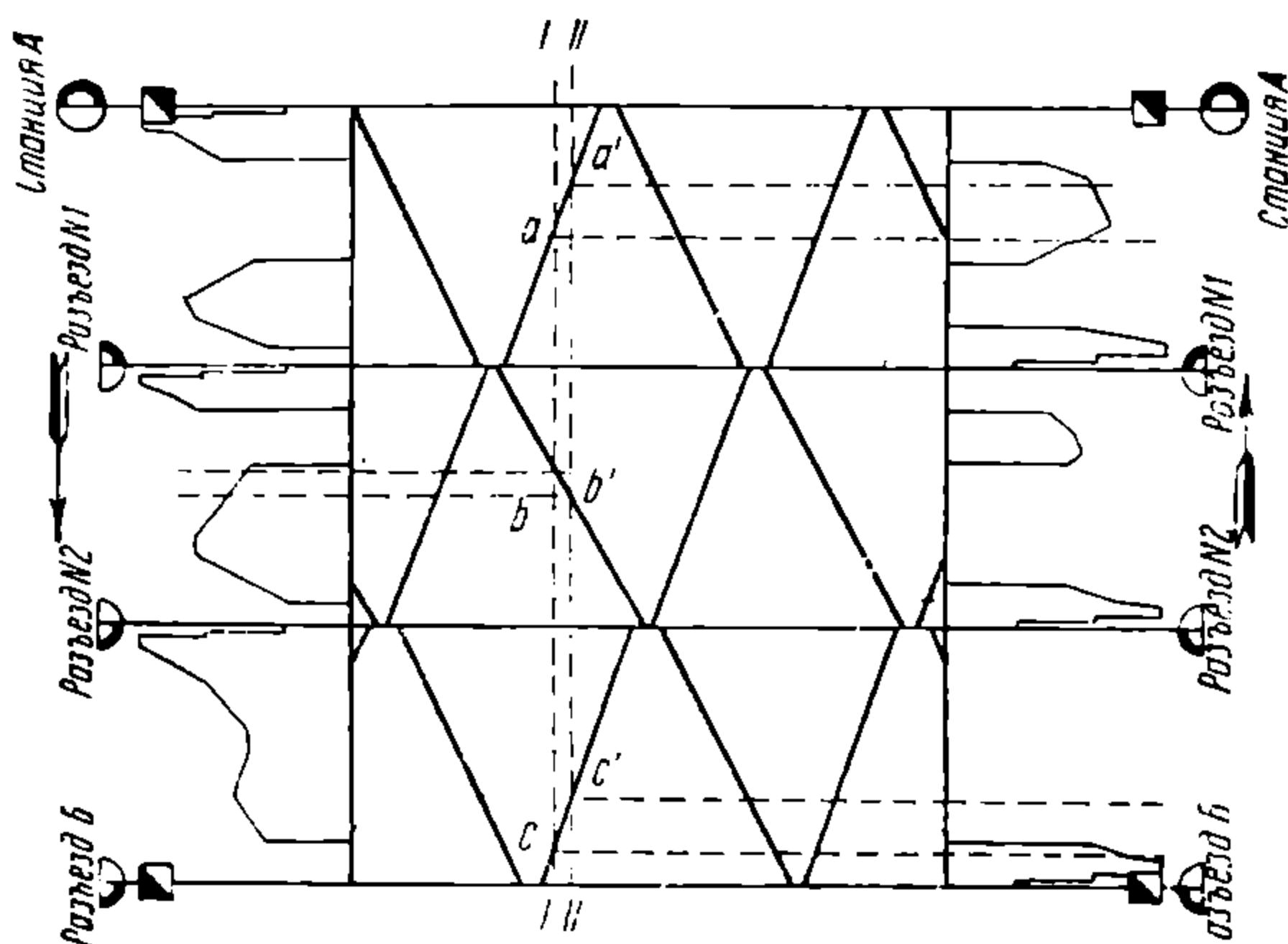


Рис. 159.

Таким образом для целого ряда сечений графика могут быть установлены токи, потребляемые поездами, и расположение последних относительно подстанций в каждый момент времени, соответствующий сечению, а по ним — определены значения моментов сил тока.

Определение моментов сил тока в каждом сечении может быть произведено или путем построения диаграммы распределения токов по участкам между поездами или путем заполнения расчетных данных в составляемой для этой цели таблице. Существуют несколько форм вспомогательных таблиц, позволяющих ускорить и облегчить подсчет моментов сил тока для каждого сечения.

Ниже приводится одна из форм вспомогательных таблиц.

Таблица 28

№№ сечений	№№ поезда	Сила тока, потр. кажд. поезд. в амп. J	Подстанция А			Подстанция Б		$\Sigma J l$ амп. км до точки раздела тока
			Расст. поезда до подстанции Б. l^B км	$\frac{l^B}{L}$	$J \cdot \frac{l^B}{L}$ сила тока подстанции А амп.	Расстояние поезда до подстанции А l^A км	Сила тока подстанции Б $J - J \frac{l^B}{L}$	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
I	702	300	21,0	0,70	210	9,0	90	2 700
	703*	$200 \left\{ \frac{70}{130} \right.$	12,0	0,40	80	18,0	120	1 260
	707	400	6,1	0,20	80	24,0	320	
900					370		530	3 960

Последовательность производства подсчетов и определение $\Sigma J l$ видно из таблицы. В графе 2 поезд 703, дающий точку раздела токов подстанций, обозначен знаком *.

При расчетах контактной сети обычно сечения проводятся не по всему графику, а для периода наиболее интенсивного движения и наличия наиболее тяжелых поездов, потребляющих большие токи.

Продолжительность расчетного периода зависит от характера графика и может быть от 30 мин. до 2 часов. Сечения проводятся через промежуток времени, равный 1 или 2 минутам.

Наиболее желательным, а для пригородных поездов — обязательным следует считать интервал времени между сечениями 1 мин., так как при этом попадают в сечения моменты трогания поездов

с места на остановочных пунктах, что позволяет учесть пусковые токи поездов. Для графиков движения магистральных жел. дор. с электровозной тягой сечения могут проводиться через две минуты, но при этом, если моменты трогания поездов не попадают в эти сечения, проводятся дополнительные, соответствующие моментам трогания.

По установленным за расчетный период времени значениям моментов силы тока для каждого сечения строится диаграмма, по оси ординат которой откладываются значения ΣI , выраженные в *амп. км*, а по оси абсцисс—время в мин.

На рис. 160 приводится вид диаграммы моментов сил тока в функции времени за два часа интенсивного движения поездов.

Имея диаграмму моментов сил тока, не трудно установить среднее значение ΣI_{cp} за весь данный период времени. ΣI_{cp} определится как сумма мгновенных моментов сил тока (ординат) за весь период, деленная на число сечений, т. е.

$$\Sigma I_{cp} = \frac{\sum_{j=1}^n I_j}{n} \text{ амп. км.}$$

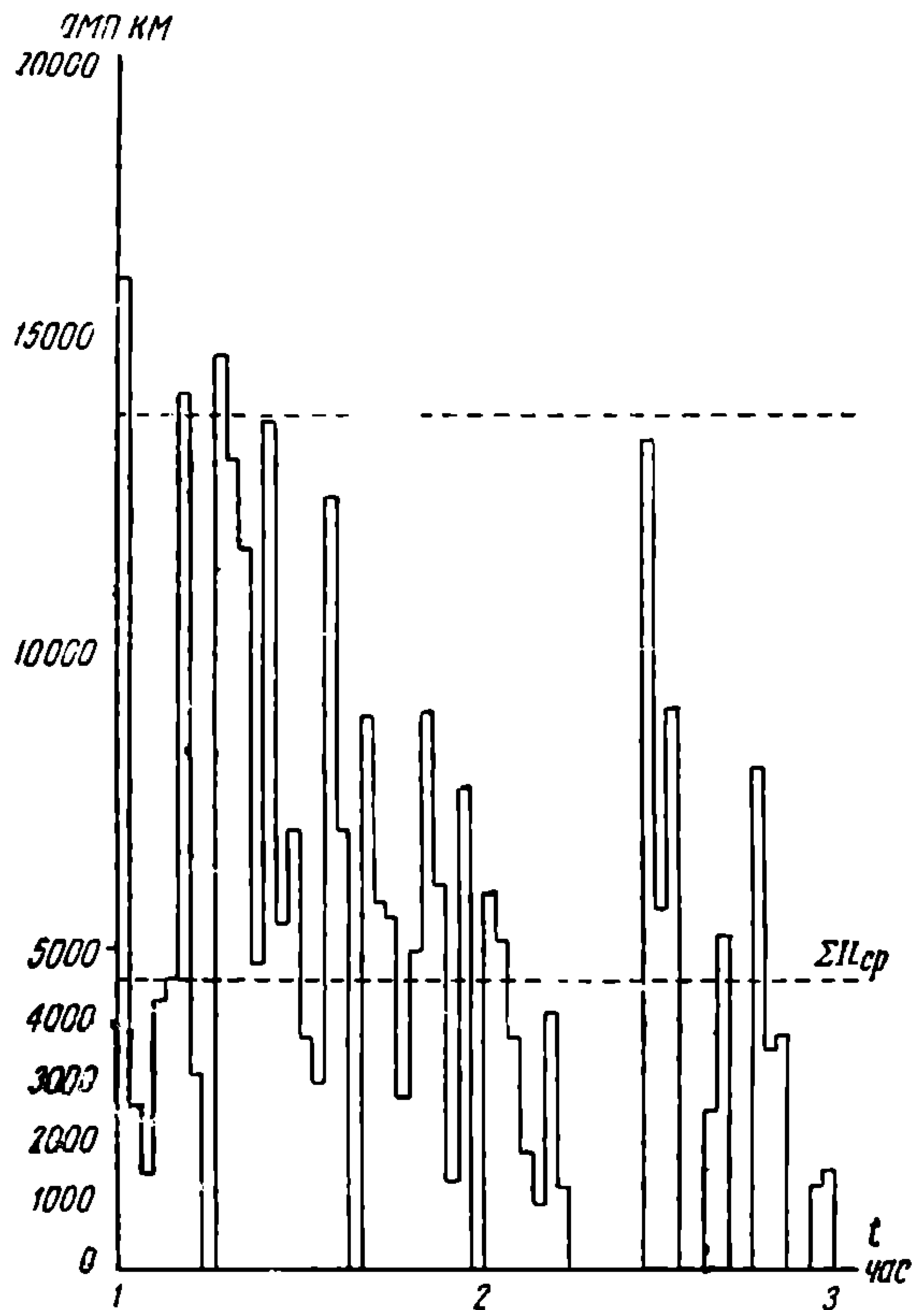


Рис. 160.

В данном частном случае, изображенном на диаграмме,

$$\Sigma I_{cp} = 4700 \text{ амп. км.}$$

Как было установлено ранее, сечение рабочих проводов контактной сети определяется из выражения:

$$q = \frac{\rho \Sigma I_{cp}}{\Delta E_{cp} - R \Sigma I_{cp}},$$

где ρ —удельное сопротивление медного провода, равное $\cong 17,5 \Omega/\text{мм}^2/\text{км}$.

R — сопротивления рельсовой цепи на 1 км.

ΔE_{cp} — среднее допустимое падение напряжения, которое, как указывалось ранее, может быть принято равным 300 вольт.

Принимая условно за неизвестность типа рельса сопротивление рельсовой цепи $R = 0,02 \text{ } \Omega/\text{км}$, и подставляя значение ΣI_{cp} , сечение рабочих проводов контактной сети в медном эквиваленте для приводимого частного случая будет равно

$$q = \frac{17,5 \cdot 4700}{300 - 0,02 \cdot 4700} = 400 \text{ мм}^2.$$

Для принятия данного сечения необходимо проверить достаточно ли оно с точки зрения допустимых максимальных мгновенных падений напряжения.

Из диаграммы рис. 160 видно, что значения ΣI в отдельные моменты достигают величины 15 000 амп. км.

Если за расчетную величину принять наибольшее максимальное значение, то в этом случае потребуется большое сечение проводов, которое мало будет использовано за все время движения. Поэтому за расчетную величину принимается значение, среднее из максимумов, повторяющихся 4-5 раз за часы расчетного интенсивного периода движения

Для нагрузки, изображенной на диаграмме, расчетная величина ΣI_{max} может быть принята равной 14 000 амп. км.

При сечении рабочих проводов контактной сети, равном 400 мм² и расчетном значении $\Sigma I_{max} = 14 000 \text{ амп. км}$, падение напряжения определится из выражения

$$\Delta E_{max} = \left(\frac{\rho}{q} + R \right) \Sigma I_{max}$$

и равно

$$\Delta E_{max} = \left(\frac{17,5}{400} + 0,02 \right) 14 000 = 894 \text{ в.}$$

Это составляет от нормального напряжения на токоприемнике поезда 3 000 в

$$\frac{894 \cdot 100}{3 000} = 29,8\% < 35\%,$$

что меньше максимально допустимого падения напряжения. Следовательно определенное ранее по среднему падению напряжения сечение 400 мм² может быть принято.

Это потребное сечение рабочих проводов контактной сети определено в медном эквиваленте.

В целях экономии меди на однопутных участках, как указывалось ранее, обычно подвешивается один медный контактный провод, а остальное необходимое рабочее сечение передается на другие провода. Если несущий трос стальной, то в силу его малой

проводимости в рабочее сечение проводов контактной сети он не включается.

При простой цепной подвеске недостающее сечение восполняется подвешиваемыми на опорах контактной сети с другой стороны усиливающими алюминиевыми фидерами. Таким образом в нашем случае сечение усиливающих алюминиевых проводов в медном эквиваленте должно быть равно

$$400 - 100 = 300 \text{ мм}^2.$$

Действительное же сечение алюминиевых проводов, вследствие их большего сопротивления, должно быть

$$300 \cdot 1,65 = 495 \text{ мм}^2.$$

Из числа стандартных сечений алюминиевых проводов (ОСТ 5363), приведенных ранее в § 3, принимаем

$$2 \cdot A 185 + 1A 120 = 490 \text{ мм}^2,$$

что в медном эквиваленте составляет $490 : 1,65 = 297 \text{ мм}^2$. При этих принятых сечениях рабочих проводов контактной сети, составляющих в медном эквиваленте 397 мм^2 , среднее падение напряжения будет равно:

$$\Delta E_{cp} = \left(\frac{\rho}{q} + R \right) \Sigma J l_{cp} = \left(\frac{17,5}{397} + 0,02 \right) \cdot 4700 = 300,8 \text{ в},$$

что составляет $\frac{300,8 \cdot 100}{3000} \cong 10\%$.

Максимальное падение напряжения

$$\Delta E_{max} = \left(\frac{\rho}{q} + R \right) \Sigma J l_{max} = \left(\frac{17,5}{397} + 0,02 \right) 14000 = 896 \text{ в},$$

что составляет $\frac{896 \cdot 100}{3000} = 29,9\%$.

Изложенный метод расчета потребного сечения рабочих проводов контактной сети для заданных размеров движения является наиболее точным методом расчета, но требует построения коммерческого графика движения, кривых потребления тока поездами в зависимости от пути и вызывает большое количество подсчетов.

В предварительных приближенных расчетах может быть применен приближенный метод расчета, который не вызывает необходимости ни в построении коммерческого графика движения, ни в построении кривых $J = f(s)$, так как расчет при этом методе производится аналитически.

§ 42. Приближенный метод расчета контактной сети

Приближенный метод расчета рабочей сети исходит из принятия допущений, которые выражаются в том, что движение поездов по всему участку дороги происходит с одинаковой равномерной скоростью и при непрерывном потреблении тока, величина которого равна средней величине за время прохода поездом участка с учетом тока на трогание и прочих дополнительных расходов на движение.

Проф. А. Б. Лебедев на основании анализа нагрузки контактной сети при наиболее характерных и часто встречающихся схемах движения поездов на однопутных, а также и на двухпутных линиях, в последних при параллельном соединении контактных проводов двух путей, установил формулы, позволяющие определить сечение рабочей сети. При одностороннем питании участков контактной сети проф. Лебедев рекомендует следующую формулу

$$\Delta E_{cp} = \left(2 \Delta i L + \frac{J_{cp}}{n} \right) \frac{r_{км} L}{6},$$

где ΔE_{cp} — среднее расчетное допускаемое падение напряжения,
 Δi — средняя линейная удельная нагрузка сети в $амп/км$,
 L — длина консольного участка контактной сети в $км$,
 n — число поездов, одновременно находящихся на участке,
 J_{cp} — средний поездной ток в $амп$,
 $r_{км}$ — сопротивление рабочих проводов и рельсовой цепи в Ω на $км$.

Из приведенной формулы величина $r_{км}$ выражается уравнением

$$r_{км} = \frac{6 \Delta E_{cp}}{\left(2 \Delta i L + \frac{J_{cp}}{n} \right) L}.$$

Так как

$$r_{км} = r_{пр/км} + r_{р/км} = \left(\frac{\rho}{q} + R \right),$$

то подставляя это значение, имеем

$$r_{км} = \frac{\rho_{км}}{q} + R = \frac{6 \Delta E_{cp}}{\left(2 \Delta i L + \frac{J_{cp}}{n} \right) L}.$$

Откуда q — сечение рабочих проводов контактной сети будет определяться выражением:

$$q = \frac{\rho_{км} \left(2 \Delta i L + \frac{J_{cp}}{n} \right) L}{6 \Delta J_{cp} - R \left(2 \Delta i L + \frac{J_{cp}}{n} \right) L} \quad (мм^2).$$

Величина Δi — удельная нагрузка сети в *амп/км*, равн

$$\Delta i = \frac{J_{cp}' n' + J_{cp}'' n''}{L},$$

где J_{cp}' — средний поездной ток для поездов одного направления, определяемый из выражения

$$J_{cp}' = (1 + \beta) \frac{\Sigma J' t'}{T_k'}$$

T_k' — полное время прохода поездом участка с учетом времени на разгон и замедление и на стоянки, вызываемые условиями пропуска поездов,

β — коэффициент, учитывающий в процентах дополнительный расход энергии на трогание поездов и прочие нужды, вызываемые движением, как-то: управление поездом, освещение и т. д., определяемые в тяговых расчетах,

n' — число поездов одного направления, одновременно находящихся на участке,

n'' — то же, для обратного направления,

n — число всех поездов, одновременно находящихся на участке

$$n = n' + n'';$$

J_{cp}'' — средний поездной ток для обратного направления, равный аналогично предыдущему:

$$J_{cp}'' = (1 + \beta) \frac{\Sigma J'' t''}{T_k''}.$$

Средний поездной ток для участка:

$$J_{cp} = \frac{J_{cp}' n' + J_{cp}'' n''}{n' + n''} = \frac{J_{cp}' n' + J_{cp}'' n''}{n}.$$

Приведенная формула определения сечения проводов контактной сети может быть принята и для случая применения на участке рекуперации, для чего необходимо учитывать рекуперлируемые токи поездов со знаком минус.

При двухстороннем питании участка контактной сети как для однопутных линий, так и двухпутных линий с параллельным соединением проводов, проф. А. Б. Лебедев рекомендует следующую формулу:

$$\Delta E_{cp} = \left(\frac{\Delta i L}{2} + \frac{J_{cp}}{n} \right) \frac{r_{кж} L}{6}.$$

Обозначение величин, входящих в эту формулу, то же, что принято ранее.

Из этой формулы величина $r_{км}$ определяется выражением:

$$r_{км} = \frac{6 \Delta E_{ср}}{\left(\frac{\Delta i L}{2} + \frac{J_{ср}}{n} \right) L}$$

Значения Δi и n , входящие в данную формулу, могут быть выражены через величины, получаемые из схемы размещения раздельных пунктов по линии жел. дор. Рассмотрим однопутный участок, приведенный на рис. 161.

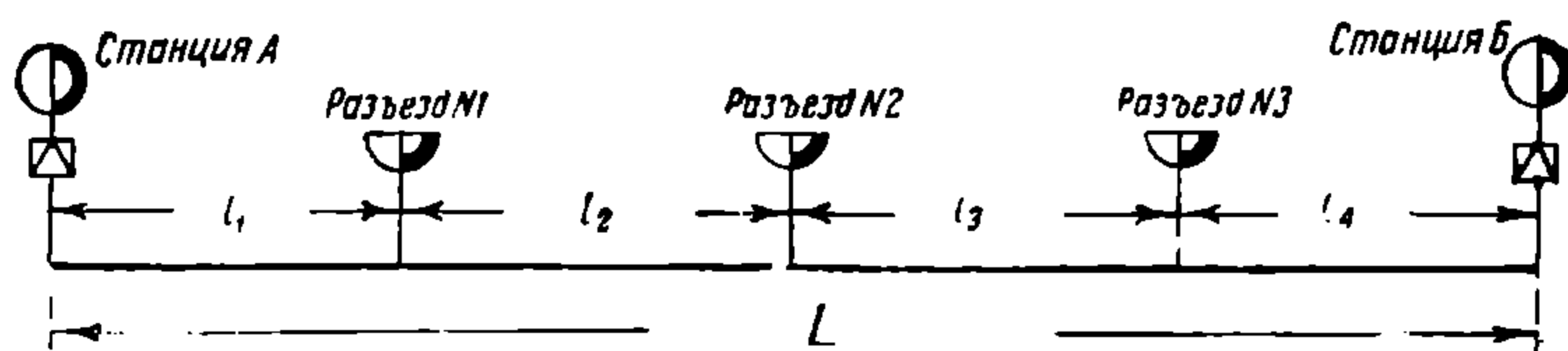


Рис. 161.

Тяговые подстанции находятся на станции А и Б на расстоянии L км.

l_1, l_2, l_3, l_4 —расстояния в км между действующими раздельными пунктами, открытыми по условию потребной пропускной способности дороги.

Среднее расстояние между действующими раздельными пунктами равно

$$l_{ср} = \frac{l_1 + l_2 + l_3 + l_4}{4}.$$

При беспакетном движении число поездов, могущее находиться одновременно на участке между тяговыми подстанциями, равно

$$n = \frac{L}{l_{ср}}.$$

Величина удельной нагрузки контактной сети на км может быть выражена через

$$\Delta i = \frac{J_{ср} \cdot n}{L} = \frac{J_{ср} \cdot L}{L l_{ср}} = \frac{J_{ср}}{l_{ср}} \text{ ампер/км.}$$

Подставляя полученное значение в приведенную формулу имеем:

$$r_{км} = \frac{6 \Delta E_{ср}}{\left(\frac{\Delta i L}{2} + \frac{J_{ср}}{n} \right) L} = \frac{6 \Delta E_{ср}}{\left(\frac{J_{ср}}{l_{ср}} \cdot \frac{L}{2} + \frac{J_{ср}}{n} \right) L} = \frac{6 \Delta E_{ср}}{J_{ср} L \left(\frac{n}{2} + \frac{1}{n} \right)},$$

заменяв n через $\frac{L}{l_{cp}}$ и произведя преобразования, получим:

$$r_{км} = \frac{6 \Delta E_{cp}}{J_{cp} L \left(\frac{L}{l_{cp} \cdot 2} + \frac{l_{cp}}{L} \right)} = \frac{12 \Delta E_{cp} \cdot l_{cp}}{J_{cp} (L^2 + 2l_{cp}^2)}$$

$$r_{км} = \left(\frac{\rho}{q} + R \right) = \frac{12 \Delta E_{cp} l_{cp}}{J_{cp} (L^2 + 2l_{cp}^2)}.$$

Откуда, произведя преобразования, получим выражение для определения необходимого сечения проводов в медном эквиваленте

$$q = \frac{\rho_{км} J_{cp} (L^2 + 2l_{cp}^2)}{12 \Delta E_{cp} - R J_{cp} (L^2 + 2l_{cp}^2)} \text{ (мм}^2\text{)}.$$

Для двухпутного участка, вследствие изменения значения n и Δi выражение для определения q будет иметь другой вид.

