

14/7/7

Одобрено кафедрой
«Вагоны и вагонное
хозяйство»

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ВАГОНОВ

РАЗДЕЛ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ НАГРЕВАТЕЛИ СОПРОТИВЛЕНИЯ В ВАГОННОМ ХОЗЯЙСТВЕ

Методические указания
к курсовому и дипломному проектированию
для студентов специальности
190302 ВАГОНЫ (В)



С о с т а в и т е л ь — канд. техн. наук, доц. В.Е. Новиков

Р е ц е н з е н т — канд. техн. наук, доц. Б.З. Брейтер

1. ВВЕДЕНИЕ

Настоящие методические указания призваны помочь студентам механикам при работе над курсовыми работами и дипломными проектами, связанными с расчетом и выбором электронагревательных элементов, компоновкой и защитой их схем включения.

Хотя большая часть материала и рассматривается на примерах элементов электрического отопления пассажирских вагонов, приводимые методики расчета могут быть использованы и применительно к аналогичному оборудованию вагоноремонтных предприятий.

На вагоноремонтных предприятиях и в вагонах электроэнергия достаточно широко используется для обогрева помещений, подогрева рабочих жидкостей и газов, термической обработки изделий, сушки древесины и т.д. Широкому использованию электронагрева способствует ряд его преимуществ, среди которых следует назвать возможность получения высоких температур и простоту регулирования температурного режима в достаточно широком диапазоне.

Для преобразования электрической энергии в тепловую на предприятиях и в вагонах широко используют электрические нагреватели (ЭН) сопротивления [4, 5]. В промышленности и в том числе на предприятиях вагоноремонтного производства кроме того находят применение дуговые печи, установки индукционного и плазменного нагрева и т.д. [2].

Широкое использование электрической энергии, например, для отопления вагонов, объясняется тем, что позволяет исключить расходы на хранение и доставку твердого топлива, облегчает труд проводника, исключает загрязнение окружающей среды. Кроме того возможна полная автоматизация работы системы отопления, что обеспечивает четкое поддержание заданного температурного режима при оптимальном расходе энергии.

Кроме основной задачи, связанной с обогревом внутренних помещений, ЭН обеспечивают нагрев воды в кипятильнике и в системе горячего водоснабжения, подогрев масла в компрессоре и обогрев сливных и наливных патрубков. Все это дополнительно облегчает труд проводника, способствует улучшению

обслуживания пассажиров и создает благоприятные условия для работы вагонного оборудования.

С развитием вагонных энергосиловых установок круг задач, решаемых в вагоне с помощью ЭН, постоянно расширяется, что сопровождается ростом их суммарной мощности и в абсолютном исчислении, и по отношению к мощности остального оборудования. Например, в вагонах раннего выпуска с электрооборудованием типов 47Д (производство Германии) и ЭВ.10 (отечественного производства), не оборудованных холодильными установками (условно, вагоны без кондиционирования), мощность ЭН равнялась, соответственно, 2,9 и 2,2 кВт. По отношению к мощности остальных потребителей электроэнергии это составляло примерно 38 и 31%. В вагонах типа 47К с холодильными установками (условно, вагоны с кондиционированием) мощность ЭН равна 14,2 кВт, составляя примерно 42% от общей мощности потребителей. Особенно заметно было повышение абсолютной и относительной мощности ЭН в вагоне-ресторане производства Германии, спроектированном в свое время для железных дорог СССР. Общая мощность нагревателей, получавших питание от высоковольтной вагонной магистрали через специальный тиристорный преобразователь, составляла в этом вагоне примерно 61 кВт. Необходимо отметить, что приведенные для всех вагонов цифры даны без учета мощности высоковольтных ЭН, используемых для отопления внутренних помещений вагона в зимний период. Они получают питание по магистрали непосредственно от централизованного источника. С учетом мощности высоковольтного отопления цифры, приведенные для каждого типа вагона, должны быть увеличены на 48 кВт.

На дорогах России в настоящее время эксплуатируются вагоны с кондиционированием и с централизованной системой электроснабжения (ЦЭС) типа WLX производства Германии, способные работать при подаче в магистраль как постоянного (1500 и 3000 В), так и переменного (1500 и 3000 В, 50 Гц и 1000 В, 16 2/3 Гц) тока. Для этого они оснащены специальными тиристорными преобразователями. Ящики, в которых размещены преобразователи под вагоном, оборудова-

ны отдельными высоковольтными нагревателями общей мощностью 16 кВт.

Расширение области применения ЭН особенно заметно в пассажирских вагонах. Увеличение потребляемой ЭН мощности и усложнение их схем включения заставляет внимательно относиться к расчету элементов отопления, компоновке его схем и выбору устройств защиты от перегрузочных и аварийных режимов, добиваясь наилучшего использования оборудования, экономного расходования электроэнергии и обеспечения требуемой безопасности в условиях эксплуатации.

Приводимые далее сведения и рекомендации при необходимости могут быть дополнены студентами путем самостоятельного изучения технической литературы, список которой приведен в конце работы.

Напомним, что область применения ЭН в вагонном хозяйстве не ограничивается только пассажирскими вагонами. Эти элементы широко используются в рефрижераторном подвижном составе, а также на вагоноремонтных предприятиях, где с их помощью создаются необходимые температурные условия для сохранности перевозимых грузов (в первом случае), а также работы людей и для обработки изделий (во втором). Поэтому приводимые ниже сведения и рекомендации могут оказаться полезными и при проектировании отопительных установок для вагоноремонтных предприятий, в которых используются электрические нагреватели сопротивления.

2. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЭЛЕКТРООТОПЛЕНИЯ ВАГОНОВ И ЕГО СОСТАВНЫХ ЧАСТЕЙ

В состав системы отопления вагона кроме нагревательных элементов входят источники питания, проводные сети, аппараты коммутации и защиты, цепи управления. Все перечисленные элементы входят и в состав нагревательных установок предприятий.