Число поездов, находящихся одновременно на участке, равно

$$n = \frac{2 L}{l'_{cp}}.$$

где l'_{cp} —среднее расстояние между действующими блок-постами.
Величина

$$\Delta i = \frac{2 J_{cp}}{l'_{cp}}$$

Подставляя значения Δi и n в первоначальную формулу и произведя преобразования, получим:

$$r_{км} = \frac{6 \Delta E_{cp}}{\left(\frac{\Delta i L}{2} + \frac{J_{cp}}{n} \right) L} = \frac{6 \Delta E_{cp}}{L \left(\frac{J_{cp} L}{l_{cp}} + \frac{J_{cp} l_{cp}}{2 \cdot L} \right)} = \frac{12 \Delta E_{cp} l_{cp}}{J_{cp} (2 L^2 + l_{cp}^2)}.$$

Величина $r_{км}$ представляет собой сопротивление рабочих проводов и рельсовой цепи двух путей, при параллельном соединении последних

$$r_{км} = \frac{\rho_{км}}{q} + R'',$$

где q —сечение всех рабочих провод сети в мм²,

R'' —сопротивление на 1 км двух рельсовых путей, равное

$$R'' = \frac{R}{2}.$$

Заменяя $r_{км}$ через выражение

$$\frac{\rho_{км}}{q} + R''$$

и произведя преобразование, получим

$$q = \frac{\rho_{км} J_{ср} (2L^2 + l_{ср}^2)}{12 \Delta E_{ср} l_{ср} - R'' J_{ср} (2L^2 + l_{ср}^2)} \text{ (мм}^2\text{)}.$$

При парном графике движения, т. е. $n' = n''$, величина среднего поездного тока может определяться из выражения

$$J_{ср} = (1 + \beta) \frac{\Sigma J' t' + \Sigma J'' t''}{T_k} = (1 + \beta) \frac{\Sigma J t}{T_k},$$

где $\Sigma J t$ — расход тока в *амп. мин.* на движение поезда туда и обратно по всему участку.

T_k — полное время хода поезда туда и обратно в мин. с учетом разгона и замедления и времени стоянок на промежуточных раздельных пунктах по техническим условиям пропуска поездов.

В том случае, если на линии жел. дороги имеются участки, резко выделяющиеся по профилю от средних условий профиля линии, как напр. сосредоточенные на значительном протяжении под'емы, то определение величины среднего поездного тока и расчет сети следует производить для таких участков отдельно.

Как указывалось ранее, при установлении этих формул принято положение, что поезда непрерывно в течение всего периода движения потребляют некоторые средние токи. В действительности же в некоторые моменты движения поезда не потребляют ток (движение по скатам), а другие потребляют токи, величина которых больше значения среднего поездного тока.

Следовательно, имеется неравномерное потребление тока, а поэтому величина среднего падения в этот момент движения может быть больше.

Если обозначим через T_a время хода поезда под током, то отношение $\frac{T_a}{T_k}$ будет характеризовать равномерность потребления тока.

Чем больше неравномерность потребления тока, т. е. чем меньше отношение $\frac{T_a}{T_k}$, с одной стороны, и чем меньше число поездов с другой — тем больше будет отклонение и неточность в определении сечения проводов, так как действительное падение напряжения $\Delta E_{ср}$ при тех же средних нагрузках будет больше.

В целях учета неравномерности потребления тока поездами необходимо вводить к величине $\Delta E_{ср}$ поправочный коэффициент, величина которого будет изменяться в зависимости от значения $\frac{T_a}{T_k}$ и числа поездов, находящихся одновременно между подстанциями.

Ориентировочные значения поправочных коэффициентов приводятся ниже в таблице 29.

Таблица 29

Значения $\frac{T_a}{T_k}$	Число поездов между смежными подстанциями				
	1	2	4	6	10
	Величина поправочного коэффициента				
$\frac{T_a}{T_k} = 3/4$	1,5	1,35	1,25	1,15	1,06
$\frac{T_a}{T_k} = 1/2$	2	1,75	1,5	1,3	1,1
$\frac{T_a}{T_k}$	3	2,2	1,9	1,65	1,25

Инж. В. Е. Розенфельд, на основе математической теории вероятности, дает следующие выражения для определения величины поправочного коэффициента, которые необходимо вводить к теоретическому падению напряжения, определяемому из условия равномерной нагрузки сети.

При двухстороннем питании:

$$\kappa_1 = 1 + \frac{2\alpha - 1}{n}.$$

При одностороннем питании:

$$\kappa_1 = 1 + \frac{3\alpha - 2}{2n}.$$

где n — число поездов, одновременно находящихся на линии между смежными подстанциями,

α — отношение $= \frac{T_k}{T_a}$, обратное приводимому ранее. Теоретическая

величина среднего падения напряжения может быть выражена, исходя из следующих положений.

При равномерно распределенной нагрузке и при одностороннем питании падение напряжения в контактной сети увеличивается от подстанции по параболической кривой.

На рис. 162 показано это изменение падения напряжения.

На расстоянии x от тяговой подстанции теоретическая величина падения будет равна

$$\Delta E_x^T = \frac{\Delta i (2 L_0 - x) \cdot x \cdot r_{км}}{2}$$

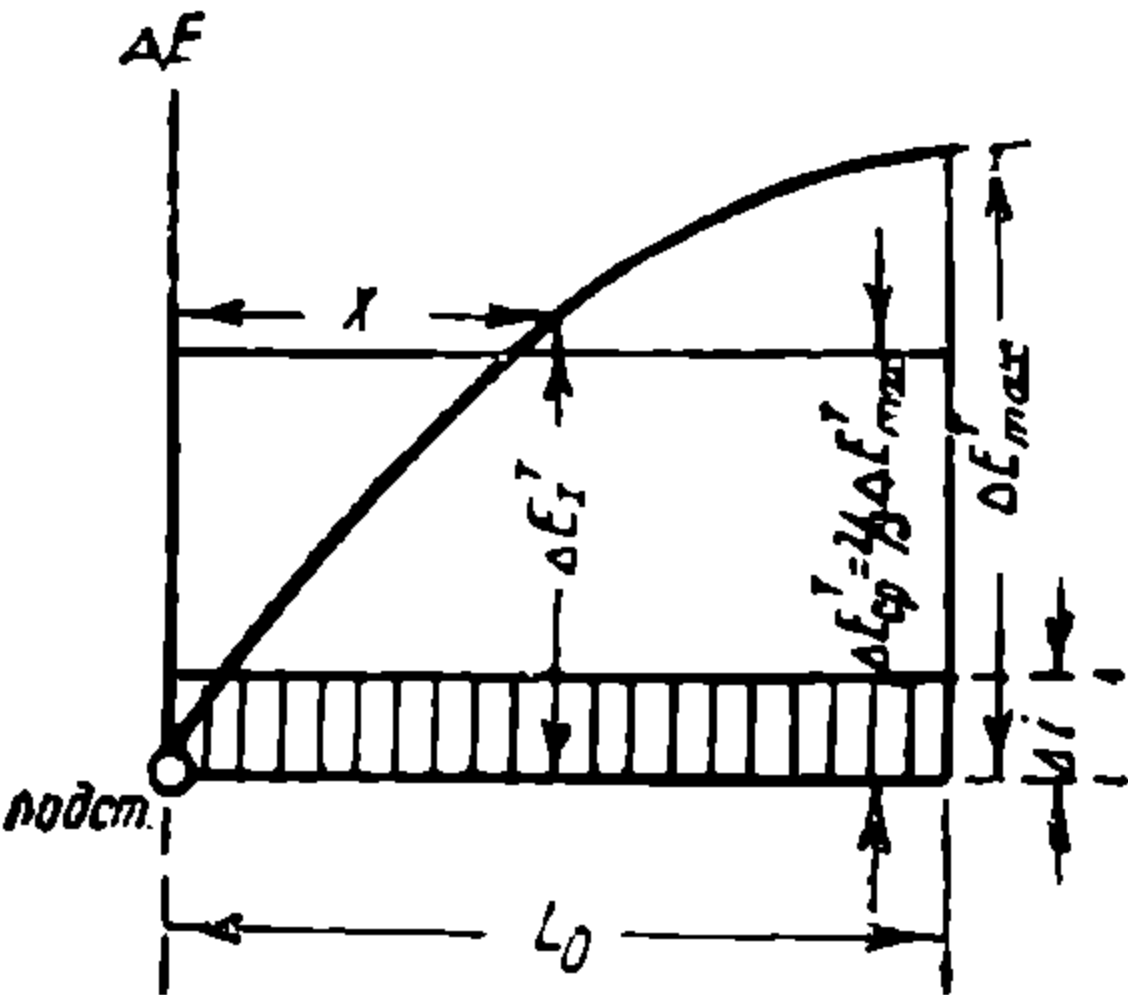


Рис. 162.

Среднее падение напряжения, как средняя ордината параболы, равна $\frac{2}{3}$ максимальной ординаты. Следовательно:

$$\Delta E_{cp}^T = \frac{2}{3} \cdot \Delta E_{max}^T = \frac{2}{3} \cdot \frac{\Delta i L_o^2 r_{км}}{2} = \frac{\Delta i \cdot L_o^2 r_{км}}{3}$$

При числе n_o поездов, одновременно находящихся на участке L_o с средним поездным током J_{cp}

$$\Delta i = \frac{n_o J_{cp}}{L_o}.$$

Подставляя значение Δi и вводя выражение поправочного коэффициента, учитывающего неравномерность потребления тока поездом, получаем

$$\Delta E_{cp} = \kappa_1 \Delta E_{cp}^T = \left(1 + \frac{3\alpha - 2}{2n_o}\right) E_{cp}^T = \left(1 + \frac{3\alpha - 2}{2n_o}\right) \cdot \frac{J_{cp} n_o L_o r_{км}}{3}$$

Откуда:

$$r_{км} = \frac{3 \Delta E_{cp}}{J_{cp} n_o L_o \left(1 + \frac{3\alpha - 2}{2n_o}\right)} \text{ (}\Omega/\text{км)}.$$

При двухстороннем питании участка, его можно расчленить на 2 симметричных участка одностороннего питания, тогда длина участка с двухсторонним питанием $L = 2L_o$ и число поездов, одновременно находящихся между тяговыми подстанциями, равно

$$n = 2n_o.$$

Подставляя в приведенное ранее уравнение значения

$$n_o = \frac{n}{2} \text{ и } L_o = \frac{L}{2}$$

и вводя новое выражение поправочного коэффициента при двухстороннем питании, получаем

$$r_{км} = \frac{12 \Delta E_{cp}}{J_{cp} n L \left(1 + \frac{2\alpha - 1}{n}\right)} \text{ (}\Omega/\text{км)}.$$

Приведенные формулы применимы как для однопутных, так и двухпутных участков; в последнем случае — лишь при электрическом параллельном (многократном) соединении двух путей. При раздельном питании каждого пути двухпутного участка расчет следует производить для каждого пути отдельно, при этом число поездов n_1 необходимо брать по каждому направлению.

Таким образом во всех приведенных выше случаях расчета, по принятому среднему допускаемому падению напряжения мо-

жет быть определено значение $r_{км}$ —сопротивление рабочей сети и рельсовой цепи на один км, а по нему и необходимое сечение проводов контактной сети

$$r_{км} = \frac{\rho_k}{q} + R_{км},$$

откуда

$$q = \frac{\rho_{км}}{r_{км} - R_{км}} \text{ (мм}^2\text{)}$$

Необходимое сечение рабочих проводов контактной сети в медном эквиваленте определится из выражения

$$q = \frac{17,5}{r_{км} - R_{км}}$$

Величина сопротивления на 1 км рельсовой цепи $R_{км}$, при совершенно изолированных от земли рельсах, определяется из выражения, приведенного в § 36. В действительности же рельсы не являются абсолютно изолированными от земли и какая-то часть тока, преодолев переходное сопротивление шпал и баласта, уходит в землю.

Следовательно, величина R будет меньше, что даст уменьшение сечения проводов q .

Степень утечки тока в землю зависит от величины переходного сопротивления.

Величина переходного сопротивления, помимо рода баласта, зависит от климатических условий и от многих других факторов, трудно поддающихся точному определению. По исследованиям американского инж. Шепарда, изложенным в брошюре № 127, изданной правительственным Бюро стандартов США, величина переходного сопротивления одиночного пути на 1 км колеблется в следующих величинах:

при хорошей погоде и хорошем баласте 3,0—4,6 $\Omega/\text{км}$,

при мокром баласте 0,92—1,5 $\Omega/\text{км}$.

Наибольшее переходное сопротивление имеет верхнее строение из щебеночного баласта и шпал, пропитанных смесью креозота (25%) и газалина (75%). При исследовании явлений электролиза на Сурамском перевале и установлении мероприятий по борьбе с электролизом акад. Чернышев принимает в расчетах при щебеночном баласте величину переходного сопротивления 1,6 $\Omega/\text{км}$.

При точных расчетах сечения проводов контактной сети при электрификации существующих жел. дор. величину переходного сопротивления следует принимать в каждом конкретном случае на основании проведенных на дороге опытов и исследований и с учетом климатических условий района дороги.

В предварительных проектах при отсутствии определенных данных при приближенном методе расчета сечений проводов контактной

сети величина переходного сопротивления на 1 км одиночного пути может быть принята равной 1,5 $\Omega/\text{км}$. Учитывая утечку тока в землю, величина фактического сопротивления рельсовой цепи на 1 км $R_{\text{км}}^{\partial}$, вводимая в расчет, будет равна

$$R_{\text{км}}^{\partial} = k_2 R_{\text{км}},$$

где k_2 —коэффициент, учитывающий уменьшение сопротивления рельсовой цепи.

Величина коэффициента k_2 зависит от величины переходного сопротивления, типа рельсов (их сечения) и от расстояния между тяговыми подстанциями. Коэффициент k_2 может быть ориентировочно определен из следующей формулы (инж. Денисова)

$$k_2 = 1 - \frac{2}{3} \cdot \frac{\rho_n R_{\text{км}} L_i^2}{8 + \rho_n \cdot R_{\text{км}} \cdot L_i^2},$$

где ρ_n —величина, обратная переходному сопротивлению на 1 км пути и равная $\rho_n = \frac{1}{r_{\text{пер}}}$,

$R_{\text{км}}$ —сопротивление рельсовой цепи на 1 км,

L_i —расстояние от подстанции до точки раздела тока.

В приближенном методе расчета сечений проводов величина L_i при двухстороннем питании может приниматься ориентировочно равной половине расстояния между тяговыми подстанциями, а при одностороннем питании—равной длине участка, питаемого подстанцией.

§ 43. Проверка сечения проводов контактной сети по токам короткого замыкания

Проверка принятого расчетом сечения проводов контактной сети по токам короткого замыкания преследует цель выяснить обеспеченность правильной работы и выключения установленных на подстанции максимальных быстродействующих автоматов в случае какой-либо аварии в контактной сети (обрыв проводов). Величина тока короткого замыкания, получающаяся в этом случае, для обеспечения выключения максимальных быстродействующих автоматов должна быть больше максимального тока, при котором автомат выключает. Величина максимального тока, на который устанавливается автомат, рассчитывается, исходя из нормальных эксплуатационных толчков нагрузки.

Величина тока короткого замыкания J_k , который получается при аварии, зависит от полного сопротивления рабочих проводов контактной сети и рельсовой цепи, определяемого сечением проводов и расстоянием места аварии от тяговой подстанции, а также величиной сопротивления самих агрегатов, установленных на тя-

говой подстанции. Величина J_k может быть определена из выражения:

$$J_k = \frac{E_n}{L_k (r_{np/kм} + k_2 R_{км}) + R_{n/ст}} \quad (\text{амп}),$$

где E_n — напряжение на подстанции,

L_k — наибольшее расстояние от места аварии до тяговой подстанции.

$R_{n/ст}$ — сопротивление агрегатов подстанции.

Величина $R_{n/ст}$ зависит от характеристики подстанции и минимально включенной мощности п/ст за время работы ее при нормальном режиме участка. При ртутных выпрямителях величина $R_{n/ст}$ колеблется в среднем ориентировочно от 0,2—0,4Ω.

Как видно из приведенного выражения, величина J_k в сильной степени зависит от L_k и наиболее тяжелым моментом, дающим наименьшую величину тока короткого замыкания, будет случай при наибольшей величине L_k и отсутствии в этот момент на участке поездов. Установление принимаемой в расчет величины L_k производится на основании ряда подсчетов применительно к конкретной схеме секционирования контактной сети.

При двухстороннем питании и отсутствии на участке между тяговыми подстанциями контакторной будки, наиболее неблагоприятным случаем является короткое замыкание у противоположной подстанции.

При наличии контакторной будки опасным случаем вероятно будет короткое замыкание в месте ее расположения. Проверка сечения проводов по токам короткого замыкания может быть произведена по следующей формуле

$$\frac{E_n}{L_k \left(\frac{17,5}{q} + k_2 R_{км} \right) + R_{n/ст}} > 1 \cdot 10 J_{max},$$

где J_{max} — максимальный ток пиковой нагрузки подстанции в интенсивные часы движения.

При отсутствии конкретных данных в предварительных расчетах может быть применена следующая формула

$$\frac{0,9 E_n}{L_k \left(\frac{17,5}{q} + k_2 R_{км} \right)} \geq 1,10 k_3 J_{ср} n_k,$$

где q — сечение рабочих проводов сети в медном эквиваленте,
 k_2 — коэффициент, приводимый ранее и определяемый из выражения

$$k_2 = 1 - \frac{2}{3} \cdot \frac{\rho_n \cdot R_{км} \cdot L_k^2}{8 + \rho_n \cdot R_{км} \cdot L_k^2}$$

$J_{\text{ср}}$ — средний поездной ток,

n_k — число поездов на участке L_k в часы интенсивного движения,

0,9 — коэффициент, учитывающий понижение напряжения на подстанции при коротком замыкании,

k_3 — коэффициент, характеризующий отношение максимального тока подстанции в часы интенсивного движения к среднему току.

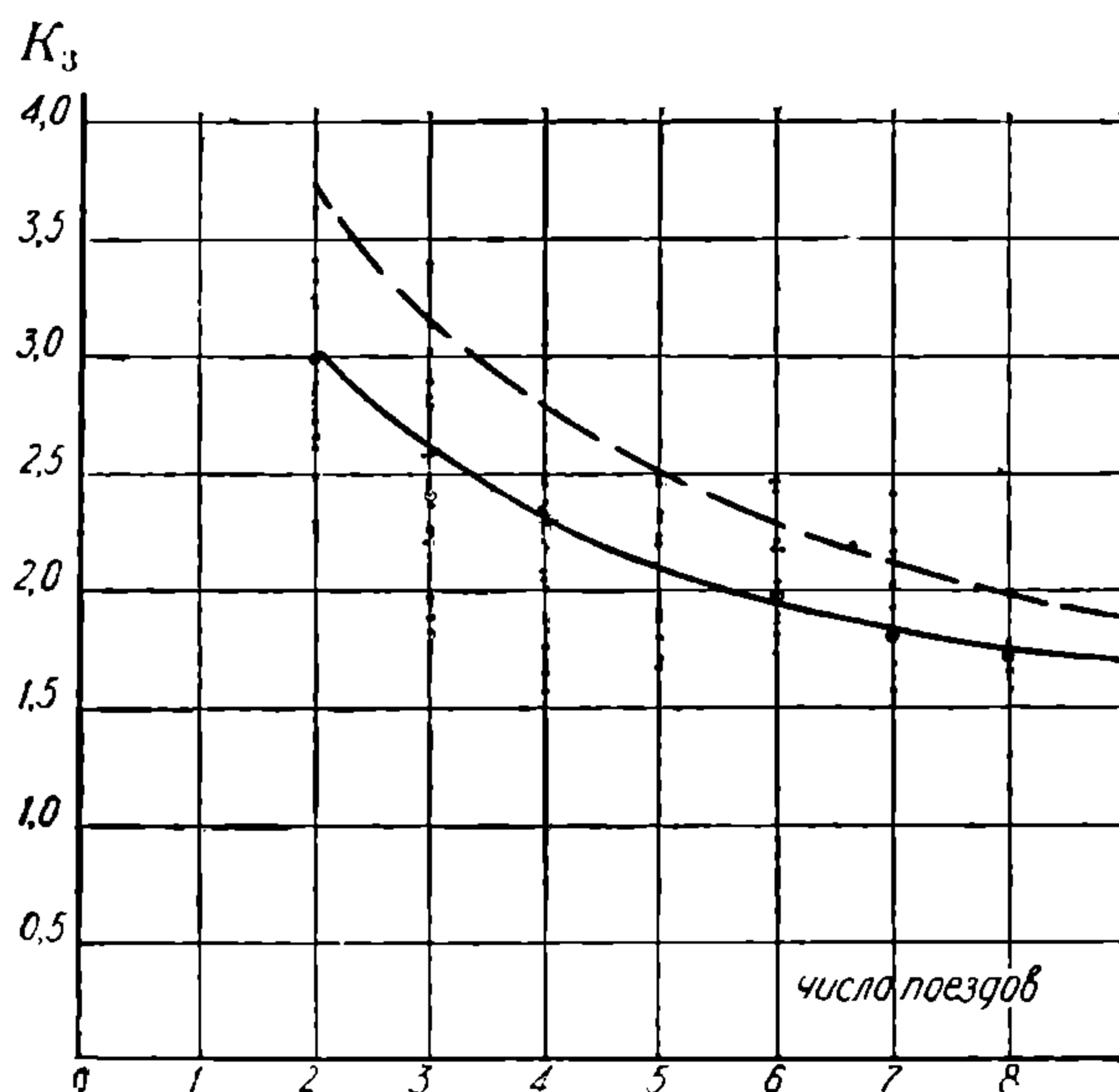


Рис. 163.

Величина k_3 приблизительно может быть определена по кривым $k_3 = f(n)$ (рис. 163), построенным инж. Рывкиным для случая $L = 30$ км и $\frac{T_k}{T_a} = 1,20$.

На рис. 163 кривая, проведенная сплошной линией, характеризует среднюю величину возможного эксплуатационного «пика», кривая, проведенная пунктиром — наибольшую величину.