Системы электрического отопления. В зависимости от размещения ЭН и способа передачи выделяемого ими тепла во внутренние помещения вагона различают следующие виды

отопления: калориферное, электропечное, комбинированное [4, 5].

При *электрокалориферном отоплении* ЭН размещаются на входе воздуховода вентиляционной системы вагона. Весь воздух, подаваемый вентилятором, проходит через калорифер, нагревается и подается во внутренние помещения. Основная часть тепла передается за счет вынужденной конвекции (перенос тепла вместе с перемещающимся веществом — воздухом).

При *электропечном отоплении* ЭН равномерно распределяются по внутреннему объему вагона. Выделяемое ими тепло распределяется по вагону в основном за счет разной плотности воздуха, обусловленной разностью температур. Такая теплопередача характеризует свободную конвекцию.

При *комбинированном отоплении* ЭН устанавливаются в водогрейный котел, имеющийся в вагоне. Тепло от ЭН передается воде, а от нее во внутренние помещения.

Выбор системы отопления определяется временем пребывания пассажиров в вагоне. На пригородных электропоездах и в вагонах межобластного сообщения применяют электропечное и электрокалориферное отопление, а в вагонах дальнего следования — комбинированное, что определяется требованиями санитарных норм.

Источники питания. В вагонах с автономными системами электроснабжения (АСЭС) электроэнергия для питания ЭН поступает от вагонного генератора и аккумуляторной батареи [1].

В вагонах без кондиционирования (б/к) энергия источников питания АСЭС с номинальным напряжением 50 В не используется для отопления. Это объясняется малой мощностью (5÷10 кВт) генератора, позволяющей подключать к нему лишь ЭН малой мощности (0,35÷2,2 кВт), используемые в кипятильниках и обогревателях водяных патрубков [3, 6].

В вагонах с кондиционированием (с/к) энергия АСЭС с номинальным напряжением 110В используется для питания электрического отопления, состоящего из калорифера и печей. Вследствие ограниченной мощности вагонного генера-

тора (28÷32 кВт) это отопление имеет небольшую мощность (10÷12 кВт) и используется как основное лишь в переходный период (весна, осень) при температуре наружного воздуха не ниже +10°C. В зимний период такое отопление, способствуя более равномерному распределению тепла по внутренним помещениям вагона, является дополнительным.

Для питания ЭН основного отопления в зимний период используется энергия централизованного (единого для всего поезда) источника [4]. На электрифицированных участках железных дорог таким источником служит контактная сеть. На участках постоянного тока энергия контактного провода используется для питания ЭН всех вагонов без дополнительного преобразования. Уровень этого напряжения на дорогах России составляет 3000 В, а на дорогах Европы 3000 и 1500 В. На участках переменного тока напряжение контактного провода, составляющее 25000 В, понижается трансформатором электровоза до требуемого уровня и подается к ЭН. Уровень переменного напряжения, подаваемого при этом в поездную магистраль, составляет 3000 В, 50 Гц на дорогах России. На дорогах Западной Европы уровень переменного напряжения в вагонной магистрали составляет 1500 В, 50 Гц или 1000 В, 16 2/3 Гц (Германия).

При централизованном электроснабжении (ЦЭС) вагонов поезда от вагона-электростанции для питания ЭН используется трехфазное напряжение 220/380 В промышленной частоты (50 Гц). Такая система для пассажирских вагонов на дорогах России применяется ограниченно, но широко используется для рефрижераторных вагонов. Система трехфазного переменного тока повсеместно распространена на предприятиях вагоноремонтного производства.

Режим работы ЭН и количество тепла, выделяемое ими, зависят от качества электроэнергии, отбираемой от источника питания. Из показателей качества (см. ГОСТ 13109-67 [7]) при проектировании отопления в первую очередь необходимо учитывать допустимое отклонение величины питающего напряжения от номинального. Данные технической литературы [4, 7, 8] и опыт эксплуатации показывают, что эти отклоне-

ния различны для различных систем электроснабжения и могут меняться в отдельных случаях от минус 27 до плюс 33%. Для использования в практических расчетах можно рекомендовать данные, приводимые в табл. П1.1 прил. П1 для каждой из вышеперечисленных СЭС.

Проводные цепи и межвагонные соединители. Соединение ЭН с источником питания обеспечивается проводными цепями, свойства которых в первую очередь определяются: материалом, идущим на их изготовление; поперечным сечением S токопроводящих жил и состоянием изоляции.

При централизованном электроснабжении (ЦЭС) электроэнергия к ЭН вагона подается по магистрали, проходящей под вагоном. Вагонные магистрали соединяются между собой в единую (последовательную) цепь и подключаются к расположенному на локомотиве или вагоне-электростанции источнику питания с помощью специальных электрических соединителей, конструкции и параметры которых описаны подробно в технической литературе [4, 5].

При электроснабжении от вагона-электростанции используется трехпроводная магистраль. На электрифицированных железных дорогах электроэнергия к вагонам подается от электровоза по однопроводной магистрали. Обратным проводом служит рельс. Провод магистрали прокладывается в алюминиевой трубе.

Особое внимание при проектировании отопления уделяется выбору высоковольтных проводов магистрали. Например, изоляция провода для подвижного состава с резиновой изоляцией в поливинилхлоридной морозостойкой оболочке (ППСРВМ-4000 по ГОСТ 6598-73) рассчитана на работу при напряжении 4000В переменного тока с частотой до 400Гц и при 6000В постоянного тока. Сечение провода выбирают с учетом того, что по нему должна быть передана энергия для питания ЭН всех вагонов поезда при наибольшем значении питающего напряжения.