§ 44. Общие сведения о расчете механической прочности контактной сети

Контактная сеть электрических жел. дор. в механическом отношении должна удовлетворять условиям прочности, надежного и правильного снятия тока пантографом электровоза при больших скоростях движения, для чего требуется сохранение определенного положения контактного провода по отношению к токоприемнику, независимо от внешних условий (колебания температуры, ветра, гололеда и т. д.). Механический расчет контактной сети состоит из расчета цепной подвески и расчета поддерживающих опорных конструкций. Расчет цепной подвески заключается в

определении, при данной конструкции цепной подвески, наибольшего натяжения в несущем тросе при самых неблагоприятных условиях и бокового отклонения контактного провода под действием ветра. Последнее, в силу определенных допустимых отклонений контактного провода от оси пути, определяет величину пролета между опорами.

В различных системах подвески изменения тяжения в несущем тросе и контактном проводе с изменением нагрузки и температуры не одинаковы.

В полукompенсированной цепной подвеске с жестко закрепленным несущим тросом с автоматической компенсацией контактного провода тяжения в тросе будут сильно изменяться с изменением нагрузки и температуры, в то время как тяжение в контактном проводе будет оставаться постоянным и определяться весом компенсатора.

Провода контактной сети в расчетах принимаются абсолютно гибкими, так как при больших пролетах жесткость проводов сечением 100—150 мм² практически не сказывается на величине провеса. В целях облегчения расчета, но без влияния практически на точность результатов, принимается, что контактный провод подвешен к несущему тросу посредством бесконечно большого числа струн, т. е. нагрузка от контактного провода на несущий трос принимается, как равномерно распределенная по всей длине пролета. Погонная нагрузка цепной подвески: трос, контактный провод, струны, относятся не к единице длины провода, а к единице длины пролета.

Длина струн принимается постоянной и независимой от изменения температуры и нагрузки. Расчет проводов цепной подвески производится при самом неблагоприятном сочетании действия временных нагрузок, и получаемые при этом тяжения не должны превышать допускаемых напряжений для данных проводов. Временными нагрузками, принимаемыми при расчетах, являются: гололед и действие ветра. Величины нагрузки от гололеда, ветра и действия температуры, а также и невыгоднейшее сочетание их, которое может быть на данной электрифицируемой жел. дор., устанавливается, исходя из действительных данных климатических условий района линии, на основе произведенных длительных наблюдений над скоростью ветра, его направлением, температурой воздуха и интенсивностью гололеда, который может образоваться на проводах.

Величина нагрузок, устанавливаемых в результате наблюдений, может быть принята в расчет в том случае, если длительность наблюдений не менее пяти лет. При отсутствии данных длительных наблюдений в расчет принимаются величины нагрузок, устанавливаемые техническими условиями на расчет контактной сети. Нагрузка от гололеда на провода цепной подвески, исключая кон-

тактный провод, определяется, исходя из толщины корки гололеда 1 см и при удельном весе льда 0,9 по формуле:

$$p = 0,028 (d + 10) \text{ кг/п. м,}$$

где d — диаметр провода в мм.

На жестких опорных конструкциях контактной сети гололед принимается в размере 50 кг на м² верхней поверхности.

Давление ветра определяется по формуле:

$$p' = av^2 \text{ кг/см}^2,$$

где v — скорость ветра в м/сек,

a — коэффициент, зависящий от формы поверхности, на которую давит ветер.

Сила давления ветра $W_{\text{кг}}$ на пог. м провода в зависимости от скорости определяется из выражения:

при скорости $v = 15$ м/сек	$W_{\text{кг}} = 0,014 d \text{ кг/м. пог.}$
$v = 20$ "	$W_{\text{кг}} = 0,025 d$ "
$v = 30$ "	$W_{\text{кг}} = 0,054 d$ "

Проверка прочности проводов и тросов производится обычно для двух случаев: при минимальной температуре и отсутствии ветра и гололеда, а также для случая наличия гололеда при соответствующей температуре и скорости ветра. При гололеде расчетная скорость ветра принимается равной 15 м/сек.

Величина расчетного пролета цепной подвески определяется из условия допустимого отклонения контактного провода от оси пути под действием ветра. Ветровая нагрузка принимается действующей на провод горизонтально в направлении перпендикулярном к оси пути.

При точных расчетах ветровых отклонений следует учитывать, что под действием силы ветра получают отклонение и несущий трос и контактный провод.

В силу того, что влияние несущего троса на отклонение контактного провода сказывается незначительно, без большой погрешности в расчете можно допустить, что отклонение контактного провода под действием сил ветра будет происходить независимо от несущего троса. Положим, что ветер действует на контактный провод с силой $W_{\text{кг}}$ кг/пог. м.

При пролете l и величине силы натяжения в контактном проводе от действия компенсатора $S_{\text{кг}}$ наибольшее отклонение b_1 контактного провода от его первоначального положения будет равно

$$b_1 = \frac{W_{\text{кг}} l^2}{8 S_{\text{кг}}}$$

Это выражение может быть получено из рассмотрения (рис. 164) условия равновесия половины пролета, при котором сумма моментов всех сил относительно точки опоры должна быть равна нулю

$$S_k \cdot b_1 - \frac{W_k l}{2} \cdot \frac{l}{4} = 0,$$

откуда

$$b_1 = \frac{W_k l^2}{8 S_k}.$$

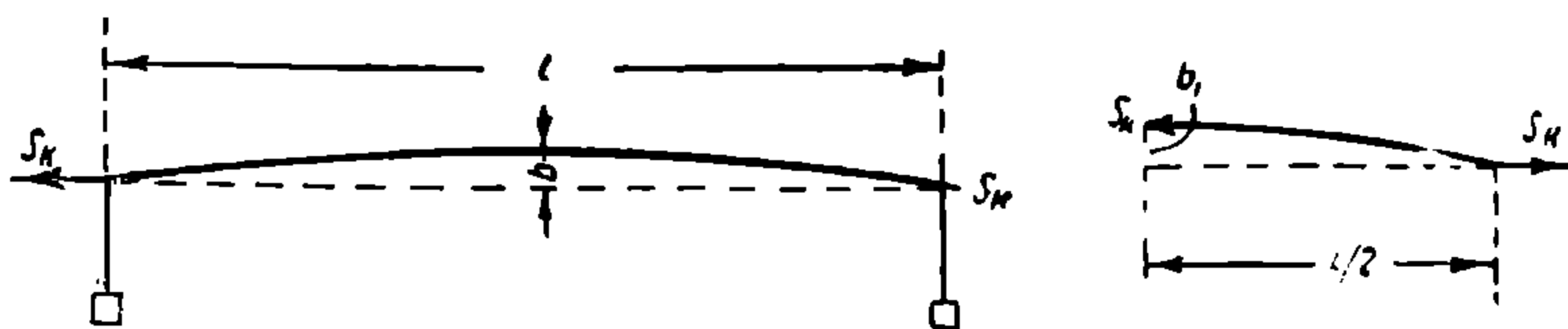


Рис. 164.

Наибольшая допустимая величина отклонения контактного провода ограничивается условием, гарантирующим от схода рабочей части пантографа с контактного провода для обеспечения от повреждения контактной сети и остановки движения. Если ширину рабочей части пантографа обозначим через a , то, очевидно, предельное отклонение будет равно

$$\frac{a}{2} = b.$$

Следовательно условием, гарантирующим от схода пантографа с контактного провода, будет

$$b_1 \leq b$$

или

$$b \geq \frac{W_k l^2}{8 S_k}.$$

Отсюда предельная величина пролета по условию наибольшего допустимого ветрового отклонения контактного провода определится выражением

$$l_{max} = 2 \sqrt{\frac{2 S_k \cdot b}{W_k}}$$

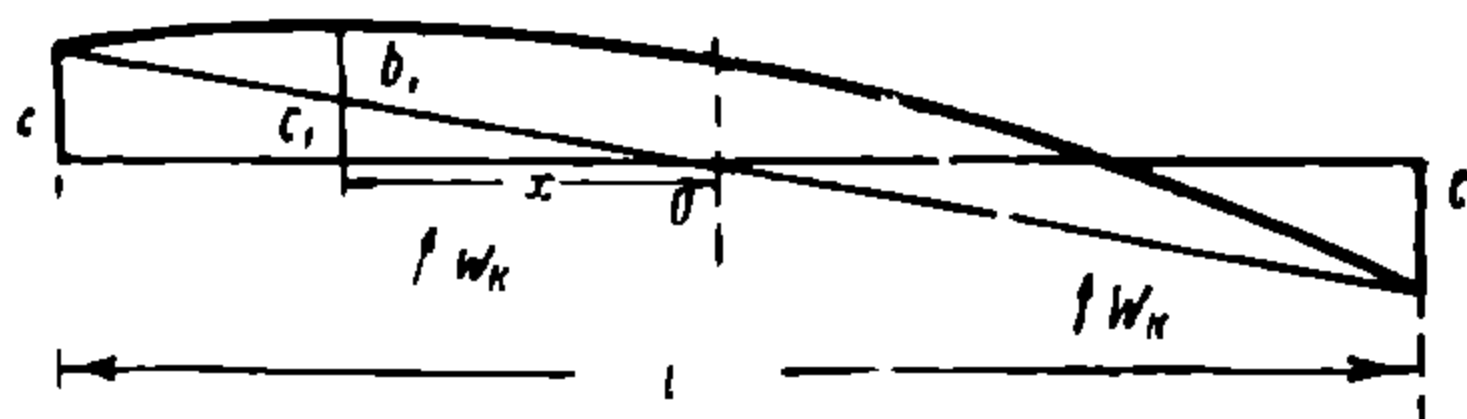
Это выражение для определения максимальной величины пролета выведено в предположении, что контактный провод находится строго по оси пути.

Как указывалось ранее, в целях уменьшения износа пантографа, контактный провод через посредство фиксаторов обычно располагается с зигзагом, т. е. с выносом в разные стороны от оси у опор.

В этом случае наибольшая величина отклонения контактного провода от оси пути не будет посредине пролета и величина отклонения будет зависеть также и от величины выноса у опоры.

Положим, что величина выноса контактного провода у каждой опоры будет равна c .

Тогда на расстоянии x от середины пролета, при отсутствии ветра, контактный провод находится от оси пути на расстоянии c_1 , определяемом из выражения



$$\frac{c_1}{c} = \frac{x}{l/2},$$

откуда

$$c_1 = \frac{2 \cdot c \cdot x}{l}.$$

Рис. 165.

При действии силы ветра контактный провод в той же точке отклонится от своей оси на величину b_1 , определяемую из выражения

$$b_1' = \frac{W_k(l^2 - 4x^2)}{8 S_k}.$$

Не учитывая разность в длине пролета по оси пути и оси провода, вследствие незначительной величины, полное отклонение контактного провода от оси пути в точке x равно

$$y = b_1' + c_1 = \frac{2 \cdot c \cdot x}{l} + \frac{W_k(l^2 - 4x^2)}{8 S_k}.$$

Положение наибольшего отклонения контактного провода от оси пути определится из условия

$$\frac{dy}{dx} = 0; \quad \frac{dy}{dx} = \frac{2 \cdot c}{l} - \frac{W_k \cdot x}{S_k} = 0,$$

откуда

$$x = \frac{2 \cdot c \cdot S_k}{W_k \cdot l}$$

Принимая наибольшее отклонение $b = y$ и подставляя в выражение y вместо x его значение, получим

$$y = b = \frac{2 \cdot c \cdot x}{l} + \frac{W_k(l^2 - 4x^2)}{8 S_k} = \frac{4c^2 \cdot S_k}{W_k \cdot l^2} + \frac{W_k \cdot l^2}{8 S_k} - \frac{2c^2 \cdot S_k}{W_k \cdot l^2};$$

произведя преобразования, будем иметь биквадратное уравнение следующего вида

$$W_k^2 l^4 - 8 b S_k W_k l^2 + 16 c^2 S_k^2 = 0.$$

Принимая при решении этого уравнения относительно l то из 4-х значений корня, которое соответствует направлению действия ветра, получим выражение для определения максимальной длины

пролета, допустимой по условиям бокового отклонения контактного провода

$$l_{max} = 2 \sqrt{\frac{S_k}{W_k} (b + \sqrt{b^2 - c^2})}.$$

Если принимать в расчет влияние несущего троса на отклонение контактного провода, то выражение l_{max} будет определяться

$$l_{max} = 2 \sqrt{\frac{S_k + S_m}{W_k + W_m} (b + \sqrt{b^2 - c^2})} \quad (M)$$

где S_m —тяжесть в несущем тросе,
 W_m — сила давления ветра на трос.

Приведенные выражения определяют пролет на прямых участках пути.

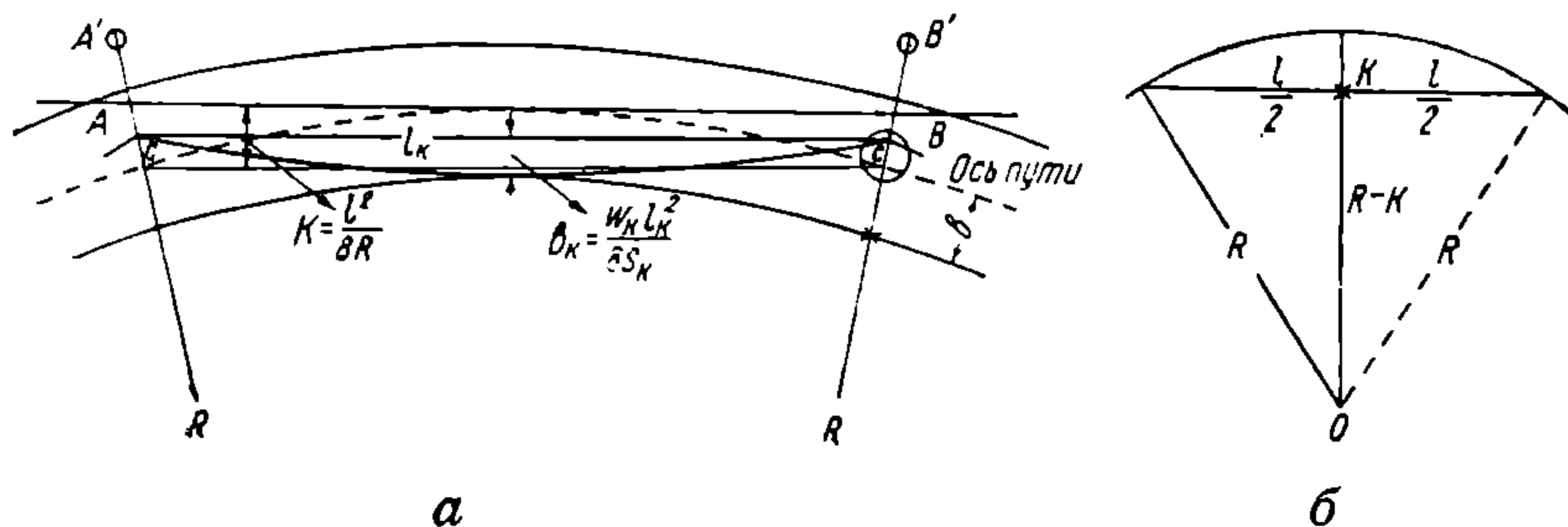


Рис. 166.

В кривых участках пути контактный провод в целях равномерного износа пантографа желательно располагать так, чтобы он два раза пересекал ось пути, как указано на рис. 166.

Обозначив вынос контактного провода от оси пути у опоры через c и приняв сплошные линии, проведенные параллельно оси пути с обеих сторон, как крайние расстояния пантографа, из геометрических соотношений величин, приведенных на рис. 166, можно написать следующее равенство:

$$c + (b - b_k) = K,$$

где K — из рис. 166б определяется из выражения

$$(R - K)^2 + \frac{l^2}{4} = R^2,$$

откуда

$$2R = K + \frac{l^2}{4K}.$$

Так как в правой части уравнения величина K по сравнению с $\frac{l^2}{4K}$ незначительна, то можно допустить

$$2R \cong \frac{l^2}{4K},$$

тогда

$$K = \frac{l^2}{8R}.$$

В приведенное ранее выражение, подставив вместо b_k и K их значения, получим:

$$c + \left(b - \frac{W_k \cdot l_k^2}{8 S_k} \right) = \frac{l^2}{8R},$$

Откуда выражение для определения величины наибольшего пролета в кривых участках пути с радиусом R будет иметь следующий вид

$$l_{\max}^{кр} = 2 \sqrt{2} \sqrt{\frac{(c+b) S_k R}{S_k + W_k R}} \text{ (м)}.$$

НТБ
ДНУЖТ

ГЛАВА IV

УСТРОЙСТВО И РАСЧЕТ МОЩНОСТИ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ

Статья 7. УСТРОЙСТВО ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ

§ 45. Тяговые подстанции с ртутными выпрямителями

Тяговые подстанции состоят из двух основных частей: понизительной части подстанции, где подводимое высокое напряжение понижается до требуемой агрегатами величины, и здания закрытой части подстанции, где помещается все оборудование и аппаратура управления. Понизительная часть тяговой подстанции может устраиваться как в здании, так и на открытом воздухе. В последнем случае она носит название открытой части подстанции.

На рис. 167 показан план открытой части подстанции при подводимом напряжении 35 кВ с одиночной системой шин из гибких медных проводов, проложенных на шинных опорах параллельно оси здания подстанции.

Между масляными выключателями и силовыми трансформаторами параллельно оси здания подстанции, а также и к самому зданию проложены рельсовые пути для возможности транспортировки оборудования.

На рис. 168 виден разрез открытой части подстанции по силовому трансформатору.

Поддерживающие опорные конструкции открытой части устраиваются или деревянные или металлические.

Здания тяговых подстанций как в отношении размещения оборудования внутри здания, так и во внешнем архитектурном оформлении строятся различных типов.

Здания тяговых подстанций строят как одноэтажные, так и двухэтажные. Последние получили наибольшее распространение.

В здании тяговой подстанции ртутные выпрямители с вспомогательным к ним оборудованием располагаются в первом этаже у стены, с наружной стороны которой или в пристройке к зданию находятся силовые трансформаторы.

На рис. 169 а, б, в даются планы I и II этажей, разрез по машинному залу тяговой подстанции, которая принята в СССР на электрифицируемом участке Дебальцево—Зверево Южной жел. дороги.

В первом этаже здания тяговой подстанции расположены:

а) машинный зал, с установленными ртутными выпрямителями и вспомогательным оборудованием к ним;

б) щит управления, на котором смонтирована вся аппаратура управления;

в) распределительное устройство постоянного тока 3000 вольт, состоящее из отдельных ячеек, где находятся раз'единители и бы-

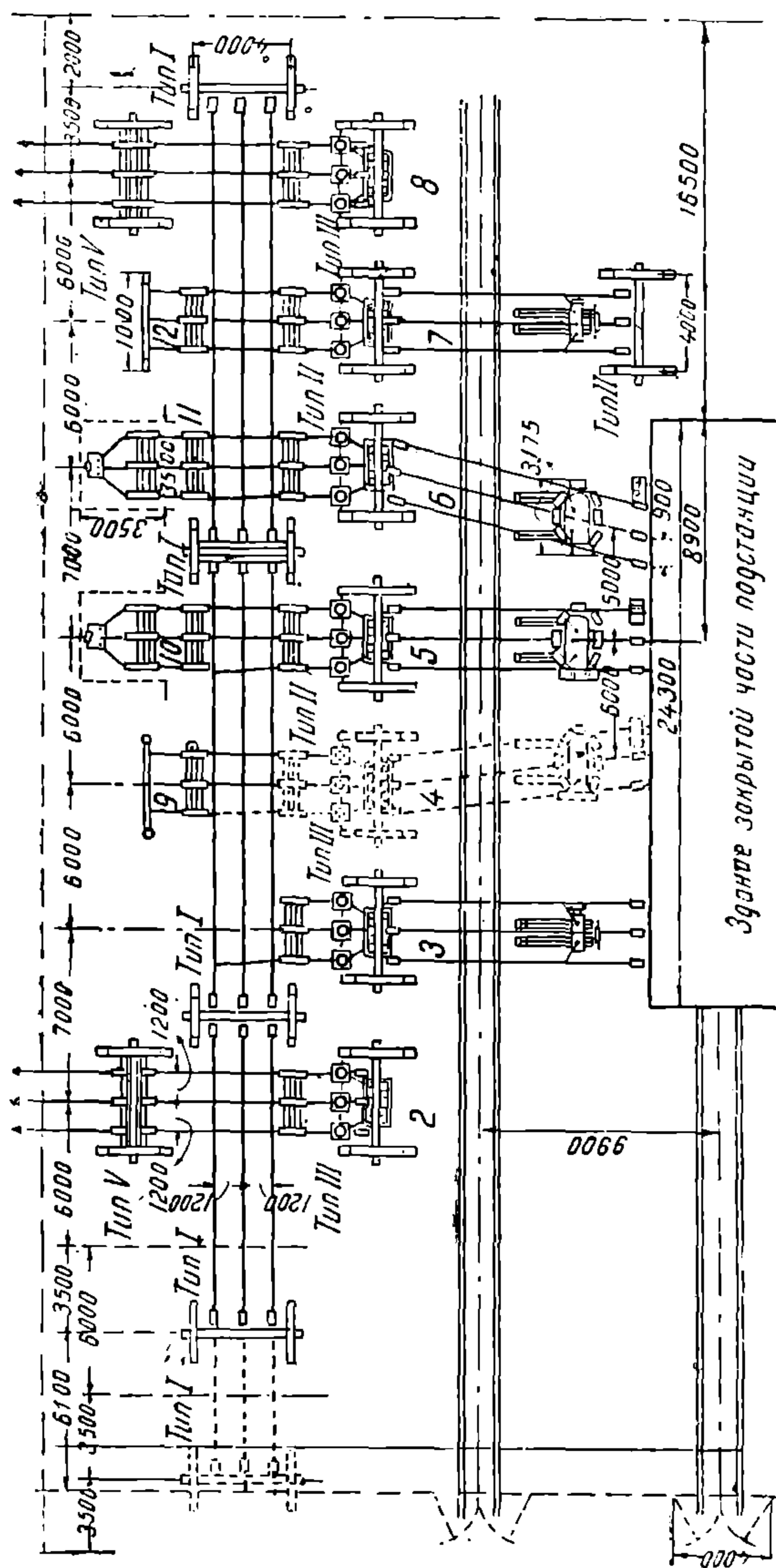


Рис. 167.

План открытой части подстанции при подводимом напряжении 35 кв. Одиночная система шин.

стродействующие автоматические выключатели ртутных выпрямителей и отходящих фидеров для питания контактной сети;

г) фильтрующее устройство, состоящее из главного реактора, катушек самоиндукции и соответствующих конденсаторов емкости;

д) распределительное устройство переменного тока 6 000 вольт, помещающееся в пристройке 1 этажа;

е) служебное помещение для обслуживающего персонала, расположенное как в I, так и во II этажах.