Коммутационная, переключающая и защитная аппаратура. Кроме магистрали и ее соединителей отопительные цепи вагона включают в себя контакторы, автоматические выключатели,

разъединители, предохранители и дифференциальные реле. К коммутационной аппаратуре отопительных цепей относятся: высоковольтные и низковольтные контакторы, разъединители и переключатели. Из высоковольтных контакторов наибольшее распространение получили контакторы типов: 2КМ.010.004 (2КМ.010.018) отечественного производства, а также EMS-32а и EMS-31а производства Германии. Эти контакторы рассчитаны на коммутацию высоковольтных цепей под нагрузкой (25А для 2КМ.010.004 и 2КМ.010.018, 16А для EMS-32а и 10А для EMS-31а). Для этого высоковольтные контакторы оснащаются специальными дугогасительными камерами. Дугогасительные камеры имеют и низковольтные контакторы, работающие в цепях с напряжением 50В и 110В. Разъединители же и переключатели включают и отключают ненагруженные цепи, поэтому они не имеют устройств дугогашения.

К защитным аппаратам относятся предохранители и дифференциальные реле. Автоматические выключатели различных конструкций [2, 1] могут быть отнесены и к коммутационным, и к защитным аппаратам. Они используются в цепях питания ЭН при низком напряжении. Контактторы и предохранители находят применение в цепях и с высоким, и с низким напряжением, отличаясь друг от друга конструктивным исполнением [3, 4, 5, 6]. Разъединители устанавливаются лишь в высоковольтных цепях для обеспечения электробезопасности обслуживающего персонала. Переключатели с автоматическим управлением нашли применение в вагонах типа WLX с ЦЭС, рассчитанных на работу при нескольких уровнях напряжения. С их помощью осуществляется перегруппировка ЭН высоковольтного отопления при переходе с одного уровня напряжения на другой, что необходимо для вагонов, эксплуатируемых на дорогах Западной Европы и России.

Электрические нагреватели. В вагонах находят применение как высоковольтные, так и низковольтные трубчатые электронагреватели (ТЭН). Конструкция одного из низковольтных ТЭН приведена на рис. 2.1. В тонкостенной металлической оболочке 1 находится спираль 2 из нихромовой проволо-

ки, запрессованная в кварцевый песок или плавленный оксид магния (периклас) 4.

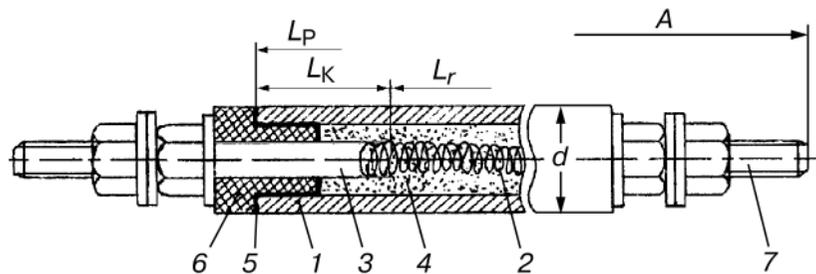


Рис. 2.1. Конструкция трубчатого электронагревателя (ТЭН) низковольтного

Напряжение к спирали подводится через контактные устройства 7 и стержни 3. Изоляционные втулки 6 закрепляются с применением влагозащитного термостойкого лака 5, снижающего влияние внешней среды на электроизоляционные свойства наполнителя.

Аналогично устроены и ТЭНы, из которых комплектуются электропечи и электрокалориферы, предназначенные для работы в цепях с высоким напряжением (до 3000 В). Конструкция такого нагревателя показана на рис. 2.2. От низковольтного ТЭН он отличается дополнительными изоляторами 8. Все остальные составные части этого нагревателя те же, что и у низковольтного ТЭН.

Трубчатые электронагреватели маркируются буквами и цифрами. После сокращенного названия ТЭН ставятся цифры, указывающие развернутую длину элемента L_p в см. Сле-

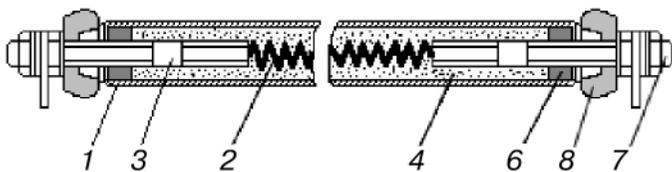


Рис. 2.2. Конструкция трубчатого электронагревателя (ТЭН), входящего в состав высоковольтных электропечей и калориферов

дующий далее буквенный индекс условно обозначает длину L_k контактных стержней в заделке (см. рис. 2.1 и табл. П1.2 прил. П1). Следующие цифры соответствуют наружному диаметру d (в мм), металлической оболочки ТЭН. Цифры после косой разделительной черты указывают номинальную мощность элемента в кВт. Следующая далее буква условно обозначает среду, для работы в которой предназначен ТЭН. Расшифровка этих обозначений, соответствующая ГОСТ 13268-74 для ТЭН, работающих в воздушной и водной среде, приведена в табл. П1.3 прил. П1. И, наконец, последняя цифра в обозначении указывает на величину номинального напряжения в В, на работу при котором рассчитан нагреватель. В конце могут быть помещены индексы, оговаривающие конструктивные особенности ТЭН.

Следуя данным пояснениям, маркировка, например, нагревателя типа ТЭН-120Б 13/1,6Р110 [9] может быть расшифрована следующим образом. Трубчатый электронагреватель, развернутая длина которого $L_p = 120$ см, длина контактного стержня в заделке $L_k = 6,5$ см, наружный диаметр оболочки $d = 13$ мм, мощность $P = 1,6$ кВт. Нагреватель рассчитан на работу в воде (буква Р) при допустимой удельной поверхностной мощности $w_{\text{доп}} = 11$ Вт/см² (см. табл. П1.3 прил. П1) и при номинальном питающем напряжении 110 В.