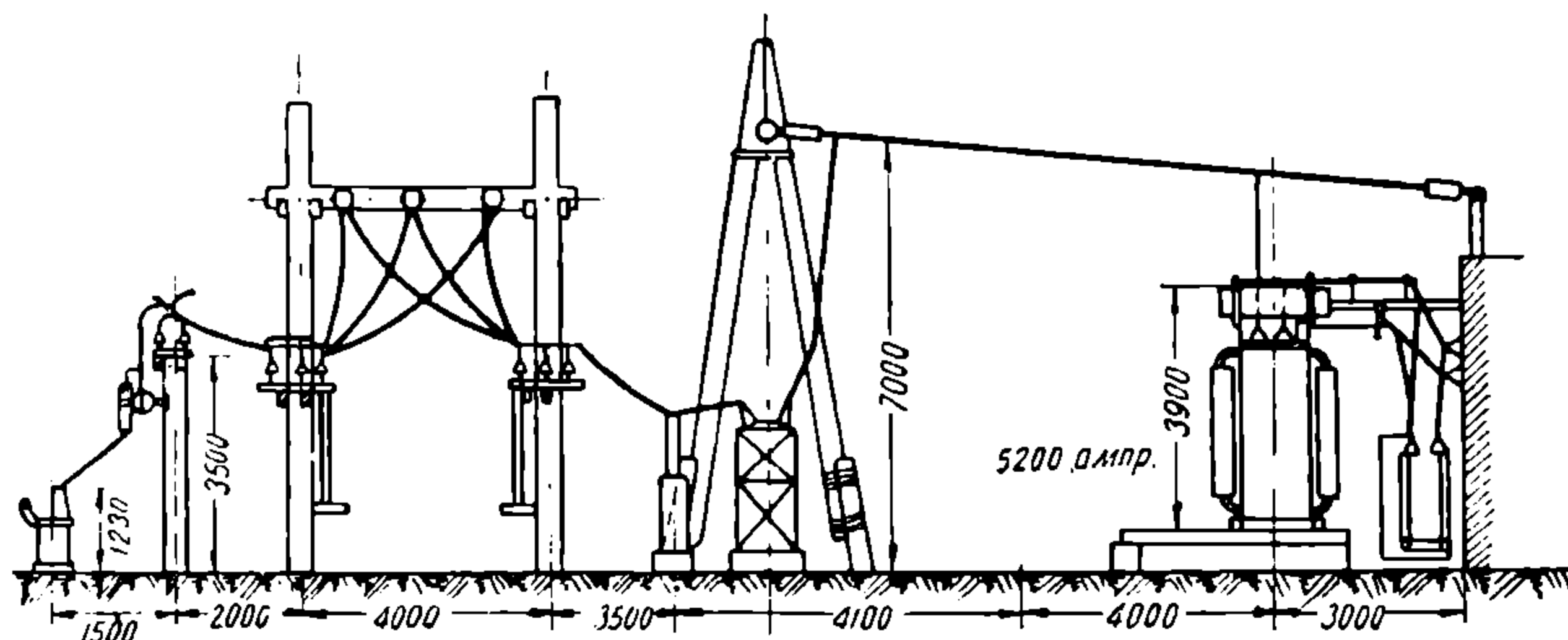


Рис. 168. Разрез открытой части подстанции по силовому трансформатору и трансформатору напряжения.

Помимо служебного помещения во втором этаже находятся:

а) мастерская для производства ремонта;

б) аккумуляторное помещение, в котором помещается аккумуляторная батарея, питающая всю вспомогательную сигнальную аппаратуру, и приборы управления.

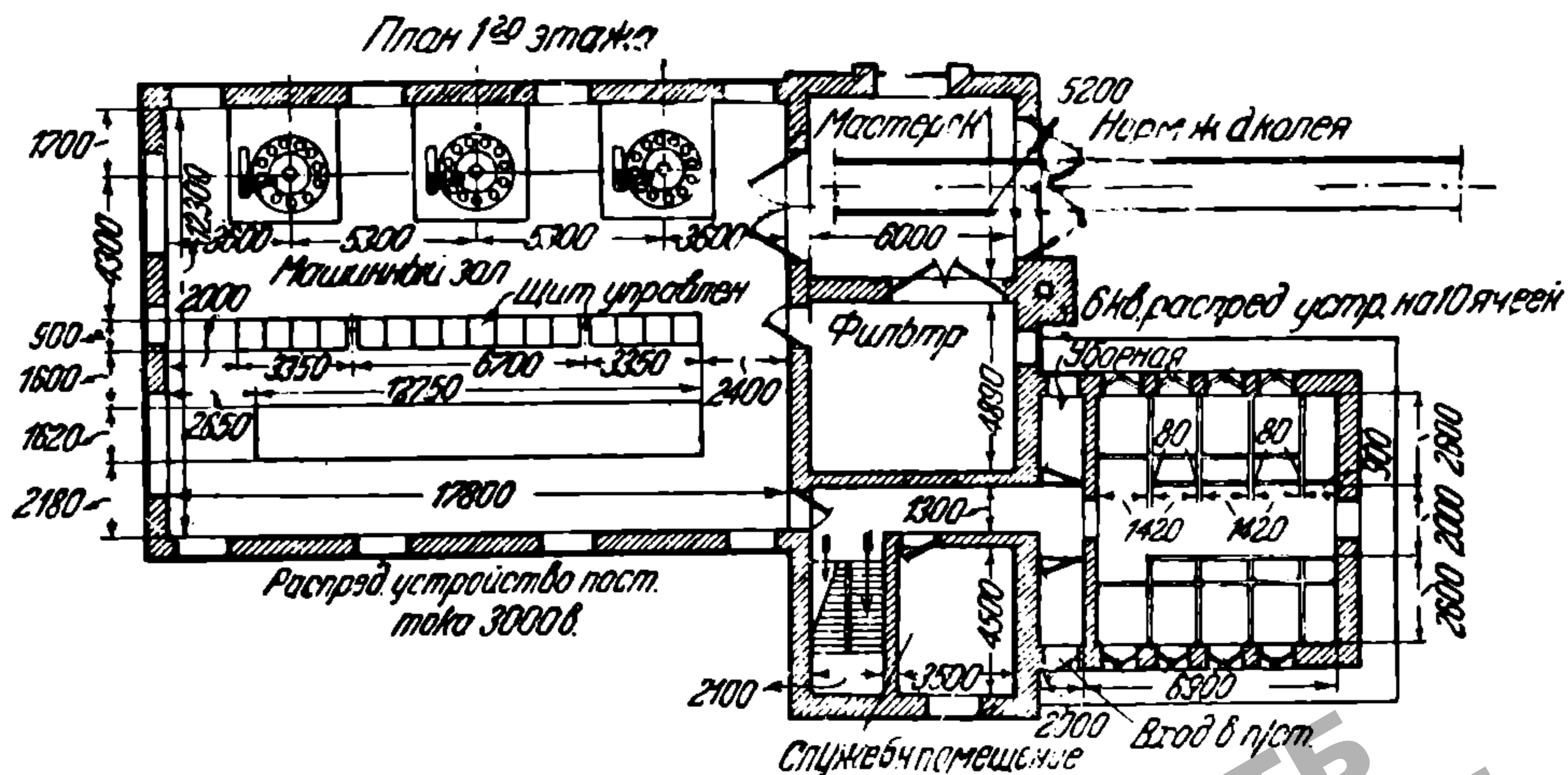


Рис. 169а. План I этажа.

На рис. 170 приведена принципиальная схема ртутно-выпрямительной подстанции, на которой показано электрическое соединение элементов оборудования п/станций.

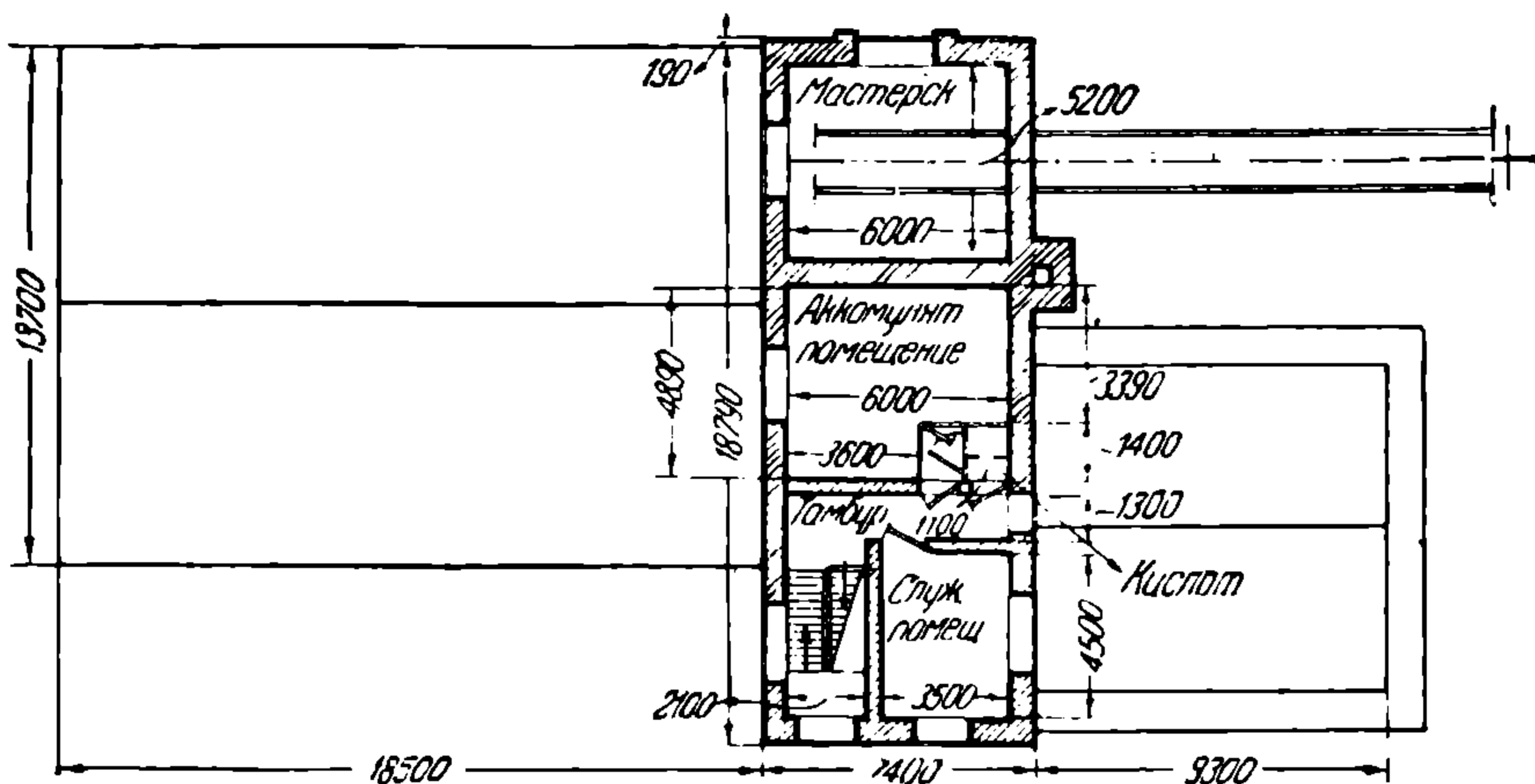


Рис. 169б. План II этажа.

Основным агрегатом электрооборудования подстанции является ртутный выпрямитель с вспомогательным к нему устройством, состоящим из:

- а) вакуумного оборудования,
- б) оборудования для зажигания и возбуждения,
- в) системы охлаждения.

Принцип преобразования ртутным выпрямителем переменного тока в постоянный основан на свойстве ртутной дуги в разреженном пространстве пропускать электрический ток только в одном направлении, — от анода к катоду. Таким образом, если к аноду будет подводится переменный ток, то на стороне катода получается постоянный ток.

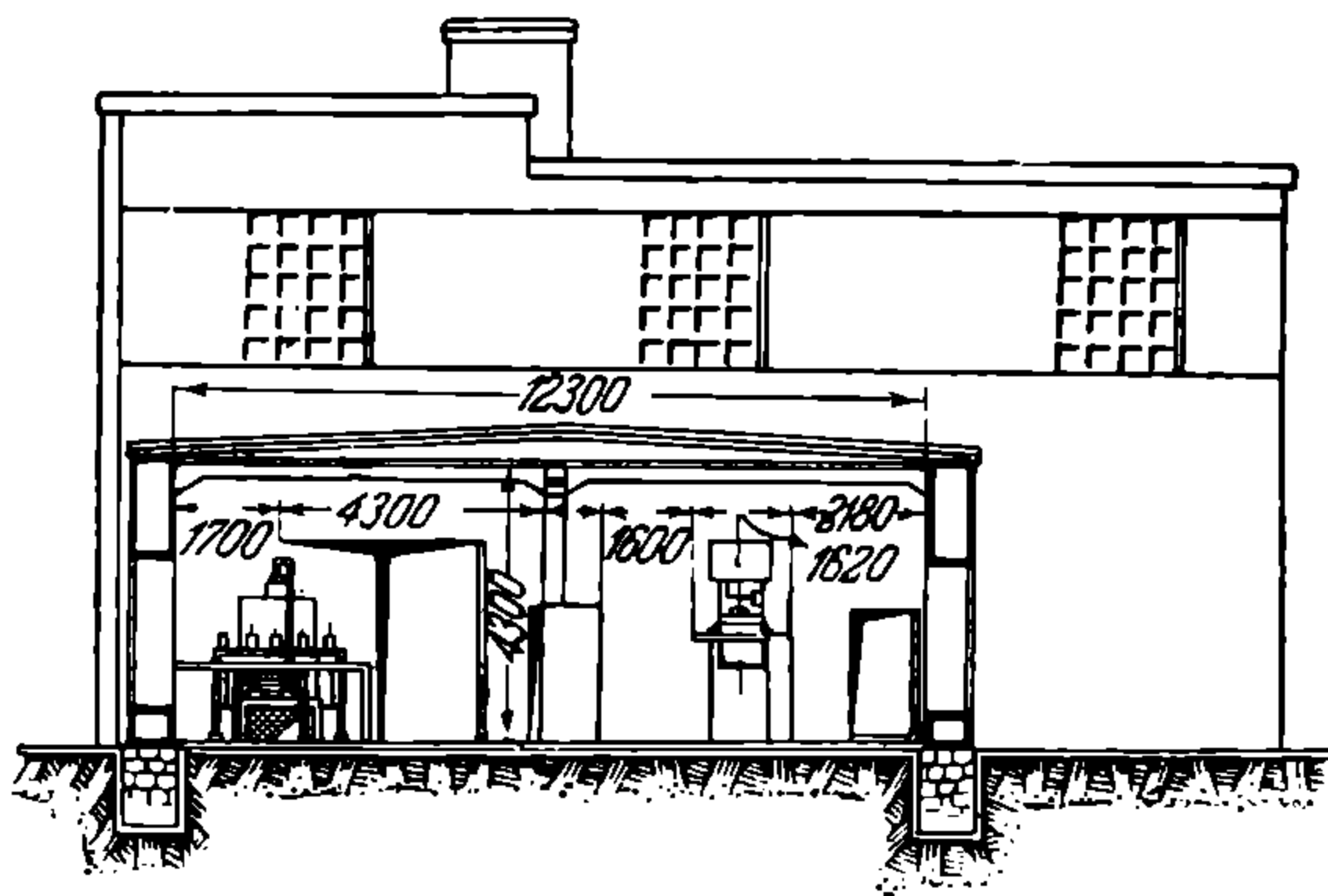


Рис. 169в. Разрез по машинному залу.

Ртутный выпрямитель состоит из металлического корпуса, внутри которого вверху расположены металлические или графитовые аноды; внизу

находится ртуть, которая является катодом.

На рис. 171 показан разрез металлического ртутного выпрямителя РВ-10 завода «Электросила» на номинальную мощность 600 кВт, при напряжении 600 в.

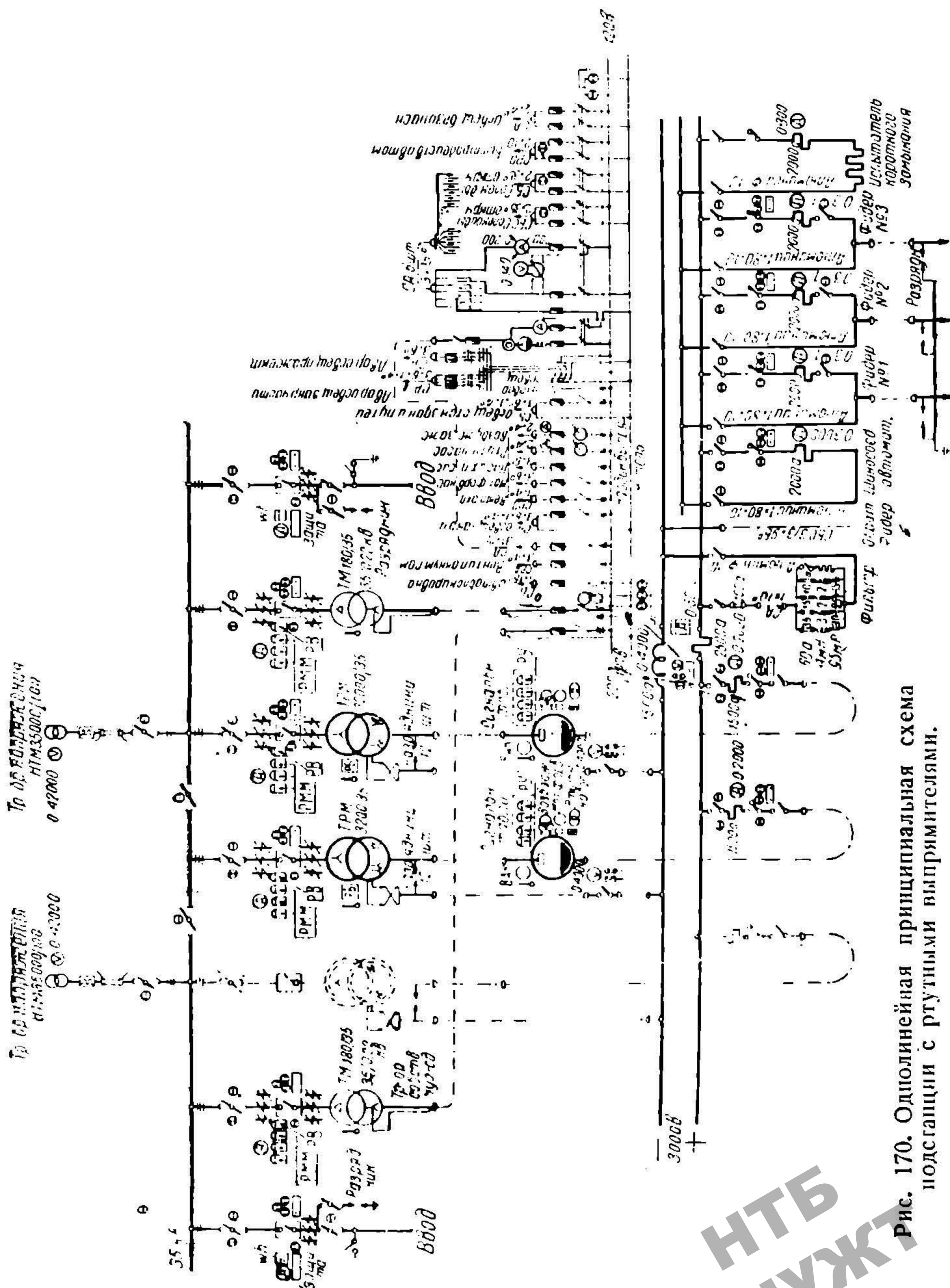


Рис. 170. Однолинейная принципиальная схема подстанции с ртутными выпрямителями.

От раскаленного катодного пятна, с температурой 2 000—3 000°C, образующегося на поверхности ртути, происходит излучение элек-

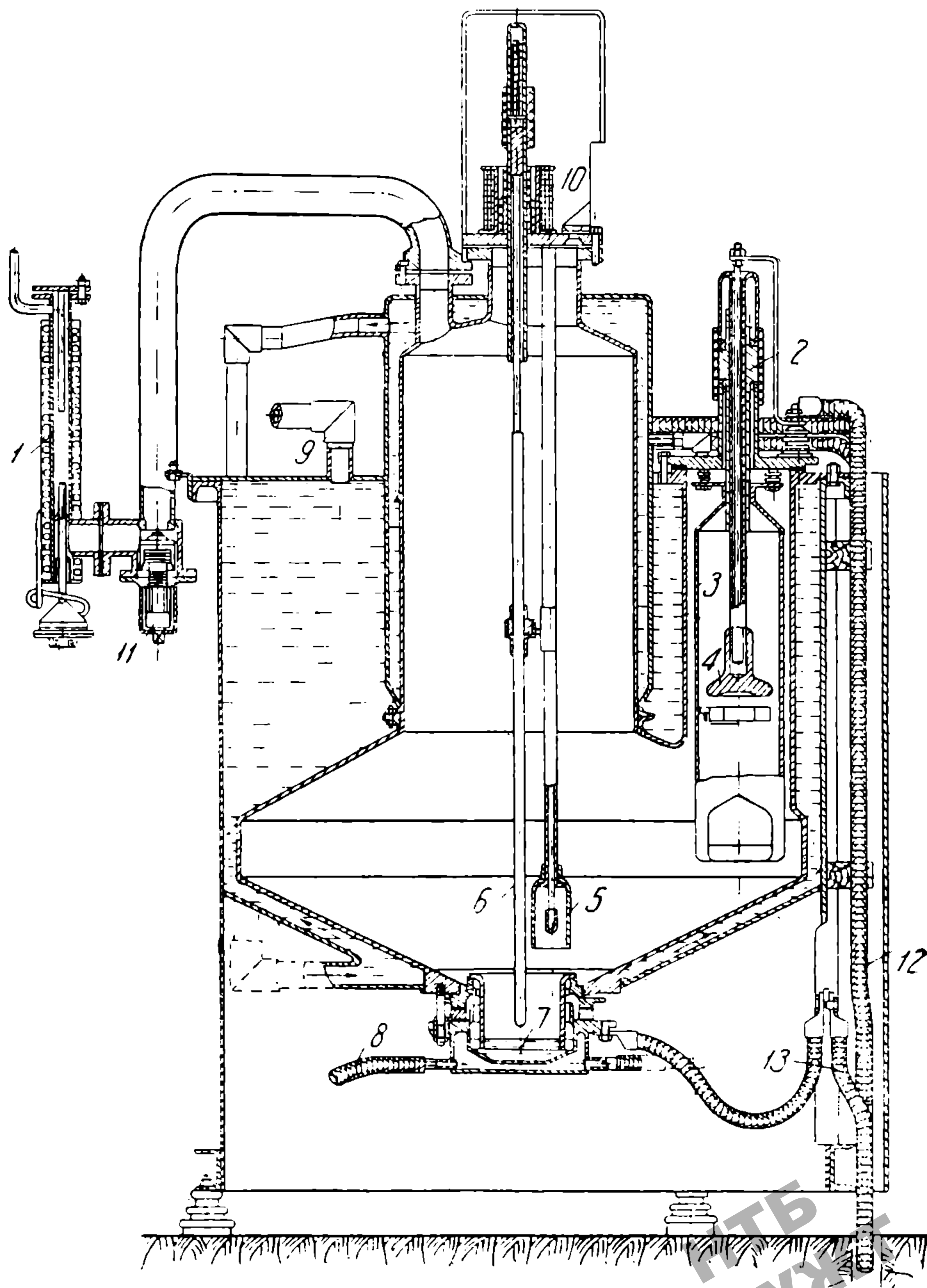


Рис. 171. Разрез металлическ. ртутного выпрямителя 3-дз „Электросила“ типа РВ-10.
 1—ртутный насос; 2—анодный изолятор; 3—манжета анода; 4—анод; 5—анод возбуждения; 6—анод за-
 жигания; 7—катод; 8—подвод воды к катоду; 9—выход воды из выпрямителя; 10—катушка соленоида
 зажигания; 11—вакуумный край; 12—анодный кабель; 13—катодный кабель.