При комбинированном отоплении используются специальные высоковольтные нагревательные элементы, размещаемые непосредственно в водогрейном котле [5]. До последнего времени применялись элементы типа ННС2-0,5 (см. табл. П1.5, прил. П1) производства Германии. Конструкция этого элемента показана на рис. 2.3.

Металлический корпус 1 нагревательного элемента оканчивается фланцем 2, к которому через уплотнительную шайбу 3 двумя стяжными болтами 4 (М5) крепится фланец 5 изолятора 6. Нагревательная спираль 9 намотана на керамическую катушку 10. Один конец нагревательной спирали (на рисунке — левый) соединен со стальной проволокой, проходящей по внутреннему отверстию 24 изолятора. На выходе проволоке придана форма пружины 15, которая соединяется с

присоединительной скобой 12 (один из выводов нагревательной спирали). Второй конец (на рисунке — правый) той же спирали через изоляционную трубку 21 соединен с обратным проводом 11, который, пройдя по внутреннему отверстию 23 через керамическую катушку 10, изолятор 6 и ниппель 13, соединяется с контактной дугой 14 и вторым выводом 16 нагревательного элемента. Особенностью этого нагревательного элемента является (см. вырез Б) наличие воздушной прослойки между спиралью 9 нагревателя и кварцевым стаканом 8, отделенным от металлического корпуса 1 графитовым наполнителем 7. Кроме названных отверстий в изоляторе имеется и

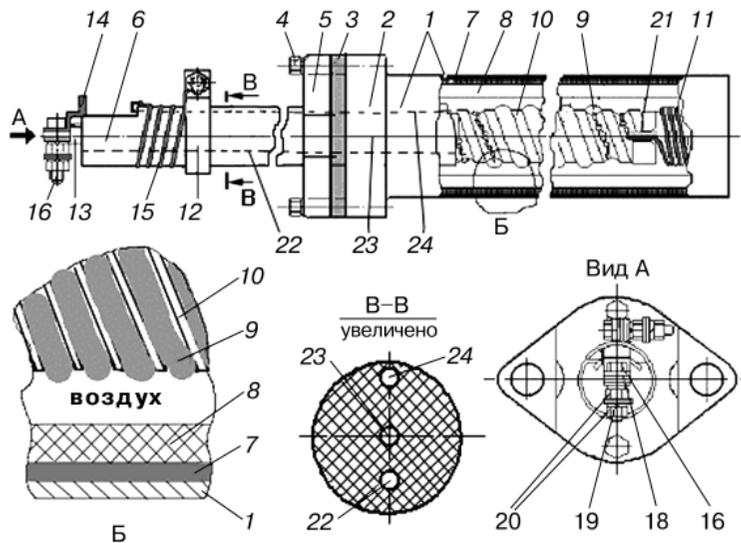


Рис. 2.3. Конструкция высоковольтного нагревателя ННС2-0,5:

1 — корпус нагревательного элемента; 2 — фланец корпуса; 3 — уплотнительная шайба; 4, 16 — болт М5; 5 — фланец изолятора; 6 — изолятор; 7 — графитовый наполнитель; 8 — кварцевый стакан; 9 — нагревательная спираль; 10 — керамическая катушка; 11 — обратный провод; 12 — присоединительная скоба; 13 — ниппель; 14 — контактная дуга; 15 — пружина; 16 — шайба для М5; 19 — пружинная шайба; 18 — шайба для М5; 19 — пружинная шайба; 20 — гайки М5; 21 — изоляционная трубка; 22–24 — сквозные отверстия

сквозное отверстие 22, соединяющее внутреннее воздушное пространство нагревательного элемента с атмосферой.

Отечественной промышленностью разработан новый высоковольтный нагревательный элемент типа ВПЭ-2-0,5/3 (В-высоковольтный, П-патронный, Э-электронагреватель) мощностью 2 кВт на номинальное напряжение 500 В и с сопротивлением изоляции на 3000 В. В отличие от нагревателя ННС2-0,5 он выполнен засыпным. Внутреннее пространство между оболочкой и нагревательной спиралью заполнено периклазом. Основные показатели этого элемента также приведены в табл. П1.5 прил. П1.

При расчете и выборе нагревательных элементов в первую очередь рекомендуется [2,10] следить за тем, чтобы удельная поверхностная мощность не превышала допустимых значений (см. табл. П1.3, прил. П1).

Она определяется допустимыми температурами нагрева материала спирали, трубки или наполнителя [11]. Удельная поверхностная мощность, Вт/см², может быть найдена [10] как

$$w_{ЭН} = \frac{1000P_{ЭН}}{F_{ЭН}}, \quad (2.1)$$

где $P_{ЭН}$ — мощность нагревателя, кВт;

$F_{ЭН}$ — активная площадь поверхности нагревателя, см².

Активная площадь поверхности нагревателя круглого сечения определяется с учетом его размеров как

$$F_{ЭН} = \pi dL_r = \pi d(L_p - 2L_k), \quad (2.2)$$

где L_r — активная длина оболочки, см.

Для высоковольтных электрических нагревателей, используемых в системах комбинированного отопления, рассчитывается удельная нагрузка, т.е. отношение мощности $P_{ЭН}$ к площади поверхности F_C спирали [4].

3. РАСЧЕТ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРЕВАТЕЛЕЙ ОТОПИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ВАГОНА

Требуемую расчетную мощность $P_{\text{о.р}}$ нагревательных элементов отопительной установки определяют с учетом теплового баланса, при котором температура в вагоне сохраняется на неизменном уровне. Для этого следует определить все составляющие тепловых потерь и тепловыделений, имеющих в вагоне.

К основным составляющим теплотерь в вагоне относят потери $P_{\text{пв}}$ через ограждающие конструкции вагона, потери $P_{\text{ф}}$, возникающие вследствие инфильтрации наружного воздуха через неплотности кузова и при открывании дверей, а также потери $P_{\text{в}}$, возникающие при подаче вентиляционной системой в вагон наружного воздуха. Кроме того часть мощности отопительной системы, учитываемая составляющей $P_{\text{гв}}$, расходуется на горячее водоснабжение. Названные потери компенсируются мощностью, выделяемой нагревательными элементами.

Из тепловыделений, имеющих в вагоне и учитываемых при оценке теплового баланса, следует учитывать тепло $P_{\text{п}}$, выделяемое пассажирами в единицу времени, и тепло $P_{\text{о}}$, выделяемое при работе вагонного электрооборудования. Останемся на оценке каждой из этих составляющих.

А. Мощность (Вт) тепловых потерь через ограждающие конструкции вагона, находится на основании уравнения

$$P_{\text{пв}} = kF(t_{\text{в}} - t_{\text{н}}), \quad (3.1)$$

где k — коэффициент теплопередачи вагона, Вт/(м²·К);

F — площадь поверхности кузова, м²;

$t_{\text{в}}$ — температура воздуха внутри вагона, К;

$t_{\text{н}}$ — температура наружного воздуха, К.

Исследованиями Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ) установлено [12], что коэффициент теплопередачи абсолют-

но герметизированного кузова пассажирского вагона зависит от скорости движения, увеличиваясь с 1,093 до 1,15 Вт/(м²·К) при возрастании скорости от 15 до 120 км/ч.

Для расчетов при курсовом и дипломном проектировании можно принять $k = 1,15$ Вт/(м²·К). Площадь поверхности кузова пассажирского вагона $F = 270 \div 274$ м².

Б. Мощность (Вт) тепловых потерь, возникающих вследствие инфильтрации наружного воздуха через неплотности кузова и при открывании дверей может быть найдена как

$$P_{\text{ф}} = k_{\text{ф1}} \cdot P_{\text{пв}} + k_{\text{ф2}} \cdot P_{\text{пв}} = P_{\text{пв}}(k_{\text{ф1}} + k_{\text{ф2}}), \quad (3.2)$$

где $k_{\text{ф1}}$ — коэффициент инфильтрации через неплотности кузова;

$k_{\text{ф2}}$ — коэффициент инфильтрации при открывании дверей.

Для реализуемых в настоящее время скоростей движения принимают $k_{\text{ф1}} = 0,35$, а $k_{\text{ф2}} = 0,1$.

В. Мощность (Вт) тепловых потерь, расходуемых на подогрев наружного воздуха, подаваемого вентиляционной системой в зимний период определяется как

$$P_{\text{в}} = \rho \cdot c_{\text{р}} \cdot V_{\text{н}}(t_{\text{п}} - t_{\text{н}}), \quad (3.3)$$

где ρ — плотность воздуха, кг/м³;

$c_{\text{р}}$ — удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении, Дж/(кг·К);

$V_{\text{н}}$ — объем наружного воздуха, подаваемого в вагон, м³;

$t_{\text{п}}$ — температура подаваемого в вагон (нагретого) воздуха, К.

Плотность и удельная теплоемкость воздуха меняются с изменением температуры [12]. Однако для практических расчетов можно принять значение $c_{\text{р}} = 1006$ Дж/(кг·К) постоянным, что соответствует температуре 273 К (0°С). Для определения плотности воздуха при расчетной температуре можно воспользоваться уравнением

$$\rho = \frac{\rho_0}{\left(1 + \frac{t}{273}\right)}, \quad (3.4)$$

где $\rho_0 = 1,29 \text{ кг/м}^3$ — плотность воздуха при 0°C и давлении 760 мм рт. ст. ($760 \times 133 = 101080 \text{ Па}$);
 t — температура воздуха, $^\circ\text{C}$.

Расчетную плотность воздуха, значение которой подставляется в уравнение (3.3), можно выбирать как среднюю между ее значениями, соответствующими температурам воздуха снаружи и внутри вагона.

Объем подаваемого наружного воздуха в $\text{м}^3/\text{с}$ может быть найден как произведение устанавливаемой ГОСТ 12406-79 нормы подачи на одного пассажира ($20 \text{ м}^3/\text{ч}$ в зимнее время) на количество пассажиров n в вагоне, т.е.

$$V_H = \frac{20n}{3600}. \quad (3.5)$$

Г. Мощность (Вт), расходуемая на горячее водоснабжение для удовлетворения личных нужд пассажиров (мытьё посуды, душ и пр.),

$$P_{ГВ} = n \cdot \theta \cdot c(t_K - t_0), \quad (3.6)$$

где θ — расход воды на пассажира, кг/с ;
 c — удельная теплоемкость воды, равная $4190 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}$;
 t_K — температура нагрева воды, K ;
 t_0 — начальная температура воды, K .

Д. Количество тепла (Вт), выделяемое пассажирами в единицу времени,

$$P_{П} = n \cdot q, \quad (3.7)$$

где q — количество ощутимого тепла, выделяемого в среднем одним пассажиром в единицу времени, Вт .

Количество тепла, выделяемое человеком, зависит от окружающей температуры и от интенсивности выполняемой им работы [13]. Для рассматриваемых условий при $t_B = 20^\circ\text{C}$ можно принять $q = 87 \text{ Вт}$. Среднюю заселенность вагона следует считать равной $70 \div 80\%$ от количества мест.

Е. Мощность (Вт) тепловой энергии, выделяющаяся при работе вагонного оборудования (электрические машины, коммутационные аппараты, лампы накаливания и др.), может быть принята равной $P_0 = 1,5 \div 2 \text{ кВт}$.