тронов в направлении к аноду. Движение электронов происходит со скоростью, величина которой в измерении в км/сек, характеризуется выражением:

$$v = 600 \sqrt{E}.$$

Температура анодов не должна превосходить 600° С, так как в противном случае на аноде образуется свой источник электронов—катодное пятно и ток от других анодов пойдет не к катоду ртути, куда он должен идти нормально, а к перегретому аноду, что повлечет за собой короткое замыкание в ртутном выпрямителе.

Для обеспечения нормальной работы ртутного выпрямителя необходимо внутри цилиндра иметь сильно разреженное пространство и давление воздуха не должно превосходить 0,009 мм ртутного столба.

Поддержание определенного вакуума в ртутном выпрямителе осуществляется посредством специального при нем дополнительного вакуумного оборудования, состоящего в основном из масляного насоса, ртутного насоса и аппаратуры питания и управления.

При включении ртутного выпрямителя для того, чтобы он начал работать, необходимо образование вольтовой дуги, т. е. на поверхности катода необходимо вызвать катодное пятно.

Это осуществляется посредством специального анода зажигания, расположенного в середине цилиндра ртутного выпрямителя (рис. 171), который в момент пуска ртутного выпрямителя, опускаясь в катод и поднимаясь, образует вольтову дугу. Электрическая схема включения устройства зажигания и возбуждения может иметь питание как переменным, так и постоянным током.

Поддержание дуги при помощи анода возбуждения выпрямителя происходит автоматически. Для обеспечения нормальной работы ртутного выпрямителя необходимо обеспечить отвод тепла, образующегося в выпрямителе вследствие высокой температуры. Этот отвод тепла производится посредством воды, которая циркулирует в устроенной для этой цели «рубашке» цилиндра выпрямителя (рис. 171).

Существуют несколько систем устройства водяного охлаждения ртутных выпрямителей:

- 1) прямое (непосредственное) охлаждение проточной водой,
- 2) косвенное охлаждение проточной водой,
- 3) циркуляционное охлаждение при естественном или искусственном напоре,
- 4) комбинированная система прямого и циркуляционного охлаждения.

При прямом непосредственном способе охлаждения, вода, поступающая из магистрали или из специального бака, установленного внутри здания подстанции, проходит по «рубашке» выпрямителя и затем отводится в канализацию.

В том случае, когда вода загрязнена, содержит много солей и не пригодна для непосредственного охлаждения стенок цилиндра, применяется косвенное охлаждение, при котором эта проточная вода протекает по специальному охладителю и служит для охлаждения той воды, которая циркулирует по рубашке цилиндра.

Системы циркуляционного и комбинированного способов охлаждения являются более сложными по устройству и дорогими.

При циркуляционной системе охлаждения основное оборудование состоит из радиатора, охлаждаемого водой, вентилятора с моторным приводом и водяного насоса также с моторным приводом.

Охлаждение радиатора может быть осуществлено и воздухом.

Наиболее простой и дешевой системой охлаждения является прямое непосредственное охлаждение проточной водой.

Жесткость воды для охлаждения ртутного выпрямителя не должна превосходить 14° по немецкой шкале.

Расход воды на охлаждение ртутного выпрямителя зависит от нагрузки, т. е. от расхода тока, и температуры, при которой вода поступает на охлаждение выпрямителя. Количество воды в литрах, расходуемое в минуту, на 100 ампер выпрямленного тока в зависимости от температуры поступающей для охлаждения воды при температуре окружающего воздуха до 40°C , приводится в виде кривой на рис. 172.

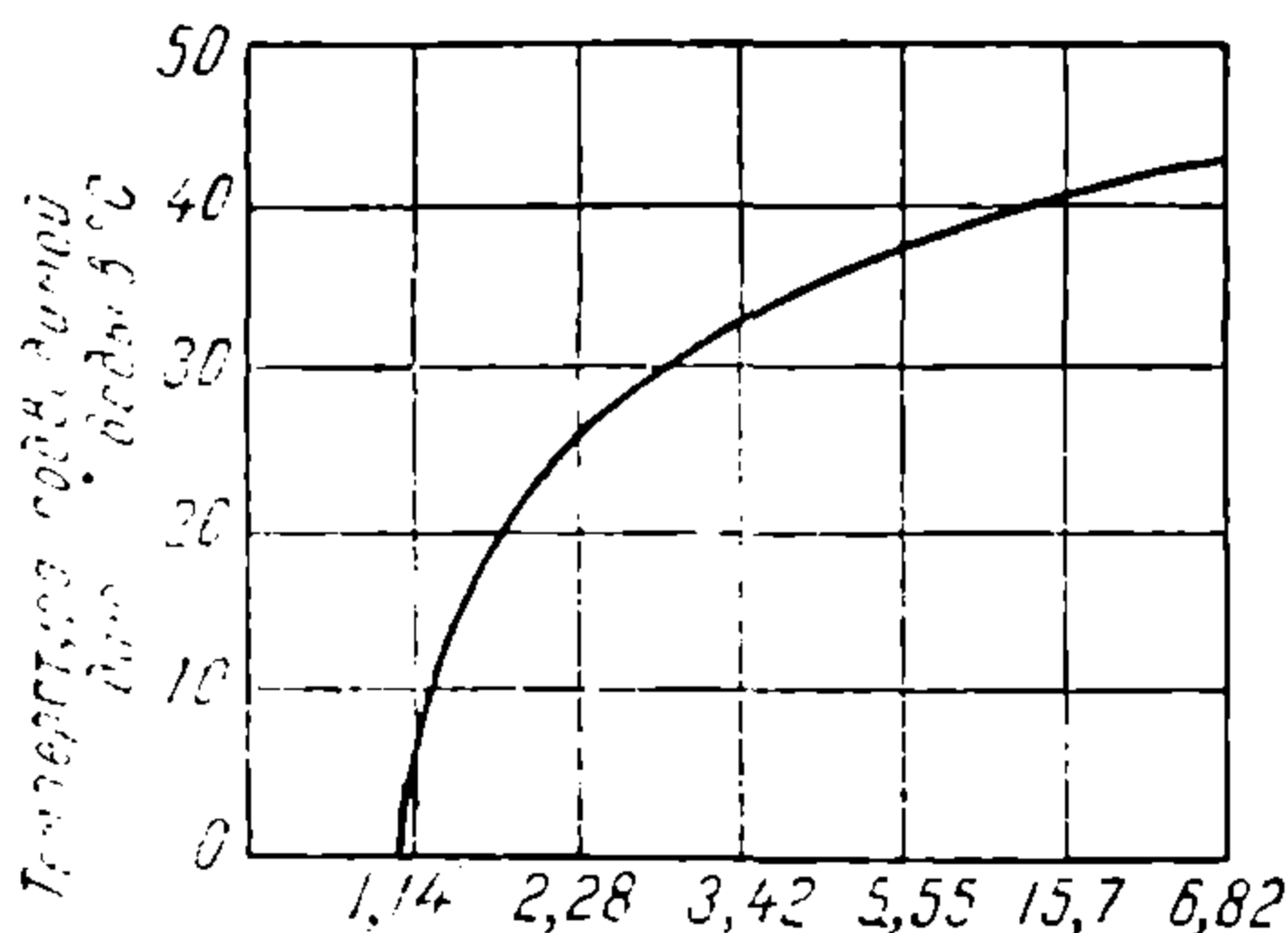


Рис. 172. Диаграмма расхода охлаждающей воды в литрах в минуту на 100 ампер выпрямленного тока в зависимости от температуры подводимой воды (по данным Броун-Бовери).

Напор, под которым вода поступает для охлаждения ртутного выпрямителя, желательно иметь не менее 5 м.

Для защиты ртутного выпрямителя от повреждения в моменты недопустимых перегрузок или коротких замыканий устанавливается на каждый ртутный выпрямитель быстродействующий автоматический выключатель, который в этих случаях размыкает цепь в течение 0,01—0,015 сек.

Ртутные выпрямители, благодаря их высокому коэффициенту полезного действия, мало зависящему от нагрузки, получили широкое применение на тяговых железнодорожных подстанциях. В СССР на всех электрифицированных пригородных участках с мотор-вагонной тягой, а также и на магистральных жел. дор., где не применяется рекуперация, тяговые подстанции оборудованы ртутными выпрямителями.

На тяговых подстанциях электрифицированных пригородных участков установлены ртутные выпрямители РВ—16/20 номиналь-

ной мощностью каждый 1 000 *квт* при напряжении 1 650 вольт и силе тока 606 *амп*.

Следует заметить, что ртутные выпрямители на железнодорожных подстанциях появились впервые лишь в 1919-20 году на французских жел. дор. Мощность этих ртутных выпрямителей 600 *квт* при напряжении 1 575 *в*.

В настоящее время мощность ртутных выпрямителей с напряжением 3 000 *в*, установленных на тяговых подстанциях, доходит до 5 000 *квт* и более. При электрификации пригородного участка жел. дор. Делавейр—Лакаванна в 1930 г. на тяговых подстанциях были установлены ртутные выпрямители мощностью 3 000 *квт* при напряжении 3 000 вольт.

Ртутные выпрямители, имея определенную номинальную мощность, в отдельные моменты способны отдавать мощность больше номинальной, т. е. способны выдерживать перегрузки. Ртутные выпрямители РВ—16/20 типа ВЭО, установленные у нас на тяговых подстанциях электрифицированных пригородных участков, выдерживают следующие перегрузки:

мгновения (толчком)	200 %
в течение 3 мин.	100 %
20 мин.	50 %
30 мин.	20 %

В настоящее время в СССР для номинальных напряжений 1 650 и 3 300 *в* приняты следующие стандартные типы ртутных выпрямителей (ОСТ—6392).

Т и п	Номинальное напряжение выпрямленного тока вольт	Номинальная сила выпрямленного тока ампер
РВ—12	1 650	700
РВ—22		1 200
РВ—40		2 200
РВ—22	3 300	725
РВ—40		1250

Согласно техническим условиям, приведенные типы ртутных выпрямителей выдерживают в рабочем состоянии нижеследующие перегрузки:

100 %	.. в течение 1 мин.
50 %	5
20 %	12

Величины перегрузок и минимальные промежутки времени между ними определяются по формуле:

$$J_1^2 t_1 + J_2^2 t_2 = J^2 (t_1 + t_2),$$

откуда

$$J = \sqrt{\frac{J_1^2 t_1 + J_2^2 t_2}{t_1 + t_2}},$$

где J_1 — сила тока при перегрузке,

J_2 — „ „ в период между перегрузками,

t_1 — продолжительность перегрузки,

t_2 — промежутка времени между перегрузками.

J — номинальная сила тока.

§ 46. Влияние выпрямленного тока на провода связи

Ток, получаемый от ртутных выпрямителей, не является в полной степени постоянным, а лишь выпрямленным. Чем меньше число фаз выпрямителя, тем большая получается неравномерность, а следовательно будет иметь место большее колебание напряжения, называемое пульсацией напряжения.

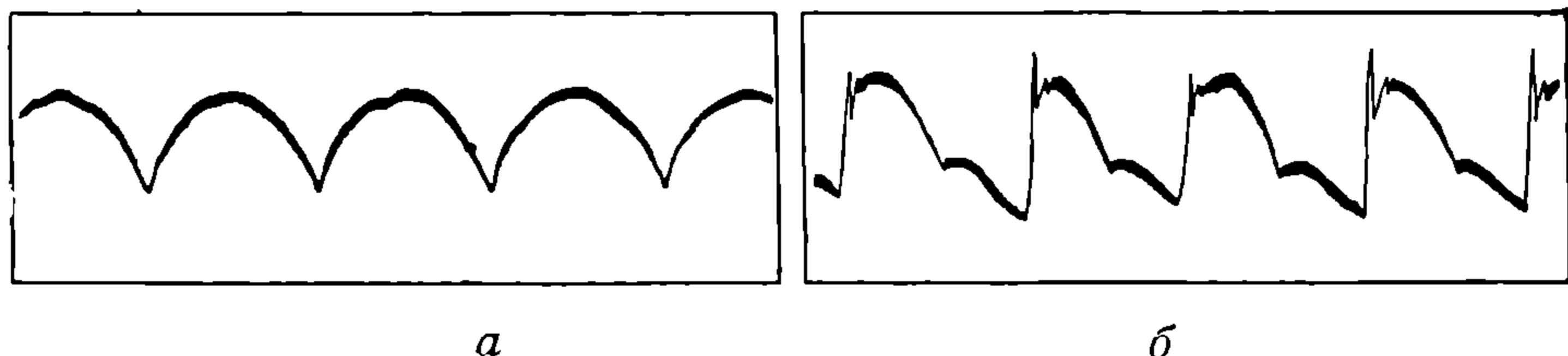


Рис. 173.

На рис. 173 приведены по данным А. Е. Г. кривые пульсации напряжения 6-фазного ртутного выпрямителя: кривая *a* — при холостом ходе, *б* — при нагрузке.

Для уменьшения пульсации напряжения необходимо, следовательно, увеличить число фаз выпрямителя. Увеличение же числа фаз значительно усложняет и удорожает оборудование выпрямителя, так как трансформаторы при этом получаются тяжелыми и сложными.

Вследствие этого по технико-экономическим соображениям преимущественное распространение имеют 6-фазные выпрямители, и меньшее применение 12-фазные. Вследствие пульсации напряжения и тока в контактном проводе, в проводах связи, находящихся вблизи электрифицируемой жел. дороги, возникают явления, нарушающие нормальную работу линии связи.

Под влиянием пульсации напряжения и тока в контактном проводе образуется электростатическое и электромагнитное поле.

На рис. 174 показаны: а) электростатическое поле и б) электромагнитное поле. Образующееся, вследствие разности потенциалов между контактным проводом и землей, электростатическое поле, вследствие пульсации напряжения не остается постоянным, а изменяется.

Так как провода связи, проходящие вблизи линии, не одинаково отдалены от контактного провода, то в них появляется разность индуцированных напряжений. В проводе, расположенном ближе к контактному, индуцированное напряжение будет больше.

Выравнивание этой разности напряжений будет проходить через телефонные аппараты, что создает в них шумовой эффект.

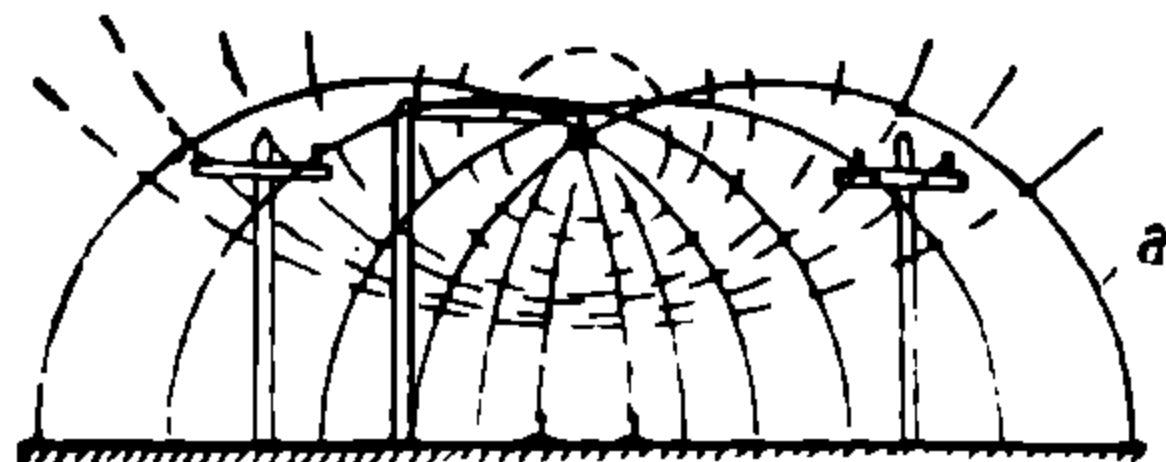


Рис. 174.

Вследствие же пульсации тока, образующееся вокруг контактного провода изменяющееся магнитное поле будет наводить в проводах связи электродвижущие силы взаимной индукции, что окажет вредное влияние на нормальную работу линии связи.

Появление пульсирующего тока в контактном проводе вызывается не только пульсацией напряжения ртутных выпрямителей, но также и другими причинами, как-то: пульсацией противоэлектродвижущей силы тяговых электродвигателей и работой пантографа—изменением контакта между ним и проводом.

Следует отметить, что по данным заграничной практики, влияние на провода связи электростатической индукции сравнительно невелико, и причиной, нарушающей нормальную работу линии связи, является главным образом действие электромагнитной индукции. Для устранения вредного действия тока ртутных выпрямителей на провода связи и обеспечения нормальной работы последних применяются различные мероприятия, которые разделяются на две категории:

- 1) мероприятия на линии связи,
- 2) мероприятия на тяговых подстанциях.

В качестве мероприятий со стороны линии связи по защите от вредного действия тягового тока являются: двухпроводная система телеграфирования, транспозиция (перекрещивание) проводов, относ линий связи в сторону от жел. дороги и, наконец, последнее мероприятие, наиболее радикальное, но в то же время и самое дорогое, перевод линий связи в кабели, называемое каблированием.

На тяговых подстанциях с ртутными выпрямителями в целях уменьшения вредного влияния от пульсации напряжения и тока ртутных выпрямителей устанавливаются специальные сглаживающие устройства. Наиболее распространенным способом сглаживания пульсаций является устройство, состоящее из бетонного реак-

тора и резонансных шунтов, которые представляют собой конденсаторы K и катушки самоиндукции D .

Схема включения бетонного реактора P и резонансных шунтов ab , cd , ef , gh приведена на рис. 175.

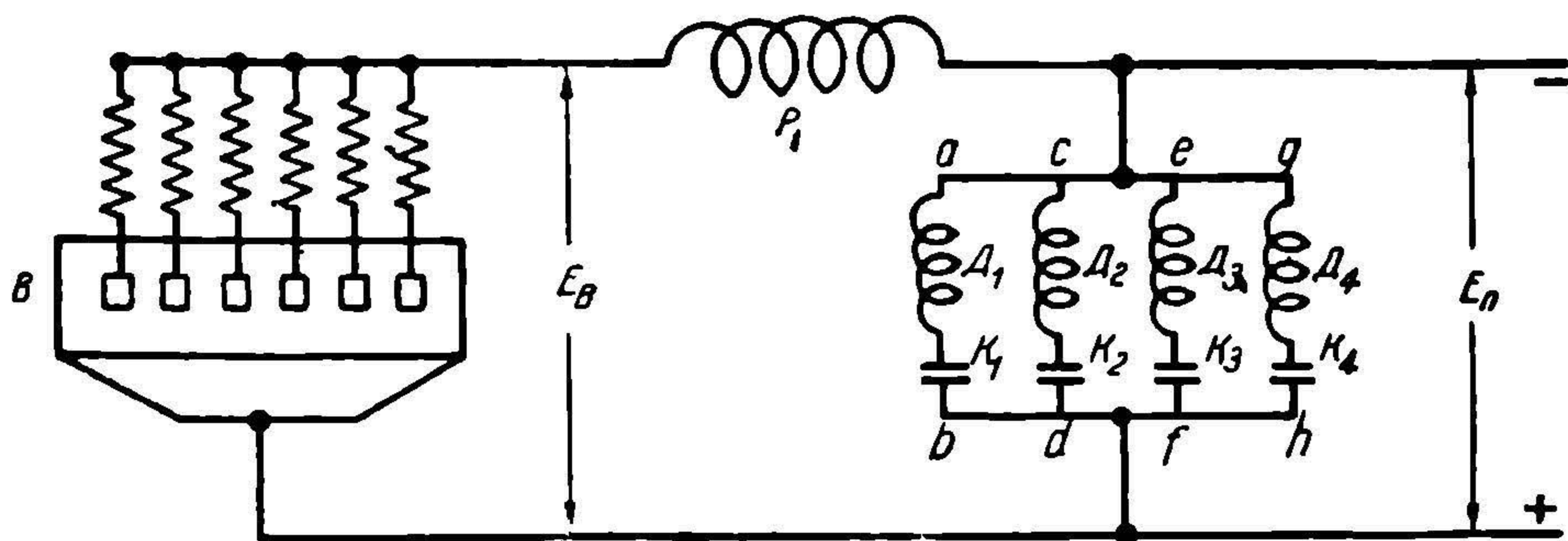


Рис. 175. Фильтр с резонансными шунтами.

В целях избежания больших потерь электрической энергии, бетонный реактор устраивается с небольшим активным сопротивлением. Индуктивное же сопротивление бетонного реактора делается значительным.

На рис. 176 приведен вид бетонного реактора, установленного на подстанциях Северн. ж. д.

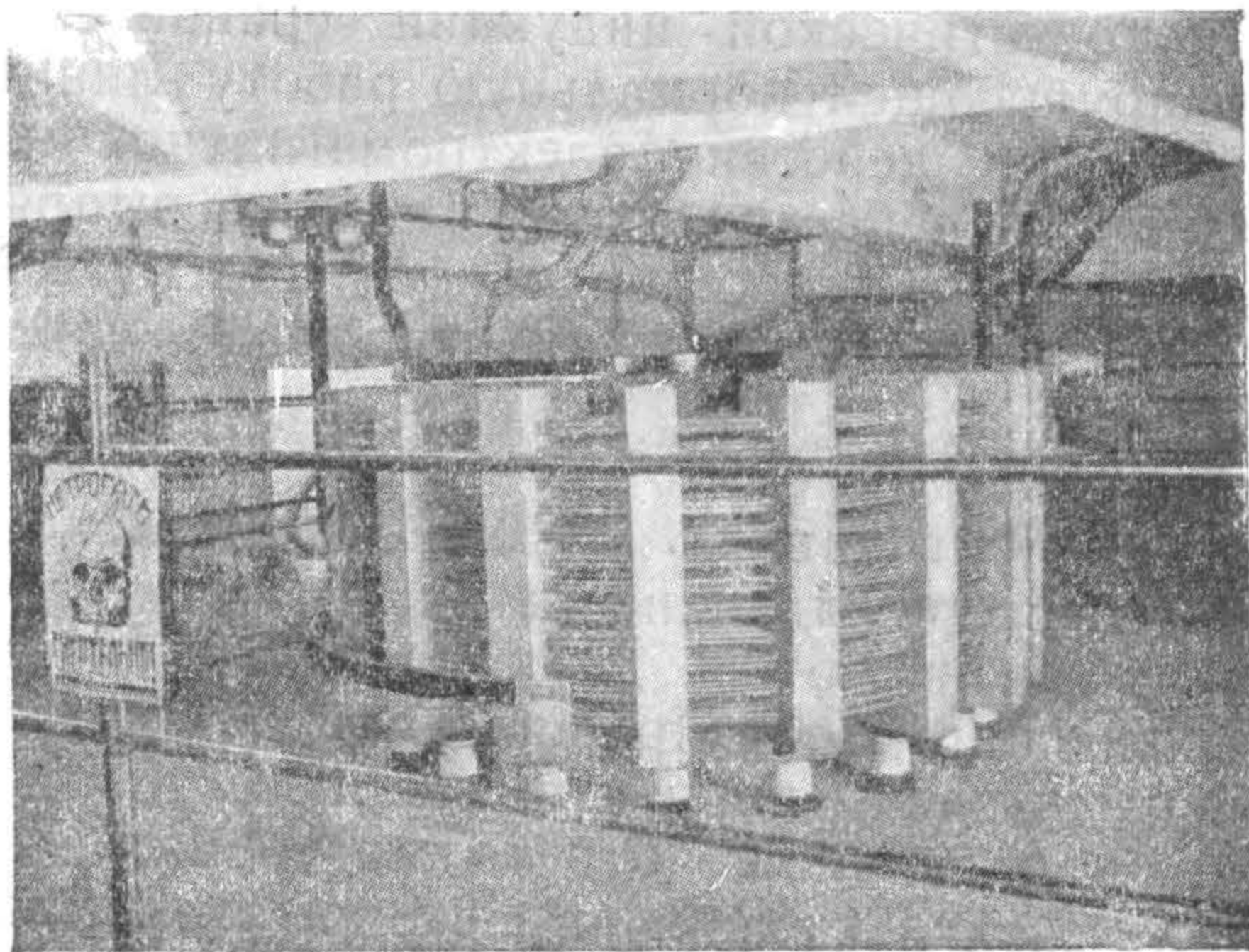


Рис. 176. Общий вид бетонного реактора.