Мощность, выделяемая ЭН (мощность отопительной установки $P_{ОУ}$) вместе с составляющими по пунктам Д и Е должна скомпенсировать потери тепла, рассчитываемые по уравнениям (3.1)–(3.6). С учетом вышесказанного, уравнение для определения потребной (расчетной) полезной мощности электрических нагревателей отопительной установки вагона может быть записано в виде

$$P_{ОУ.Р} = P_{ПВ} + P_{Ф} + P_{В} + P_{ГВ} - (P_{П} + P_{О}). \quad (3.8)$$

В прил. П2 приведен пример 1 расчета мощности, требующейся для обогрева пассажирского купейного вагона, работающего в определенных условиях (см. исходные данные расчета). Программа ПЗ.1, позволяющая с помощью микрокалькулятора рассчитывать потребную мощность ЭН с использованием вышеприведенных уравнений, дана в прил. ПЗ.

4. РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТОВ СХЕМЫ ОТОПЛЕНИЯ

4.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА, ВЫБОР ТИПА И СХЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЯ НАГРЕВАТЕЛЕЙ

Установив с помощью вышеприведенной методики потребную мощность отопительной установки, можно переходить к выбору типа ЭН, определению их общего требуемого количества и к компоновке схемы соединения.

При выборе отдельных ЭН или скомпонованных на их основе готовых приборов отопления (калориферов и электри-

ческих печей), выпускаемых промышленностью необходимо учитывать:

- условия работы и допустимую при этом поверхностную мощность (см. табл. П1.3, прил. 1);
- напряжение источника питания (см. табл. П1.1 прил. П1);
- условия, имеющиеся для размещения элементов отопления и накладывающие ограничения на конструкцию и размеры ЭН.

Выбор подходящих элементов ведется по справочной [9], технической [4, 5] или учебной литературе, содержащей необходимые сведения. Для примера в табл. П1.4 и П1.5 (прил. П1) приведены данные для группы ТЭН, выпускаемых промышленностью, а также некоторых электрических печей, калориферов и высоковольтных ТЭН, используемых в пассажирских вагонах различных типов.

Учтя номинальную мощность $P_{ЭН.н}$ выбранного ЭН, можно найти требуемое их общее расчетное количество $N_{общ.р}$ как

$$N_{общ.р} = \frac{P_{ОУ.р}}{P_{ЭН.н}}. \quad (4.1)$$

Если номинальное напряжение $U_{ип.н}$ источника питания более чем в два раза превышает номинальное напряжение $U_{ЭН.н}$ выбранного нагревателя, то их включают последовательно. Расчетное количество $N_{с.р}$ последовательно включаемых элементов находится как

$$N_{с.р} = \frac{U_{ип.н}}{U_{ЭН.н}}, \quad (4.2)$$

Полученное расчетом дробное значение округляют до большего целого значения $N_c > N_{с.р}$ и переходят к расчету количества параллельных цепей, которое определится в этом случае как

$$N_{п.р} = \frac{N_{общ.р}}{N_c}. \quad (4.3)$$

Полученные дробные значения после решения уравнения (4.3), также как и после решения уравнения (4.2) целесообразно округлить до большего целого числа. При этом по сравнению с расчетными увеличится и число последовательно включенных элементов ($N_c > N_{с.р}$), и количество параллельных цепей ($N_{п.р} > N_{п.р}$). Общее количество нагревателей в установке окажется также больше расчетного ($N_{общ} > N_{общ.р}$), так как

$$N_{общ} = N_c \cdot N_{п.р}. \quad (4.4)$$

В результате этого общая мощность отопительной системы при номинальном напряжении источника питания может отличаться от требуемой. Поэтому необходимо оценить реальную мощность установки при номинальном напряжении. Для этого в первую очередь следует найти значение мощности каждого элемента.

Известно, что изменение напряжения на ЭН приводит к изменению потребляемой им мощности и степени нагрева его спирали. Мощность нагревательного элемента для любого режима можно найти по уравнению

$$P_{ЭН} = \frac{U_{ЭН}^2}{R_{ЭН}}, \quad (4.5)$$

где $U_{ЭН}$ — подводимое к нагревателю рабочее напряжение, В;
 $R_{ЭН}$ — сопротивление спирали нагревателя, Ом.

Следует помнить, что используемые для изготовления спирали ЭН материалы имеют малый температурный коэффициент сопротивления. Поэтому в ряде случаев изменением сопротивления спирали при нагреве можно пренебречь. Испытания, проведенные Всероссийским научно-исследовательским институтом железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ) [4], показали, что сопротивление спирали высоковольтного нагревательного элемента типа ННС2-0,5 при нагреве до 800°C менялось всего на 3÷6%.

Пренебрегая влиянием температуры, можно считать, что сопротивление спирали ЭН не меняется при изменении его

температурного режима работы. Поэтому изменения мощности нагревателя будут определяться только изменением напряжения. В этом случае из уравнения (4.5), записанного для номинальных значений напряжения и мощности, имеем

$$R_{ЭН} = \frac{U_{ЭН.Н}^2}{P_{ЭН.Н}}. \quad (4.6)$$

Совместное решение уравнения (4.5) и (4.6) приводит к результату

$$P_{ЭН} = \left(\frac{U_{ЭН}^2}{U_{ЭН.Н}^2} \right) P_{ЭН.Н}, \quad (4.7)$$

позволяющему оценить изменение мощности ЭН при изменении подводимого к нему напряжения. Воспользовавшись уравнением (4.7), найдем напряжение, приложенное к каждому ЭН при их последовательном соединении. При этом будем считать, что напряжение по элементам распределяется равномерно. Тогда напряжение на каждом элементе будет равно

$$U_{ЭН} = \frac{U_{ИП}}{N_c}. \quad (4.8)$$

Подставив уравнение (4.8) в (4.7), получим выражение для определения мощности, выделяемой каждым ЭН при рабочем напряжении $U_{ИП}$ источника питания

$$P_{ЭН} = \left[\frac{\left(\frac{U_{ИП}}{N_c} \right)^2}{U_{ЭН.Н}^2} \right] P_{ЭН.Н} = \frac{U_{ИП}^2}{N_c^2} \cdot \frac{P_{ЭН.Н}}{U_{ЭН.Н}^2}. \quad (4.9)$$