Резонансные шунты, состоящие из катушек самоиндукции и конденсаторов, настраиваются в резонанс на наиболее резко выраженные гармоники (колебания) пульсирующего напряжения и служат как бы улавливающим устройством высших гармоник, вредно влияющих на работу линии связи.

Частота высших гармоник зависит от частоты трехфазного тока в подводящей сети и числа фаз ртутного выпрямителя. При нормальной частоте

трехфазного тока 50 пер/сек и шестифазном выпрямителе основная частота высшей гармоники 300 пер/сек. Остальные частоты высших гармоник кратные 300 пер/сек основной гармоники. Наиболее

вредное влияние на провода связи, вызывающие шум в аппаратах связи. являются высшие гармоники с частотой 300, 600 и 900 *пер еск.*

На рис. 177 приведен резонансный шунт, установленный на подстанциях жел. дор. Чикаго—Южный берег. На переднем плане видны три катушки самоиндукции.

§ 47. Тяговые подстанции с мотор-генераторами

До появления подстанций с ртутными выпрямителями на напряжение 2,000 *вольт* и выше, мотор-генераторные подстанции имели почти исключительное применение. С развитием ртутных выпрямителей в силу целого ряда их преимуществ, подстанции с мотор-генераторами стали применяться лишь на тех жел. дорогах, где осуществляется рекуперация энергии. Здания подстанций с мотор-генераторами бывают различных типов. Расположение оборудования внутри здания подстанций с мотор-генераторами также как при ртутных выпрямителях, не является строго установленным для всех подстанций.

Как один из примеров расположения оборудования в подстанциях с мотор-генераторами, можно видеть из рис. 23 и 24, где приводятся план и разрез подстанции Пайдмонт жел. дор. Чикаго—Мильвоки—С Поль.

Одноэтажное здание приведенной подстанции подразделяется на неравные как по высоте, так и в отношении площади части.

В части здания, имеющей меньшую высоту, обращенной в сторону полотна жел. дор., помещаются три мотор-генератора, распределительные щиты и помещение для обслуживающего персонала подстанции.

В другой части здания находятся трансформаторы и аппаратура высокого напряжения: шины 100 *кв*, масляные выключатели 100 *кв* и электролитические разрядники.

По обеим сторонам второй части здания расположена группа из трех масляных выключателей, через которые подстанция соединяется с двумя соседними.

На каждый мотор-генератор установлен отдельный силовой трехфазный трансформатор, понижающий напряжение с 100 *кв* на 2,3 *кв*, которое и подводится к мотор-генератору.

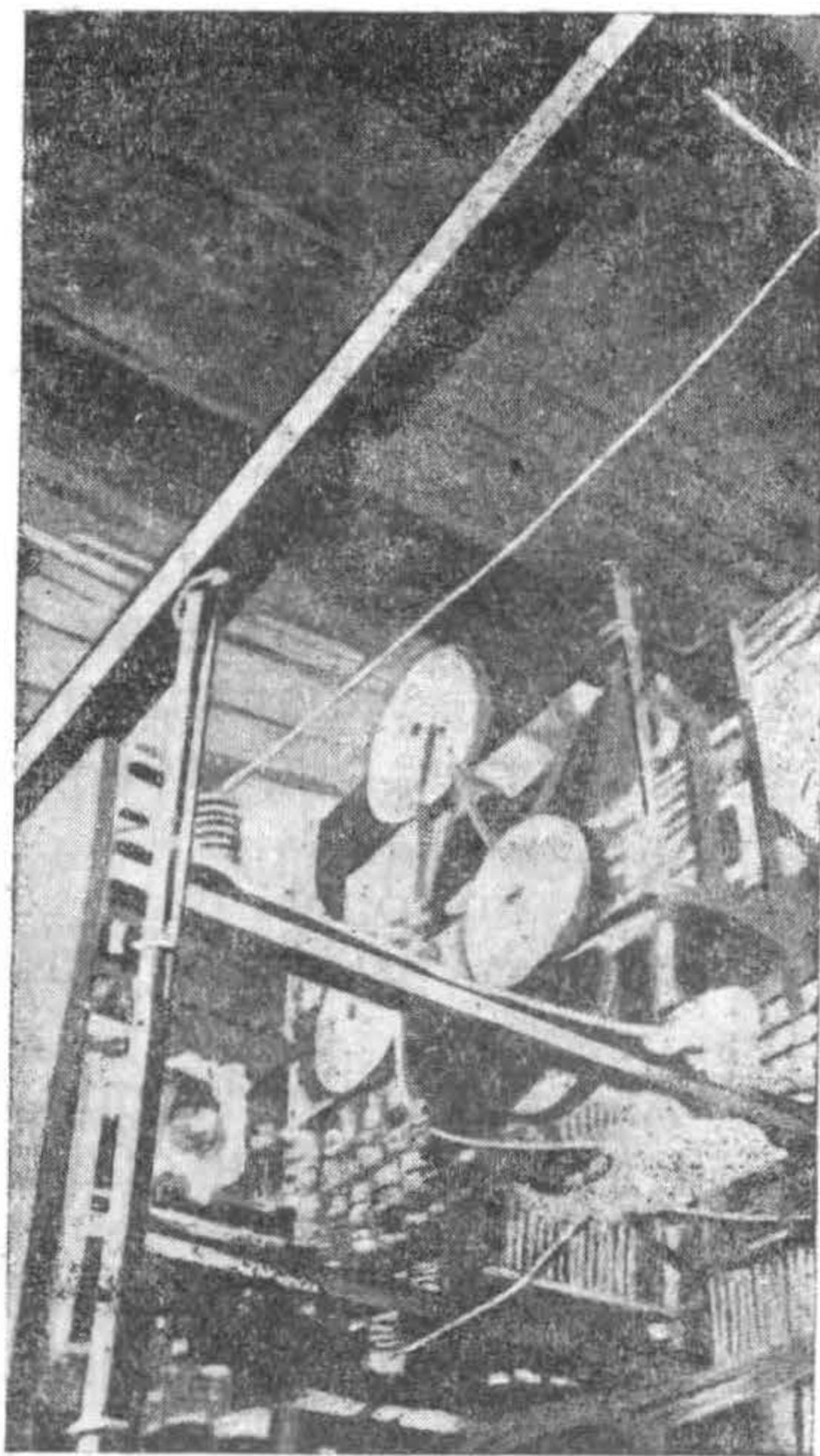


Рис. 177. Резонансный шунт на подстанциях жел. дор. Чикаго—Южный берег.

Между трансформаторами и масляными выключателями проложен рельсовый путь, что позволяет на тележке легко перемещать трансформаторы во время их ремонта.

Второй рельсовый путь, перпендикулярный к первому, служит для перемещения мотор-генераторов. Над мотор-генераторами установлен мостовой кран на 9 т.

В трансформаторной части здания на высоте 10 м от уровня пола расположены сборные шины высокого напряжения 100 кВ, состоящие из трех медных труб по одной на фазу диаметром 19 мм. Ввод и вывод линии высокого напряжения осуществлен при помощи вертикальных проходных изоляторов, установленных в железобетонной крыше. На вводе установлены три трансформатора тока по одному на фазу для измерительных приборов.

Все масляные выключатели на 100 кВ как на вводах распределительной линии, так и на выводах линий, идущих параллельно жел. дороге к соседним подстанциям, имеют с одной стороны приводы для управления с расстояния обслуживающим персоналом подстанции, с другой—автоматические выключатели от реле перегрузок.

При помощи реле перегрузки осуществляется защита линии и аппаратуры на случай короткого замыкания в линиях высокого напряжения.

Защита генераторов от коротких замыканий на фидерах или на контактной линии обеспечивается быстродействующими выключателями. Трехфазные кабели 2300 в, которые питают синхронные моторы, обслуживают кроме того две вспомогательных цепи, в одну из которых включен трехфазный трансформатор 2300/110 в мощностью 10 кВт для питания освещения подстанции, во вторую включен однофазный трансформатор 2300/4400 в, дающий переменный ток для жел.-дор. автоблокировки.

Мощность каждого агрегата мотор-генератора 2000 кВт при напряжении 3000 в.

Из трех агрегатов, установленных на подстанции, два являются рабочими, и один—резервный.

Мотор-генераторы выдерживают следующие перегрузки:

в течение 5 мин. .	· 200%
„ 2 час. .	50%

В СССР подстанции с мотор-генераторами применены на электрифицированных жел. дор.: Закавказской на участке Сталиниси—Зестафони и на Пермской, на участке Кизел—Чусовая. Электрифицированные участки этих дорог имеют гористый профиль с большими уклонами, величина которых на участке Сталиниси—Зестафони доходит до 28‰, а на участке Кизел—Чусовая 17‰. Вследствие таких больших уклонов на обоих участках применяется рекуперация энергии. На всех подстанциях установлены мотор-генераторы мощностью каждый 2000 кВт, с допустимыми перегрузками 50% в течение 2 часов и 200% в течение 5 минут.

Подводимое к мотор-генераторам напряжение трехфазного тока—6300 в. Тяговые подстанции на ст. Сталиниси и Молити, Закавк. жел. дор. питаются энергией от Загэс и Рионгэс при подводимом напряжении 110 кВ. Понижительная трансформаторная часть этих подстанций открытого типа, общий вид которой приведен на рис. 26.

§ 48. Техничко-экономические характеристики подстанций с мотор-генераторами и ртутными выпрямителями

Преимущества и недостатки тех и других подстанций вытекают из свойств типа преобразователя подстанции. К преимуществам подстанций с мотор-генераторами относятся:

устойчивый режим работы в отношении сохранения напряжения постоянного тока, в силу независимости напряжения постоянного тока от напряжения в линии передачи; возможность легкого регулирования напряжения; повышение $\cos \varphi$ в линии передачи; способность выдерживать большие перегрузки в течение продолжительного времени; возможность возвращения рекуперированной энергии в линии передачи для целей использования ее другими потребителями энергии.

К недостаткам подстанций с мотор-генераторами относятся: низкий коэффициент полезного действия (см. рис. 33) и при том сильно зависящий от изменения нагрузки, увеличение расхода металла; вес мотор-генератора мощностью 2000 кВт—52 т и более, вес же ртутного выпрямителя той же мощности до 4 т; необходимость в устройстве тяжелых фундаментов под мотор-генераторы и оборудование машинного зала подъемным краном; потребность в большей кубатуре здания подстанции; большие эксплуатационные расходы по обслуживанию и ремонту оборудования подстанции; большая полная строительная стоимость подстанции на 1 кВт установленной мощности.

Подстанции с ртутными выпрямителями не имеют указанных недостатков, так как ртутный выпрямитель, будучи статическим преобразователем, обладает высоким коэффициентом полезного действия, значительно меньшим весом и габаритом по сравнению с мотор-генератором, и вследствие простоты конструкции требует меньшего обслуживания и является легко приспособляемым к автоматическому управлению.

Имея преимущества по сравнению с мотор-генераторами ртутный выпрямитель имеет и свои недостатки. К недостаткам подстанций с ртутными выпрямителями следует отнести непригодность их, в случае применения рекуперации энергии и возвращения ее в сеть переменного тока. Ртутные выпрямители обычной конструкции без дополнительного сложного оборудования не обладают свойством обратного преобразования.

Необходимость в установке трансформаторов специального типа.

Невозможность регулирования напряжения на стороне выпрямленного тока непосредственно и сложность регулирования его на стороне переменного тока. Влияние пульсаций выпрямленного тока на линии связи и необходимость в сглаживающих устройствах (фильтрах) на подстанции.

Потребность в устройстве водяного охлаждения и наличия воды в достаточном количестве и надлежащего качества.

При электрификации жел. дор. принятие того или другого типа подстанции, т. е. выбор типа преобразователя на подстанции, производится на основании экономических и технических соображений.

Мотор-генераторы устанавливаются на подстанциях тех участков жел. дор., где применяется рекуперативное торможение.

При технико-экономическом сравнении в принятии на подстанции мотор-генератора или ртутного выпрямителя на жел. дорогах с гористым или сильно холмистым профилем следует учитывать, что применение рекуперативного торможения дает не только экономию энергии, но, являясь средством торможения, повышает безопасность движения, а также уменьшает износ тормозных колодок, бандажей скатов и рельсов, что дает экономию расходов по ремонту подвижного состава и содержанию верхнего строения пути. На дорогах, где не применяется рекуперативное торможение, на тяговых подстанциях почти исключительно устанавливаются ртутные выпрямители, ввиду их значительных технико-экономических преимуществ.

§ 49. Расположение подстанций по линии жел. дороги

При электрификации жел. дор. условию размещения по линии подстанций уделяется большое внимание.

Расположение подстанций должно соответствовать наивыгоднейшей в технико-экономическом отношении схеме энергоснабжения жел. дороги. Последнее зависит как от места расположения тяговых подстанций, так и от расстояния между ними, т. е. числа подстанций. Расстояние между тяговыми подстанциями влияет на сечение проводов контактной сети. Чем больше расстояние между подстанциями, тем должно быть больше сечение проводов при данном допустимом падении напряжения, но тем меньше, очевидно, будут расходы по подстанциям на 1 км пути. Следовательно, в начале решения вопроса расположения тяговых подстанций по линии жел. дор. необходимо хотя бы в первом приближении знать то теоретическое расстояние между подстанциями, которое отвечает минимуму расходов по подстанциям и контактной сети, а затем уже переходить к выбору числа и мест расположения подстанций по линии жел. дор.

При выборе на линии жел. дор. места расположения подстанции необходимо учитывать следующие основные моменты:

а) тяговые подстанции желательно располагать в местах, удобных для подвода энергии или наличия районной подстанции в целях объединения тяговой и районной подстанций;

б) для осуществления лучшего технического контроля и снабжения материалами, устройства с меньшими затратами водопровода и под'ездных тупиков к подстанции, а также более удобного обслуживания персонала подстанции, следует тяговые подстанции располагать вблизи железно-дорожных станций и раз'ездов;

в) для уменьшения нагрузки контактной сети и обеспечения дальнейшей электрификации примыкающих линий, подстанции необходимо располагать на узловых станциях и местах примыкания жел. дор., а также на сортировочных и деповских станциях;

г) при расположении подстанции с ртутными выпрямителями на раздельном пункте необходимо учитывать потребность в источнике водоснабжения для устройства водяного охлаждения ртутных выпрямителей;

д) размещаемые подстанции должны иметь по возможности одинаковые коэффициенты использования мощности.

Окончательное установление расположения тяговых подстанций по линии жел. дор. производится на основании результатов экономического сравнения нескольких вариантов их размещения, в которых определены соответствующие им строительные стоимости и эксплуатационные расходы по подстанциям и контактной сети.

Наивыгоднейшей схемой расположения подстанций по линии жел. дор. будет та, при которой получается минимум строительно-эксплуатационных расходов и которая в то же время обеспечивает надежность схемы энергоснабжения дороги в целом и учитывает перспективу развития с ростом грузооборота. В условиях изысканий и предварительного проектирования жел. дор. с электровозной тягой, наивыгоднейшее с точки зрения минимума строительных эксплуатационных расходов расстояние между тяговыми подстанциями может быть определено по следующим формулам, предложенным инж. Ю. Е. Рывкиным для однопутных линий

$$L_1 = \sqrt{\frac{3600 I_1}{J_{cp} (0,1 - 0,00005 J_{cp})} - 2I_1^2} \text{ (км)},$$

для двухпутных линий

$$L_2 = \sqrt{\frac{1800 I_2}{J_{cp} (0,08 - 0,00004 J_{cp})} - 0,5I_2^2} \text{ (км)}$$

где L — расстояние между подстанциями в км,

J_{cp} — средний поездной ток,

I — среднее расстояние между действующими раздельными пунктами.

Следует отметить, что величина расстояния между подстанциями при двухпутной линии, определяемая по приведенной формуле, является преувеличенной, так как исходит из параллельного электрического соединения двух путей.

§ 50. Подвижные тяговые подстанции

На постоянных тяговых подстанциях, расположенных по линии жел. дор., помимо числа агрегатов, необходимых для питания участка, устанавливается на каждой подстанции еще один резервный агрегат той же единичной мощности, который включается во время аварии или производства ремонта одного из рабочих агрегатов. Наличие резервного агрегата на каждой подстанции является с одной стороны обеспечением в сохранении нормального движения на дороге, но с другой стороны вызывает значительное увеличение стоимости подстанций. Для уменьшения резерва на всей линии, а так же и получения возможности увеличить мощность подстанции на определенное время года в период интенсивного движения, в Европе и Америке в последнее время появились подвижные подстанции.

Ртутный выпрямитель, являясь статическим преобразователем, имея небольшой вес и занимая малую площадь, допускает использование этих свойств для помещения его на подвижной экипаж. Таким образом получается возможность иметь подвижную тяговую подстанцию.

В начале своего развития подвижные подстанции имели применение на пригородных жел. дор. и загородных трамвайных линиях для усиления питания в периоды интенсивного движения (летнее время), а в другое время использовались для осветительной нагрузки.

В 1926 году в Германии была построена подвижная подстанция с двумя стеклянными ртутными выпрямителями. Эти выпрямители вместе с трансформатором и всем необходимым дополнительным высоковольтным оборудованием размещались на грузовом автомобиле с прицепом. Со стороны высокого напряжения эта подвижная подстанция присоединялась к линии трехфазного тока с напряжением 10 кВ.

В 1929 году в гор. Кэлгери (Канада) была построена автоматическая подвижная подстанция, оборудованная одним металлическим ртутным выпрямителем мощностью 600 кВт и с напряжением 550 в. Все оборудование размещалось на железнодорожной четырехосной платформе, в средней части которой был установлен трансформатор, а по краям с одной стороны ввод с масляным выключателем, а с другой — ртутный выпрямитель со всем дополнительным оборудованием и щит автоматического управления. Подстанция предназначена для трамвайных линий.

Интересно заметить, что работа подстанции полностью автоматизирована и все включения и выключения производятся автомат-

чески от часов. В случае какой-либо неисправности в работе подстанции на контрольный пункт передается сигнал.

В 1930 году подвижные тяговые подстанции с ртутными выпрямителями были введены на итальянских магистральных жел. дор. Подвижная подстанция имеет мощность 2 000 *квт* с напряжением 3 000 *в*.

Все оборудование расположено на специально построенной железнодорожной платформе с двумя тележками, из которых одна трехосная, вторая — двухосная. Общий вид этой подстанции приведен на рис. 178.

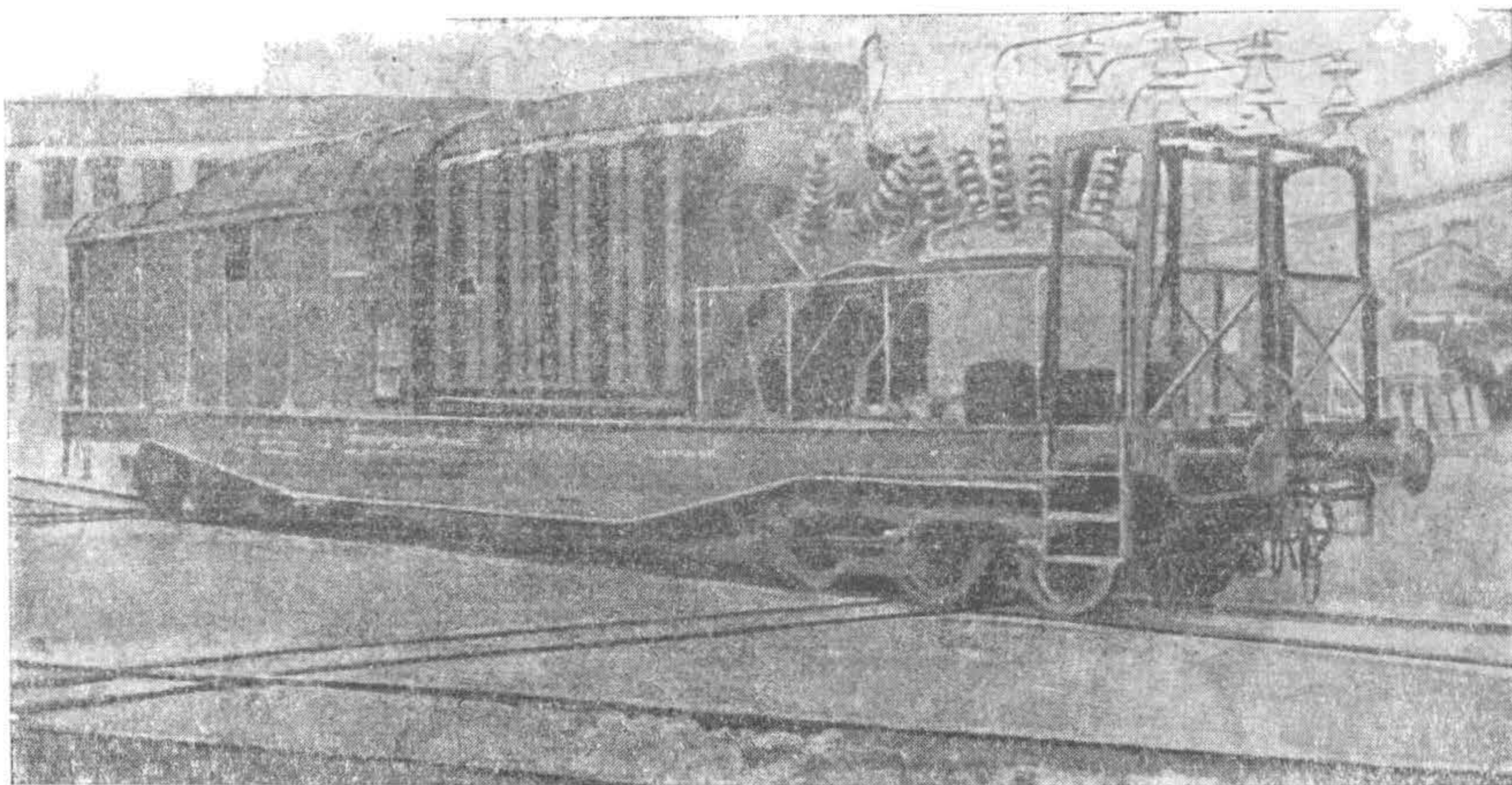


Рис. 178. Общий вид подвижной тяговой подстанции Итальянских жел. дор.