На основании этого уравнения полная мощность отопительной установки, состоящей из N_c последовательно и N_{II} парал-

лельно включенных элементов, при напряжении питания $U_{ИП}$ составит

$$P_{ОУ} = N_c \cdot N_{II} \cdot \frac{U_{ИП}^2 \cdot P_{ЭН.Н}}{N_c^2 \cdot U_{ЭН.Н}^2}.$$

Осуществив необходимые преобразования, получим новое выражение

$$P_{ОУ} = \frac{N_{II} \cdot U_{ИП}^2 \cdot P_{ЭН.Н}}{N_c \cdot U_{ЭН.Н}^2}. \quad (4.10)$$

Уравнения (4.9) и (4.10) позволяют оценить и увеличение мощности как отдельного элемента ($P_{ЭН.макс}$), так и всей установки ($P_{ОУ.макс}$) при повышении напряжения источника питания до наибольшего значения $U_{ИП.макс}$.

Определив наибольшую мощность ЭН, необходимо по уравнению (3.1) найти соответствующую ей наибольшую удельную мощность $w_{ЭН.макс}$ и сравнить ее с допустимым значением $w_{ЭН.доп}$. При выполнении неравенства

$$W_{ЭН.доп} > w_{ЭН.макс} \quad (4.11)$$

можно говорить о том, что ЭН будут работать в допустимом режиме.

Если неравенство (4.11) не будет удовлетворено, то длительная работа отопления при наибольшем напряжении питания приведет к сокращению срока службы нагревательных элементов. При нежелании мириться с таким фактом нужно или изменить схему включения, добавив в каждую последовательную цепь по одному ЭН, или перейти на новый тип ЭН с более высоким номинальным напряжением. Для того и другого случая потребуется повторение расчета по изложенной методике. Конкретный пример расчета приведен в прил. 2 (см. пример 2).

Понижение напряжения питания вызовет снижение мощности электроотопления и понижение температуры в вагоне. Особенно ощутимы такие понижения в системах с конвектив-

ным отоплением (электропечным и электрокалориферным). Для исключения этого явления необходимо увеличить общую мощность отопления. В вагонах с комбинированным отоплением понижение температуры будет меньше вследствие аккумулирования тепла в водяной системе. Поэтому увеличения числа параллельных цепей ЭН в расчете на кратковременную работу с пониженным напряжением питания в таких системах можно не производить.

При использовании предложенной методики для расчета и компоновки систем электроотопления, питающихся от трехфазной сети 220/380 В, необходимо обеспечить равномерную загрузку всех фаз. В этих случаях применяют трехфазные схемы включения ЭН, для которых напряжение во всех режимах определяется с учетом схемы включения (звезда, треугольник). Питание нагревательных элементов от трехфазных сетей применяется в пассажирских вагонах с ЦЭС от вагонэлектростанции, в рефрижераторных вагонах и на промышленных предприятиях.

Для примера на рис. 4.1, а, б приведены схемы включения ЭН в вагонах с комбинированным отоплением зарубежного и отечественного производства, использующих энергию высоковольтной (3000 В) поездной магистрали ПМ. В каждом из этих вагонов нагрев воды в котле обеспечивают 24 нагревательными элементами R типа ННС2-0,5 (данные их см. в табл. П1.5 прил. П1). Элементы R включаются в четыре параллельные ветви по 6 штук последовательно в каждой. В одних схемах (см. рис. 4.1, а) ЭН разделены на две одинаковые по мощности (24 кВт) группы $EK1$ и $EK2$. Каждая из этих групп включается отдельным высоковольтным контактором ($K14$, $K15$), получая питание от вагонной магистрали ПМ через разъединитель Q , общий предохранитель $F25$ и групповые предохранители $F27$ и $F28$.

В последнее время на вагонах отечественной постройки отдается предпочтение одновременному включению всех ЭН одним контактором [6] (см. рис. 4.1, б). Питание от магистрали подается через разъединитель $B59$, высоковольтный предохранитель $Pr73$ и контактор $K8$. Разница в буквенных обо-

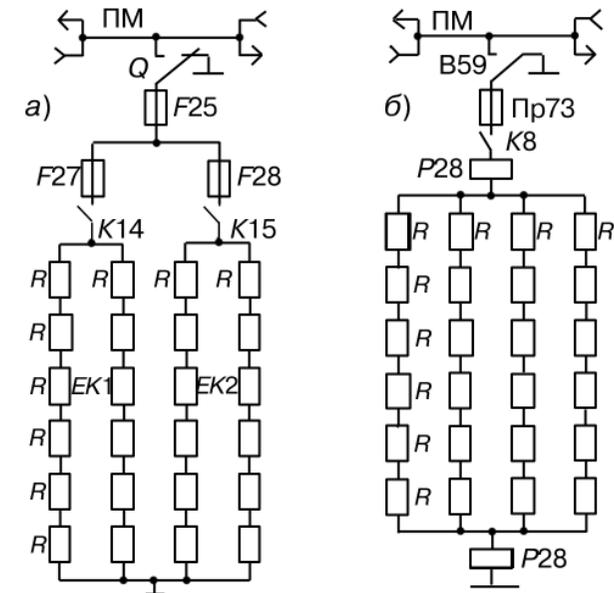


Рис. 4.1. Схемы соединения высоковольтных нагревательных элементов в пассажирских вагонах с комбинированным отоплением: а — зарубежного производства (типа 47Д/К); б — отечественного производства (тип ЭВ.10)

значениях элементов одного и того же назначения (предохранители, разъединители) обусловлена особенностями отечественных и зарубежных (немецких) стандартов.