Железнодорожная платформа имеет следующие размеры:

Ширина колеи .	1 435 мм
Длина по буферам	16 900
Наибольшая высота (у трансформатора)	4 280
Наибольшая ширина	2 990
Диаметр колеса	850
Вес платформы	29 т
Вес электрического оборудования	45
Нагрузка на оси	≈ 15

Оборудование подстанции состоит из металлического ртутного выпрямителя мощностью 2 000 *квт* с напряжением на стороне выпрямленного тока 3 000 *в*, трансформатора с естественным охлаждением масла, масляного выключателя, высоковольтного трехполюсного раз'единителя, охлаждающего устройства, быстродействующего автоматического выключателя и щита автоматического управления.

Расположение оборудования на платформе видно из приведенных на рис. 179 плана и разреза подстанции.

С одной стороны в открытой части платформы расположены раз'единители, масляник и силовой трансформатор, с другой стороны

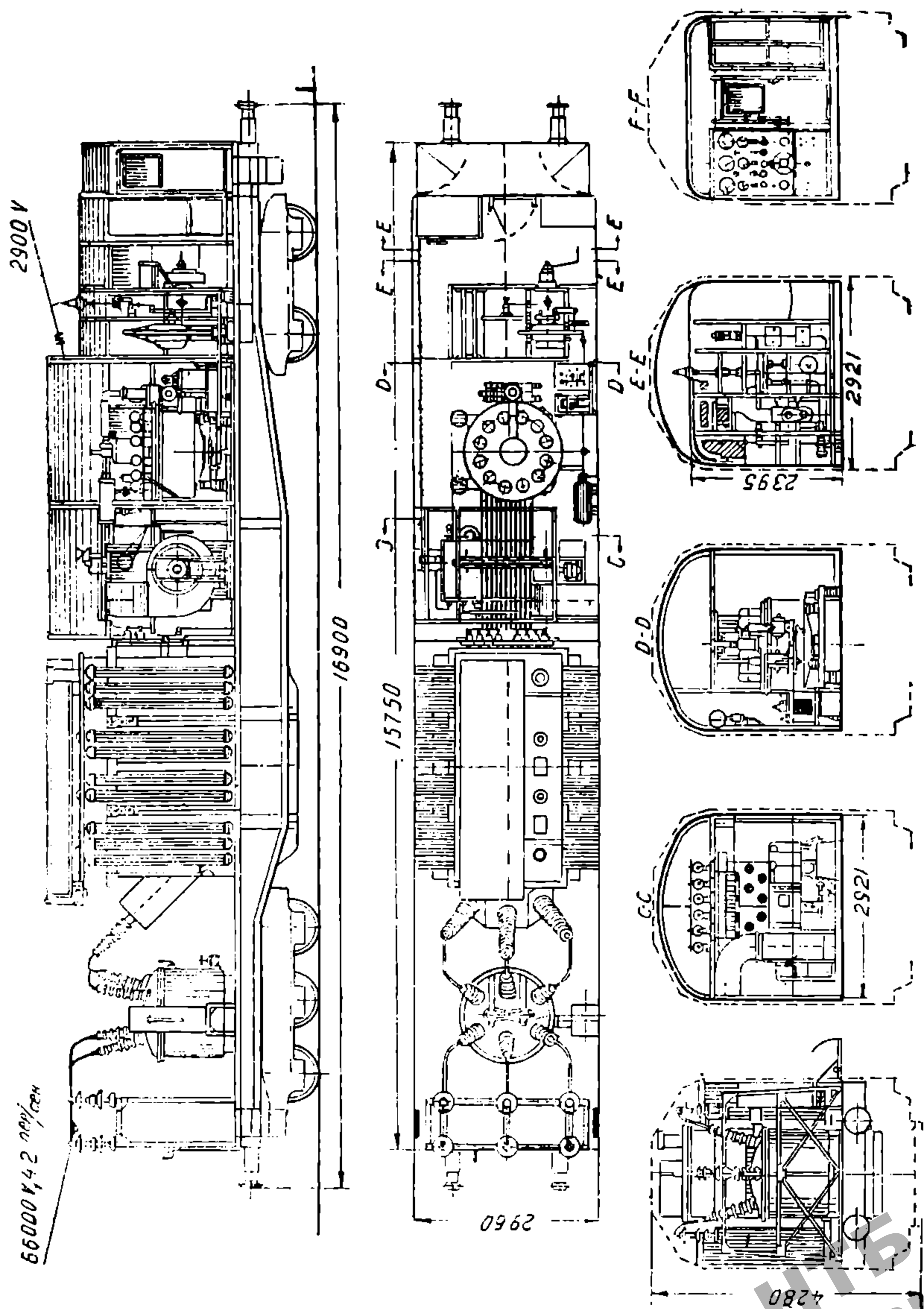


Рис. 179. План и разрезы подвижной тяговой подстанции Итальянских жел. дор.

в закрытой части ртутный выпрямитель с остальным оборудованием подстанции.

Ртутный выпрямитель, имея номинальную мощность 2 000 *квт* допускает следующие перегрузки:

В течение 2 мин.	100%
одного часа	50%
двух часов	20%

Для ртутного выпрямителя и ртутного насоса принята замкнутая система водяного охлаждения. Оборудование системы охлаждения состоит из циркуляционного насоса, радиатора и вентилятора, который приводится в движение мотором.

Подвижная подстанция приключается к высоковольтной линии передачи трехфазного тока с напряжением 66 *кв* и частотой 45 *пер/сек*. Подстанция имеет автоматическое управление от контактных часов и установленных реле, называемых шальт-аппаратами.

Статья 8. РАСЧЕТ МОЩНОСТИ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ

§ 51. Принцип расчета мощности подстанций

Мощность подстанции складывается из мощности установленных агрегатов подстанции. Из общего числа агрегатов, при отсутствии на линии подвижных подстанций, один является резервным, а остальные — рабочими, постоянно находящимися в работе.

Та мощность, которая складывается из мощности рабочих агрегатов, носит название рабочей мощности подстанции, а с включением резервного агрегата называется установленной мощностью. Расчет мощности подстанции заключается в определении необходимой рабочей мощности, обеспечивающей надежное непрерывное питание энергией локомотивов в любой момент, соответствующий принятой организации движения.

Вследствие того, что количество поездов между подстанциями и токи, потребляемые поездами, не остаются постоянными, нагрузка тяговой подстанции, т. е. потребная от нее мощность, непрерывно изменяется.

Чем больше неравномерность движения поездов, тем более резко изменяется нагрузка подстанции.

Существуют два метода определения рабочей мощности подстанции: метод графика движения и приближенный метод по среднему поезвному току.

Наиболее точным методом является метод сечений графика движения, так как он дает характер изменения нагрузки подстанции за рассматриваемый отрезок времени и позволяет проверить получаемые перегрузки в течение того времени, которое соответствует допускаемым значениям перегрузок агрегата, устанавливаемого на подстанции.

Приближенный метод исходит из величины среднего поездного тока, а неравномерность нагрузки учитывается коэффициентом эффективности нагрузки.

При установлении рабочей мощности подстанции, помимо учета перегрузок (пик) в отдельные моменты, необходимо учитывать условия нагревания агрегатов, устанавливаемых на подстанции.

Следует отметить, что характер нагревания мотор-генератора и ртутного выпрямителя не одинаков.

У мотор-генератора, имеющего обмотки на якоре и полюсах генераторов, нагревание будет пропорционально квадрату сил тока и времени их действия, т. е. аналогично нагреванию тяговых электродвигателей.

У ртутного выпрямителя, как статического преобразователя, не имеющего проводников, нагревание пропорционально силе тока в первой степени.

Однако учитывая, что при каждом ртутном выпрямителе имеется специальный для него трансформатор, нагревание которого пропорционально квадрату силы тока, следует признать более желательным и для ртутного выпрямителя расчет вести по среднеквадратичным токам.

Кроме поездных токов при определении нагрузки подстанции необходимо учитывать еще расход на прочие нужды дороги. Этот расход принимается равномерным в течение всего времени и учитывается обычно процентом от поездного расхода тока.

По установленной потребной рабочей мощности подстанции определяется необходимое количество рабочих агрегатов из числа стандартных.

Единичная мощность агрегата для всех подстанций по линии жел. дор. принимается обычно одинаковой.

Степень использования рабочей и установленной мощности подстанции характеризуется так называемым коэффициентом использования мощности подстанции, представляющим отношение количества электрической энергии, отданной в сеть за определенный промежуток времени (обычно принимают расчетные сутки и год), к тому количеству энергии, которое могло бы быть отдано подстанцией в сеть за это время при непрерывной работе с полной мощностью агрегатов.

Чем выше коэффициент использования рабочей мощности, тем больше средний коэффициент полезного действия подстанции.

§ 52. Определение мощности подстанций по графику движения поездов

Величина тока, потребляемая от подстанции поездами в каждый момент времени, определяется путем проведения на графике движения поездов сечения, устанавливающего место нахождения отдельных поездов и токи, потребляемые ими (§ 41).

Для определения рабочей мощности подстанции, так же как и для расчета сечения проводов контактной сети, нет необходимости в определении по графику нагрузки подстанции в течение суток.

Достаточно определение произвести для периода времени, соответствующего наиболее интенсивному движению (т. е. наибольшему количеству поездов между подстанциями), в течение которого подстанция будет иметь наибольшую нагрузку.

Величина расчетного периода суток зависит от характера графика движения. В том случае, если расположение поездов на графике периодически повторяется, то очевидно, в расчет принимается один из периодов.

При выборе расчетного времени на графике помимо количества поездов необходимо учитывать и веса поездов, так как более тяжелые поезда будут потреблять и большие силы тока. Если один расчетный период времени (1—2 часа) не охватывает наиболее трудного момента движения для всех подстанций на линии, то в этом случае необходимо для подстанций слабо нагруженных взять дополнительный наиболее трудный период времени на графике.

Так как период наибольшей нагрузки подстанции является в то же время и периодом наибольшей нагрузки контактной сети, то установленные методом сечения графика в электрическом расчете контактной сети токи с подстанции, являются расчетным и нагрузочными токами для определения рабочей мощности.

По данным значениям нагрузочных токов в каждом сечении графика строится диаграмма изменения нагрузки подстанции за расчетный период времени.

Для установления потребной рабочей мощности подстанции, исходя из среднеквадратичных токов, необходимо знать величину среднего эффективного тока за весь расчетный период времени.

Величина эффективного тока, как установлено ранее в расчете проверки электродвигателя на нагревание, определяется из выражения:

$$J_{эфф} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T J_A^2 dt}.$$

При наличии построенной диаграммы квадратичных нагрузочных токов подстанции величина эффективного тока в квадрате определится как отношение площади образуемой кривой нагрузочных токов к расчетному периоду T , с учетом, конечно, масштабов.

В том случае, когда тяговые расчеты производились по графо-аналитическому методу, кривая нагрузочных токов на диаграмме будет иметь ступенчатый вид, аналогичный нагрузке контактной сети, приведенной на рис. 160.

Величина среднего эффективного тока в этом случае определится из выражения

$$J_{эфф} = \sqrt{\frac{\sum J^2}{n}},$$

где $\sum J^2$ — сумма квадратов мгновенных нагрузочных токов подстанции за весь расчетный период времени T ,
 n — число сечений графика.

Рабочая мощность подстанции определится из выражения.

$$N_p = \frac{E_n \cdot J_{эфф}(1 + \alpha)}{1000 \cdot k},$$

где E_n — напряжение на шинах постоянного тока подстанции,

α — коэффициент, учитывающий дополнительный расход тока с подстанции, помимо поездного,

k — коэффициент допускаемой перегрузки агрегата в течение данного расчетного времени по отношению к его номинальной мощности, принимаемой за единицу.

Определенная таким образом рабочая мощность подстанции должна быть проверена по максимальным (пиковым) нагрузкам. Из диаграммы нагрузочных токов подстанции устанавливаются моменты максимальных нагрузок в течение того промежутка времени, который соответствует продолжительности допускаемой перегрузки агрегата.

Величина эффективного тока за этот отрезок времени

$$J'_{эф} = \sqrt{\frac{\sum J^2}{n'}},$$

где $\sum J^2$ — сумма квадратов максимальных нагрузочных токов, смежных сечений;

n' — число смежных сечений за время проверяемой длительности перегрузки.

Необходимая рабочая мощность подстанции определится из выражения.

$$N_p = \frac{E_n \cdot J'_{эф}(1 + \alpha)}{1000 \kappa_1} \text{ (квт)},$$

где κ_1 — допустимый в данном случае коэффициент перегрузки агрегата.

Из всех полученных величин необходимой рабочей мощности подстанции, для установления мощности и числа рабочих агрегатов принимается ее наибольшее значение.

§ 53. Приближенный метод определения мощности подстанций

В предварительных расчетах, при отсутствии графика движения поездов, величина рабочей мощности подстанции может быть определена приближенным методом по следующей формуле проф. А. Б. Лебедева

$$N_p = \kappa_{эф} \Delta i_{max} L E_n 10^{-3} \text{ (квт)},$$

где Δi_{max} — линейная нагрузка в ампер на км, средняя за время наиболее интенсивного движения;

L — расстояние в км между смежными подстанциями;

E_n — напряжение на шинах постоянного тока подстанции;

$\kappa_{эф}$ — коэффициент эффективности нагрузки подстанции

Величина

$$\Delta i_{max} = \frac{J_{cp}}{L} n,$$

где J_{cp} — средний поездной ток,

n — число поездов, которое может быть одновременно между смежными подстанциями в интенсивный период времени.

Подставляя это значение Δi_{max} в приведенную ранее формулу, получим

$$N_p = K_{эф} J_{cp} n E_n 10^{-3} \text{ (квт)},$$

Величина коэффициента эффективности нагрузки подстанции зависит от числа поездов n и от величины отношения $\frac{T_a}{T_k}$, т. е. времени хода поездов под током к полному времени хода между подстанциями и колеблется в пределах от 1,10 до 1,50.

Чем меньше число поездов n и величина отношения $\frac{T_a}{T_k}$, тем больше значение $K_{эф}$.

Величина $K_{эф}$ может быть определена на основании формулы Н. И. Костромитина, выведенной из анализа математической вероятности совпадения различных режимов нагрузки подстанции при числе n поездов:

$$K_{эф} = \sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{J_{cp}^2} \frac{1}{n}},$$

где σ — среднеквадратичное отклонение при одном поезде и равное

$$\sigma = \sqrt{J_{эф}^2 - J_{cp}^2}$$

где $J_{эф}$ — среднее эффективный ток одного поезда.

Подставляя значение σ в выражение $K_{эф}$ получим

$$K_{эф} = \sqrt{1 + \frac{J_{эф}^2 - J_{cp}^2}{J_{cp}^2} \cdot \frac{1}{n}}.$$

Отношение $\frac{J_{эф}}{J_{cp}}$ представляет коэффициент эффективности для одного поезда, равный

$$K_{1эф} = \frac{J_{эф}}{J_{cp}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{T} \sum J^2 t}}{\frac{1}{T} \sum J t}$$

НТБ
ДНУЖТ

Следовательно, выражение для определения коэффициента эффективности нагрузки подстанции может быть представлено в следующем виде

$$\kappa_{эф} = \sqrt{1 + \frac{J_{эф}^2 - J_{ср}^2}{J_{ср}^2} \cdot \frac{1}{n}} = \sqrt{1 + \frac{\kappa_{1эф}^2 - 1}{n}}.$$

Тогда рабочая мощность подстанции определится из следующей формулы:

$$N_p = \sqrt{1 + \frac{\kappa_{1эф}^2 - 1}{n}} \cdot J_{ср} \cdot n \cdot E_n \cdot 10^{-3} \text{ (квт)}.$$

Получаемая по этой формуле величина мощности является средней рабочей мощностью подстанции.

Проверка на возможные перегрузки производится в этом случае на основании анализа моментов движения и установления положения поездов, которые будут соответствовать максимальным нагрузкам подстанции.

§ 54. Определение нагрузки от электрифицированной жел. дор. на ЦЭС

Для выявления потребной для дороги от ЦЭС мощности и количества электрической энергии определяется расход энергии по всей электрифицированной жел. дор. и строится график суммарной нагрузки всех подстанций.

Величина потребного количества энергии на движение на шинах высокого напряжения подстанций определяется как указано в § 31. При определении суточного и годового расхода энергии по всей дороге необходимо учитывать расход энергии на существующие по линии депо и прочие устройства.

Для установления характера нагрузки от жел. дороги на ЦЭС, помимо определения общего расхода энергии необходимо построить графики нагрузки.

Эти графики нагрузки строятся на основании диаграмм нагрузки подстанций.

График нагрузки ЦЭС от железной дороги желательно строить как для суток наиболее интенсивного движения, определяющего наибольшую суточную нагрузку ЦЭС, так и для наиболее слабого движения.

Максимальная нагрузка ЦЭС определится из диаграмм нагрузочных токов подстанции за те часы интенсивного движения, которые были приняты при расчете мощности подстанций.

ГЛАВА V

ЭЛЕКТРОВОЗНЫЙ ПАРК И ДЕПОВСКИЕ УСТРОЙСТВА

§ 55. Обслуживание электровозов бригадами

На жел. дор. СССР применяется система хозяйственного обслуживания локомотивов, с прикрепляемыми к ним постоянными бригадами.

Такая система обслуживания обеспечивает правильное содержание и технически исправное состояние локомотивов.

Для паровозов основной системой обслуживания является спаренная езда.

При спаренной езде обслуживание паровоза производится двумя постоянными прикрепленными к нему бригадами, при этом наибольшее время месячной работы каждой бригады не должно превышать нормы месячного рабочего времени с допущением не свыше 24 часов сверхурочной работы. Когда одна из спаренных бригад обслуживает паровоз от основного депо до оборотного и обратно, вторая бригада в это время находится на отдыхе в пункте основного депо, который является постоянным местожительством бригад. При поездках от основного депо до оборотного, в последнем бригады имеют кратковременный отдых; в течение этого времени паровоз находится в ожидании бригады.

Продолжительность отдыха, согласно положению НКТ, должна быть равна половине предшествовавшего рабочего времени. Общее время работы паровоза в месяц при спаренной езде ограничено выработкой нормы месячного рабочего времени обеих паровозных бригад.

Для электровозов основной системой обслуживания является также спаренная езда, но вследствие меньшей затраты времени на приготовление и подачу к поезду электровоза в основном и оборотном депо, при двух спаренных бригадах получается неполное использование электровоза и бесполезный простой в основном депо в ожидании бригады. Поэтому, не нарушая основного принципа спаренной езды прикрепление к электровозу постоянных бригад, отвечающих за содержание и исправное состояние, обслуживание электровозов более целесообразно производить строеными бригадами.

Следует отметить, что в некоторых случаях наилучшее использование электровоза может быть при применении спаренной езды, с добавочной бригадой, которая прикрепляется еще к одному или двум электровозам.

Бригады поездного электровоза состоит из 2 человек: машиниста и его помощника. Кстати, следует заметить, что в силу пор-

стоты и удобства управления электровозом особой необходимости в рабочей помощи машинисту со стороны помощника нет.

Время работы электровозной бригады складывается из времени работы на электровозе в движении с поездом и времени, затрачиваемого бригадой на производство операций по обслуживанию электровоза в основном и оборотном депо.

Продолжительность непрерывной работы электровозной бригады не должна быть более 10 часов.

Установление точных норм затраты времени бригадой по обслуживанию электровоза вне поездов на основном и оборотном депо может быть произведено лишь на основании длительного опыта эксплуатации электровозов.

В предварительных расчетах, при отсутствии точных данных, могут быть ориентировочно приняты следующие приближенные нормы, которые приводятся в работе ЦИС.

Место	Род работы	Продолжительность в часах
Основное депо .	Приемка электровоза бригадой .	0,50
Оборотное депо.	Подача электровоза под поезд	0,25
	Следование электровоза от поездов и постановка в стойло на время отдыха бригады	0,25
Основное депо .	Подача электровоза под поезд	0,25
	Следование электровоза от поезда в стойло	0,25
	Сдача электровоза	0,50

§ 56. Виды технического осмотра и ремонтов электровоза

Опыт эксплуатации электровозов на электрифицированных жел. дорогах СССР не позволяет еще ввиду его непродолжительности установить достаточно точно пробеги электровозов между отдельными видами ремонта и продолжительность этих ремонтов. На основе учета реконструктивных мероприятий на жел. дор. СССР, и в соответствии с опытом эксплуатации электровозов постоянного тока на электрифицированных жел. дор. Европы и Америки, ЦИС рекомендует принимать для предварительных расчетов следующие приближенные данные:

1. Междупоездной осмотр электровоза после пробега 250—350 км продолжительностью от 0,5 до 1 часа. За время осмотра проверяется правильность работы контакторов и пневматического оборудования электровоза, производится пополнение смазки и засыпка песочниц песком.

2. Детальный осмотр и текущий ремонт электровоза после пробега 4 000—5 000 км. Продолжительность осмотра и ремонта 4—6 часов. При осмотре проверяется смазка и износ подшипни-

ков, производится осмотр щеток и смена их по мере надобности; проверяются контакторы электровоза и пантографы. Производится продувка всех частей электрооборудования сжатым воздухом.

3. Обточка бандажей электровоза после пробега 75 000 км. Продолжительность — двое суток.

4. Периодический ремонт электровоза после пробега 150 000 км. Длительность периодического ремонта — 10 суток.

За это время производится полный демонтаж электровоза, ремонт электрического оборудования и механической части (тележки, упряжные и тормозные приборы, обточка бандажей, смена в случае надобности больших зубчаток в передаче).

5. После пробега 450 000 км, т. е. после двух периодических ремонтов, производится большой периодический ремонт электровоза продолжительность 15 суток,

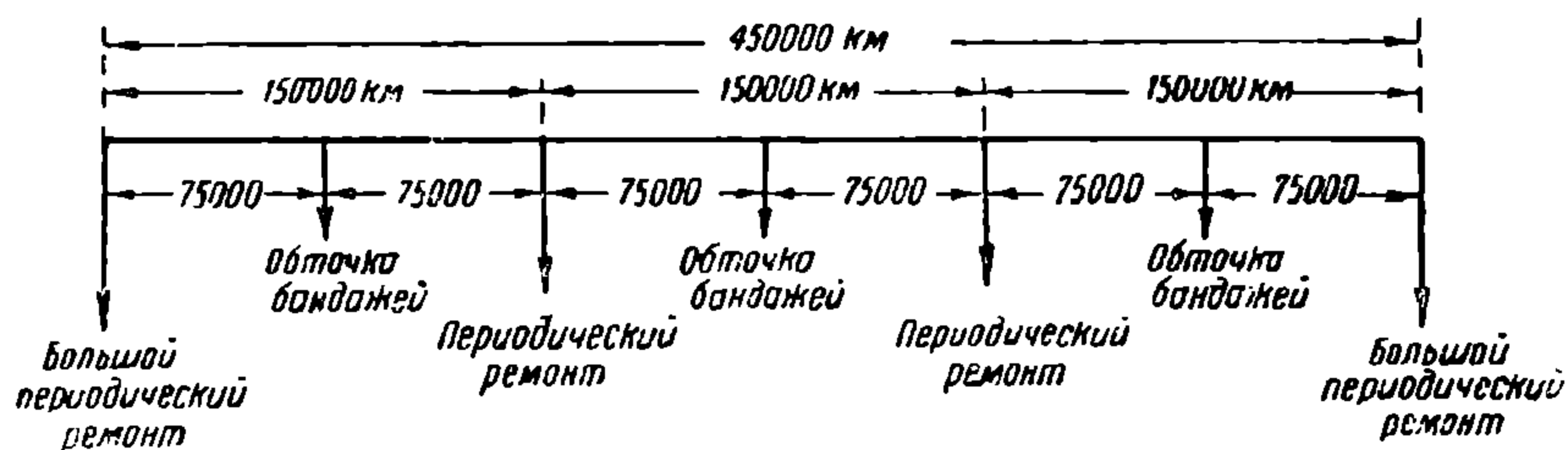


Рис. 180.

Последовательность ремонтов электровоза схематически показана на рис. 180.

Приведенные виды ремонта, за исключением периодических, производятся в мастерских основного депо.

Периодические ремонты производятся на ремонтном заводе или мастерских дороги.

§ 57. Определение времени оборота электровоза

Время оборота электровоза складывается из отдельных элементов времени с момента принятия электровоза бригадой в основном депо до момента сдачи (включительно) электровоза бригадой после поездки, включая кроме того время на текущий осмотр и ремонт электровоза, приходящееся на один оборот.

При точных подсчетах оборот электровозов определяется по графику движения поездов и точно установленным нормам времени пребывания электровоза в пунктах оборота.

При приближенных подсчетах оборот электровоза может быть определен на основании приведенных ранее норм.

Время полного оборота электровоза в часах определяется следующими элементами:

t_1 — время на приемку электровоза бригадой в основном депо и подачу под поезд 0,75 час,

t_2 — время нахождения в пути от основного до оборотного депо, равное

$$t_2 = \frac{L}{v_y^T},$$

где L — расстояние между основным и оборотным депо в км.
 v_y^T — участковая скорость при движении от основного до оборотного депо,

t_3 — время от момента отцепки электровоза от поезда до сдачи электровоза в оборотном депо $t_3 = 0,25$ час.,

t_4 — время простоя электровоза в оборотном депо в ожидании отдыха бригады, равное

$$t_4 = \frac{t_1 + t_2 + t_3}{2} = 0,5 + \frac{L}{2v_y^T}.$$

t_5 — время на прием и подачу электровоза под поезд в оборотном депо, равное $t_5 = 0,25$ час.,

t_6 — время нахождения в пути от оборотного депо до основного, равное

$$t_6 = \frac{L}{v_y^O},$$

где v_y^O — участковая скорость при движении от оборотного депо к основному,

t_7 — время от момента отцепки электровоза от поезда в основном депо до момента сдачи электровоза, равное 0,25 час.,

t_8 — время на сдачу электровоза равное 0,50 час.,

t_9 — время на простой электровоза в ожидании поездов в основном и оборотном депо вследствие неравномерности движения, которое при числе n пар поездов в сутки, может быть в среднем принято равным $\frac{24}{n}$,

t_{10} — время, необходимое для междупоездного осмотра 1,0 час.,

t_{11} — время, приходящееся на один оборот электровоза из общего времени, затрачиваемого на текущий осмотр и ремонт электровоза, включая и обточку.

При приведенных ранее величинах пробега электровоза — между текущими осмотром и обточкой бандажей, учитывая, что каждая вторая обточка совпадает с большим ремонтом, величина t_{11} определится из следующего выражения:

$$t_{11} = \frac{2 \cdot L \cdot 5}{4500} + \frac{2 \cdot L \cdot 48 \cdot 0,5}{75000} = 0,003 L (\text{час.}).$$

Время полного оборота электровоза равно

$$T = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6 + t_7 + t_8 + t_9 + t_{10} + t_{11};$$

подставив значения t и произведя преобразования, получим:

$$T = \left(\frac{2L}{v_y} + \frac{L}{2v_y^2} + \frac{24}{n} + 0,003L + 3,5 \right) \text{ (час)},$$

где v_y — участковая скорость движения в оба направления.

§ 58. Определение эксплуатируемого парка электровозов

Количество электровозов, находящихся в распоряжении дороги, называется электровозным парком дороги.

Электровозный парк дороги состоит из двух частей: 1) эксплуатируемого парка и 2) неэксплуатируемого парка электровозов.

В эксплуатируемый парк электровозов входят:

- 1) электровозы, находящиеся в работе в поездах,
- 2) маневровые электровозы,
- 3) электровозы, находящиеся в пунктах оборота в ожидании отправления с поездами,
- 4) электровозы, находящиеся на осмотре и в текущем ремонте в депо (включая и обточку бандажей).

В неэксплуатируемый парк электровозов входят все больные электровозы, находящиеся в ремонте, а также электровозы, находящиеся в запасе дороги.

Количество электровозов эксплуатируемого парка определяется отдельно по каждому роду работы электровозов поездных, маневровых, хозяйственных, толкачей и электровозов кратной тяги.

Определение потребного эксплуатируемого парка поездных электровозов может быть произведено следующими способами: по графику оборота, по средне-суточному пробегу, по коэффициенту потребности. Наиболее точным способом является определение по графику оборота электровозов.

График оборота электровозов строится на основании графика движения поездов и представляет собой графическое изображение работы электровоза для обслуживания всего количества поездов, нанесенных на графике движения; при этом количество дней, потребное одному электровозу для обслуживания всех поездов, определяет собой необходимое количество электровозов.

Потребность эксплуатируемых поездных электровозов по средне-суточному пробегу определяется из следующего выражения:

$$\mathcal{E} = \frac{2 \cdot L \cdot n}{S}.$$

где L — расстояние между основным и оборотным депо в км,
 n — число пар поездов в сутки,

S — величина среднесуточного пробега электровоза, представляет собой электровозы-километры, приходящиеся в сутки в среднем

на один эксплуатируемый электровоз в депо, и устанавливается или расчетным путем, или на основании практических данных эксплуатации.

Коэффициентом потребности называется число, показывающее сколько необходимо электровозов для обслуживания одной пары поездов на данном деповском участке.

Коэффициент потребности может быть достаточно точно установлен на основе графика оборота электровозов.

Если же аналитически определено время в часах оборота электровоза, то коэффициент потребности определяется очень просто, так как он представляет собой величину времени оборота электровоза, выраженную в сутках.

Следовательно, коэффициент потребности K равен

$$K = \frac{T}{24}.$$

При числе пар поездов n потребный эксплуатируемый парк электровозов определится произведением коэффициента потребности на число пар поездов, т. е.

$$\mathcal{E} = K \cdot n = \frac{T \cdot n}{24}.$$

Подставляя вместо T его значение, определенное ранее, получим выражение для определения потребного числа электровозов эксплуатируемого парка для данного деповского участка длиной L км, при числе пар поездов n и участковой скорости v_y

$$\mathcal{E} = \frac{T \cdot n}{24} = \frac{1}{24} \left(\frac{2L}{v_y} + \frac{L}{2v_y^T} + \frac{24}{n} + 0,003L + 3,5 \right) n.$$

Потребное количество маневровых электровозов определяется в зависимости от числа перерабатываемых вагонов, рода и характера работы станций.

Следует отметить, что на электрических жел. дор. в качестве маневрового локомотива применяются также тепловозы и аккумуляторные электровозы. Установление того или другого типа маневрового локомотива производится на основании технико-экономических соображений.

Потребное количество электровозов для хозяйственных перевозок дороги зависит от местных условий дороги.

При применении на отдельных участках дороги подталкивания или кратной тяги, потребное, дополнительно к поездным, количество электровозов зависит от размеров применения подталкивания или кратной тяги, организации движения и определяется на основании графика движения поездов.

§ 59. Определение инвентарного парка электровозов

Количество эксплуатируемых электровозов в маневровой, хозяйственной работе и подталкивании зависит от местных условий работы дороги и не может быть выражено в зависимости от длины тягового участка и числа пар поездов. В дальнейшем приводится определение лишь потребного инвентарного парка поездных электровозов.

Инвентарный парк поездных электровозов состоит из эксплуатируемого парка и электровозов, находящихся в заводском ремонте, в случайном ремонте и в запасе дороги на неравномерность движения.

Следовательно, для определения инвентарного парка электровозов необходимо определить количество электровозов, находящихся в периодическом заводском ремонте, в случайном ремонте и находящихся в запасе.

Количество электровозов, находящихся в периодическом ремонте, определится в зависимости от нормы пробега между ремонтом и продолжительности простоя в ремонте.

При приведенных ранее нормах пробега между периодическими ремонтами и их продолжительности число электровозов, находящихся в периодическом ремонте, определится по формуле:

$$I_{\text{пр}} = \frac{1}{24} \cdot \frac{(10 \cdot 2 + 15 \cdot 1) \cdot 24}{450\,000} \cdot 2 \cdot L \cdot n = \frac{1}{24} \cdot 0,0037 \cdot L \cdot n.$$

Число электровозов, находящихся в случайном ремонте, а также число электровозов в запасе на неравномерность движения принимается в процентах от эксплуатируемого парка электровозов.

Случайный ремонт электровозов может быть принят в размере 1 — 2% от эксплуатируемых электровозов. Запас электровозов на неравномерность движения служит пополнением в период кратковременного увеличения движения, эксплуатируемого парка электровозов, определенного из условия равномерного движения поездов в течение года.

Учитывая возможность планового регулирования как поступления самих грузов, так и использования перевозочных средств, число электровозов в запасе в среднем может быть принято в размере 15% от эксплуатируемого парка электровозов.

Следовательно количество электровозов в случайном ремонте и в запасе на неравномерность движения равно

$$I_{\text{с.з}} = 0,02 \mathcal{E} + 0,15 \mathcal{E} = 0,17 \mathcal{E}.$$

Тогда полный инвентарный парк электровозов определится следующим выражением:

$$I = \mathcal{E} + I_{\text{пр}} + I_{\text{с.з}} = 1,17 \mathcal{E} + I_{\text{пр}}.$$

Подставляя определенные ранее значения \mathcal{E} и $I_{\text{пр}}$, получим развернутую формулу для определения инвентарного парка электровозов.

$$I = 1,17 \mathcal{E} + I_{\text{пр}} = 1,17 \mathcal{E} + \frac{1}{24} \cdot 0,0037 L \cdot n = \\ = \frac{1}{24} \left[1,17 \left(\frac{2L}{v_y} + \frac{L}{2v_y^T} + \frac{24}{n} + 0,003L + 3,5 \right) + 0,0037L \right] n.$$

Произведя преобразования, имеем:

$$I = 0,049 n \left(\frac{2,5L}{v_y} + \frac{L}{2v_y^T} + 0,0067L + 3,5 \right) + 1,17.$$

В том случае, когда участковая скорость v_y^T в направлении от основного до оборотного депо равна средней участковой скорости v_y , формула для определения инвентарного парка электровозов будет иметь следующий вид:

$$I = 0,049 n \left(\frac{2,5L}{v_y} + 0,0067L + 3,5 \right) + 1,17,$$

где n — число пар поездов в среднем в сутки за год;

L — расстояние в км между пунктами оборота электровозов.

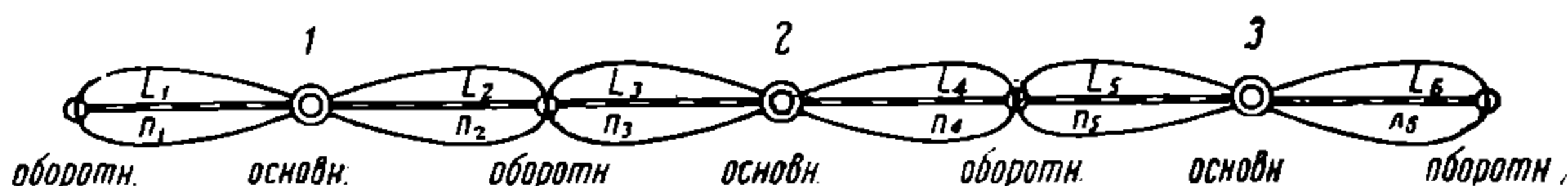


Рис. 181.

Определение инвентарного парка поездных электровозов для всей дороги производится путем определения числа электровозов инвентарного парка для каждого тягового плеча в отдельности.

На рис. 181 приведена схема расположения по линии жел. дор. основных и оборотных депо, с указанием длин тяговых плеч и среднесуточного числа пар поездов.

Инвентарный парк поездных электровозов дороги в соответствии с приведенной схемой будет равен

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 + I_5 + I_6.$$

§ 60. Определение числа электровозных стойл в депо

Для целей текущего ремонта, осмотра и стоянки электровозов во время отдыха бригад депо имеет электровозное здание с отдельными стойлами для электровозов.

Так как текущий ремонт электровозов производится только в основном депо, на что имеются деповские мастерские, то в обо-

ротном депо устраиваются стойла лишь для осмотра и стоянки электровозов во время отдыха электровозной бригады.

В том случае, когда к оборотному депо приписаны некоторые электровозы (например, с примыкающей ветви), то и в оборотном депо устраиваются стойла для ремонта приписных электровозов.

Стойла электровозного здания в основном депо служат для следующих целей:

- | | |
|---|-----------|
| 1. Для детального осмотра и текущего ремонта электровозов | • • C_1 |
| 2. Для обточ-и бандажей . | • • C_2 |
| 3. Для случайного ремонта . . | • C_3 |
| 4. Для междупоездного осмотра . | C_4 |
| 5. Для стоянки электровозов | • C_5 |

Установление необходимого числа стойл в депо при точных подсчетах производится на основании графика оборота электровозов. При приближенных подсчетах необходимое число стойл в депо может быть определено на основании суточного пробега электровозов, т. е. электровозо-километров и по установленной норме пробега между отдельными видами ремонта и осмотра и их продолжительности. Далее приводятся формулы для определения при приближенных подсчетах числа стойл в основном и в оборотном депо.

Число стойл в основном депо по каждому назначению в отдельности определится из следующих формул:

1. Стойла для детального осмотра и текущего ремонта электровозов C_1 .

$$C_1 = \frac{1}{24} \cdot \frac{5\alpha}{4500} \Sigma 2 \cdot L \cdot n \cong 0,0001 \alpha \Sigma L \cdot n,$$

где — 4 500 — пробег в км между детальным осмотром и текущим ремонтом,

5 — продолжительность осмотра в часах,

α — коэффициент неравномерности движения

$\Sigma 2 \cdot L \cdot n$ — суточный пробег всех поездов по примыкающим к основному депо тяговым участкам. Для основного депо (1), приведенного на рис. 181,

$$\Sigma 2 \cdot L \cdot n = 2 \Sigma L \cdot n = 2 (L_1 n_1 + L_2 n_2).$$

2. Стойла для обточки бандажей:

$$C_2 = \frac{1}{24} \cdot \frac{2 \cdot \frac{1}{2} \cdot 24 \alpha}{75000} \Sigma 2 \cdot L \cdot n \cong 0,00003 \alpha \Sigma L \cdot n.$$

3. Стойла для случайного ремонта:

$$C_3 = 0,02 \Sigma.$$

4. Стойла для междупоездного осмотра

$$C_4 = \frac{1,0 \cdot \alpha}{24} \Sigma n \cong 0,042 \alpha \Sigma n,$$

где Σn — сумма пар поездов в сутки по примыкающим к основному депо тяговым участкам.

5. Стойла для стоянки во время приемки и сдачи электро-
возов:

$$C_5 = \frac{\alpha}{24} \Sigma \left(0,5 + 0,5 + \frac{12}{n} \right) \cong 0,042 \cdot \alpha \Sigma \left(1 + \frac{12}{n} \right) n,$$

где n — число пар поездов в сутки в среднем за год

$\frac{12}{n}$ — простой электровоза в стойле в ожидании поезда при
числе n пар поездов в сутки.

При определении числа стойл по каждому назначению в отдельности полученная величина округляется до целого числа.

Общее число стойл для поездных электровозов в основном депо равно

$$C_{осн} = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5.$$

Число стойл в оборотном депо для стоянки электровозов во время отдыха бригад может быть определено из следующей формулы:

$$\begin{aligned} C_{обор} &= \frac{\alpha}{24} \Sigma \left(\frac{L}{2v_y^T} + 1,0 + \frac{12}{n} \right) n \cong \\ &\cong 0,042 \alpha \Sigma \left(\frac{L}{2v_y^T} + 1,0 + \frac{12}{n} \right) n. \end{aligned}$$

Следует отметить, что полное потребное число стойл в оборотном депо устраивается в местности с суровым климатом.

В местности с мягким климатом постройка всего потребного количества стойл в оборотном депо не является необходимой.

НТБ
ДНУЖТ

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. Флаксерман. Классики марксизма и партия об электрификации. Партиздат 1932 г.
2. Академик Г. М. Кржижановский. Электроэнергетика, том I. Энергоиздат 1933 г.
3. Госплан СССР. «Генеральный план электрификации СССР», том III. Электрификация транспорта. Соцэкгиз 1932 г.
4. Материалы к I Всесоюзной конференции по электрификации железных дорог СССР. «Выбор системы тока для электрификации железных дорог СССР». Сборники первый и второй (Труды Научно-исследовательского института НКПС по электрификации жел. дор.). ОГИЗ, Гострансиздат 1932 г.
5. ВЭК. «Резолюция I Всесоюзной конференции по электрификации железных дорог СССР». Москва 1932 г.
6. Е. С. и А. С. Аватковы. Электрическая тяга на однофазном токе нормальной частоты. Трансжелдориздат. Москва 1934 г.
7. Проф. А. Б. Лебедев. Расчеты элементов электрических жел. дор. Издательство Кубуч. Ленинград 1930 г.
8. Проф. А. В. Вульф. Электрическая тяга. Издательство Кубуч. Ленинград 1926 г.
9. Проф. Л. Н. Бернацкий. Электрическая тяга. Госиздат. Москва 1926 г.
10. В. Б. Медель. Магистральные дороги постоянного тока. ОГИЗ Гострансиздат. Москва 1931 г.
11. Проф. В. А. Шевалин. Тяговые расчеты электрических железных дорог и трамваев. Кубуч. Ленинград 1931 г.
12. Г. А. Лучай. Тяговые расчеты при электрической тяге (постоянный ток) ОГИЗ Гострансиздат. Москва 1932 г.
13. Д-р. инж. Е. Е. Зеефельнер. Электрическая тяга. Транспечать. Москва 1926 г.
14. А. Т. Довер. Электрическая тяга. Транспечать. Москва 1929 г.
15. А. Х. Зильберталь. Рекуперация энергии на электрических железных дорогах и трамваях. Гострансиздат. Москва 1932 г.
16. Проф. Г. Ф. Трюмен. Электрификация железных дорог. Гостехиздат Москва 1927 г.
17. Кент Т. Хилли. Электрификация железных дорог. Госжелдориздат 1933 г.
18. А. Н. Худатов. Техничко-экономические предпосылки электрификации железных дорог СССР. Гострансиздат. Москва 1932 г.
19. М. М. Альбац. Тяговые подстанции и контактная сеть на электрифицированных железных дорогах США. Госжелдориздат. Москва 1933 г.
20. И. С. Иванов. Контактная сеть электрических железных дорог. ОГИЗ Гострансиздат. Москва 1932 г.
21. Б. Н. Широкогоров. Основы электрической тяги. Трансжелдориздат. Москва 1934 г.
22. Г. А. Герливанов. Подвижной состав электрических железных дорог. ОГИЗ Гострансиздат 1932 г.
23. ЦИС НКПС. Расчеты электрооборудования на проектируемых железных дорогах с электровозной тягой. Издание НКПССтрой. Москва 1931 г.

24. Э.Т.У. «Технические условия проектирования железнодорожных линий магистрального значения с электровозной тягой. ЦИС НКПС. Изд. ЦУД НКПС 1931 г.
25. ЦИС НКПС. Эксплоатационные расходы жел. дорог. с электровозной тягой ОГИЗ Гострансиздат. Москва 1932 г.
26. ЦИС НКПС. Установление наивыгоднейшей скорости движения на руководящем пол'еме при электровозной тяге. ОГИЗ Гострансиздат 1931 г.
27. И. С. Иванов. Расчеты цепной подвески контактных линий электрических железных дорог. ОГИЗ Гострансиздат 1931 г.
28. ЦИС НКПС. Ю. Е. Рывкин. Расчеты тяговых подстанций и контактной сети. Трансжелдориздат. Москва 1934 г.
29. ЦИС НКПС. Тяговое хозяйство электрических железных дорог. Предварительный метод расчета и размещения. Гострансиздат. Москва 1932 г.
30. Н. М. Фетисов. Сурамские мотор-генераторы. Трансжелдориздат 1934 г.
31. Б. А. Карякин. Тяговая подстанция и ее работа. Трансжелдориздат 1934 г.
32. И. И. Власов. Устройство и монтаж контактной сети. Трансжелдориздат 1934 г.
33. Жапио и А. Ферран. Электрическая тяга в Северо-американских Соединенных штатах. ОГИЗ. Гострансиздат. Москва 1931 г.
34. В. Б. Медель. Электрификация французских магистральных железных дорог Изд. ИТС Моск.-Курской жел. дор. 1928 г.
35. Г. Герливанов. И. Иванов. Электрификация железных дорог Западной Европы. Гострансиздат. 1932 г.
36. Центральный Научно-исследовательский институт экономика транспорта НКПС. «Электрификация железнодорожных магистралей Великобритании. ОГИ Гострансиздат 1931 г.
37. W. Wechmann. Der elektrische Zugbetrieb der Deutschen Reichsbahn. Berlin 1924 г.
38. F. W. Carter. Railway Electric Traction. London. 1922 г.
39. R. Martin. Traction électrique. Paris 1920 г.
40. A. Carnier. L'éctrification de chemins de fer fransais et l'expériance americain. Technlque Modern 1921 г.
41. A. S. Richey. Electric Railway Handbook. New-Jork 1924 г.
42. Zweite Weltkraftkonferenz 1930 г. W. D. Bearce-Economies. of electric Traction for Trunc Line Railroads.
43. D-r Ing. Th Buchhold und Dipl Ing. F. Trawnik. Die electricshen Ausrüstungen der Gleichstrombahnen. Berlin 1931 г.

НТБ
ДНУЖТ

Сканировала Сидорчик Е. В.

НТБ
ДНУЖТ