Во входную и выходную цепи питания ЭН (см. рис. 4.1, б) включены катушки дифференциального реле $P28$. О назначении этого реле будет сказано в подразделе 4.2.

Более подробно ознакомиться с применяемыми схемами включения высоковольтных нагревательных элементов можно в технической литературе [4, 5, 6].

4.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДЛЯ ВЫБОРА КОММУТАЦИОННЫХ АППАРАТОВ И ЭЛЕМЕНТОВ МАГИСТРАЛИ

Основными показателями для выбора коммутационного аппарата (КА)-контактора являются наибольшее рабочее на-

пряжение $U_{ИП.макс}$ источника питания (см. табл. П1.1 прил. П1) и наибольший отключаемый ток.

Наибольший потребляемый электрической отопительной установкой ток можно найти, опираясь на наибольшее значение ее мощности $P_{ОУ.макс}$ при наибольшей величине питающего напряжения $U_{ИП.макс}$, воспользовавшись уравнением

$$I_{ОУ.макс} = \frac{P_{ОУ.макс}}{U_{ИП.макс}}$$

Подставив в это уравнение значение наибольшей мощности $P_{ОУ.макс}$, определяемое уравнением (4.10) для максимального питающего напряжения, после необходимых преобразований, получим

$$I_{ОУ.макс} = \frac{U_{ИП.макс} \cdot P_{ЭН.н} \cdot N_{п}}{U_{ЭН.н}^2 \cdot N_{с}} \quad (4.12)$$

Если для значения тока, найденного по уравнению (4.12), не удастся подобрать подходящий контактор по справочным данным технической [4, 5, 6] или учебной [14] литературы, то можно рекомендовать разбивку параллельных цепей на отдельные группы и подбор подходящего контактора из числа имеющихся для каждой из них. В этом случае для определения тока каждой группы можно воспользоваться уравнением (4.12), заменив в нем значение общего количества параллельных цепей нагревателей количеством таких цепей в рассматриваемой группе.

Отдельно следует остановиться на особенностях защиты цепей последовательно-параллельно включенных ЭН от токов короткого замыкания (КЗ), осуществляемой с помощью предохранителей.

Такие схемы характерны для высоковольтных цепей отопления. Для примера рассмотрим общий вид схемы соединения нагревательных элементов, приведенной на рис. 4.2. Схема состоит из $N_{п}$ параллельных ветвей, в каждой из которых последовательно включены $N_{с}$ нагревательных элементов.

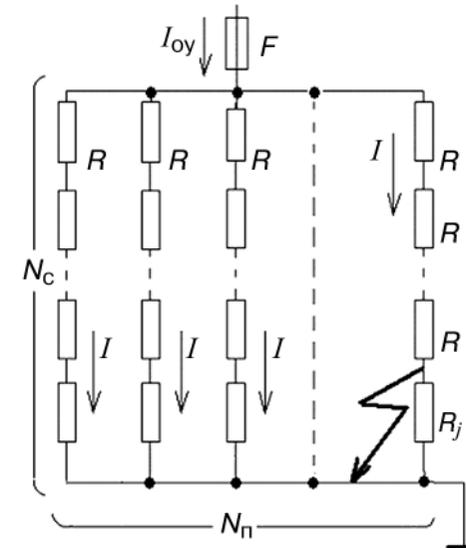


Рис. 4.2. Схема последовательно-параллельного соединения ТЭН в отопительной установке

Цепи ЭН защищены от токов КЗ общим предохранителем F . Подобный способ защиты оказывается неэффективным в случае замыкания на корпус (землю) одного из нагревателей (см. элемент R_j на рис. 4.2). Для доказательства этой неэффективности сравним ток, протекавший по предохранителю до замыкания элемента R_j , с его же током после замыкания.

На основании уравнения (4.12), которое остается справедливым для любого значения напряжения источника питания, находим, что ток предохранителя, равный току отопительной установки, до появления КЗ равнялся

$$I_{ОУ} = \frac{U_{ИП} \cdot P_{ЭН.н} \cdot N_{п}}{U_{ЭН.н}^2 \cdot N_{с}} = \frac{U_{ИП} \cdot N_{п}}{R_{ЭН} \cdot N_{с}},$$

где $R_{ЭН} = \frac{U_{ЭН.н}^2}{P_{ЭН.н}}$ — сопротивление отдельного ЭН, Ом.

При одинаковом сопротивлении всех ЭН, входящих в рассматриваемую схему, их общее сопротивление (при отсутствии КЗ) равно

$$R_{\text{Общ}} = \frac{R \cdot N_c}{N_{\text{п}}} \quad (4.14)$$

Нетрудно показать, что при замыкании одного из ЭН на землю (или при коротком замыкании одного из них), общее сопротивление уменьшится и будет равно

$$R_{\text{Общ}}^* = \frac{R \cdot N_c \cdot N_c^*}{N_c^* \cdot (N_{\text{п}} - 1) + N_c} \quad (4.15)$$

где N_c^* — количество оставшихся последовательно включенных элементов в цепи с КЗ.

Уравнение (4.15) при $N_c = N_c^*$, что указывает на отсутствие КЗ, превращается в уравнение (4.14).

Так как общее сопротивление цепей отопления уменьшится, то ток через предохранитель F увеличится до значения $I_{\text{ОУ}} = I_{\text{ОУ}}^*$. Кратность его увеличения по сравнению с прежним значением составит

$$k = \frac{I_{\text{ОУ}}^*}{I_{\text{ОУ}}} = \frac{(N_{\text{п}} - 1) + N_c}{N_c^* \cdot N_{\text{п}}} \quad (4.16)$$

Если рассмотреть цепь из 24 нагревательных элементов (при $N_c = 6$ и $N_{\text{п}} = 4$), характерную для схемы включения ТЭН высоковольтного комбинированного отопления (см. рис. 4.1, б), то при замыкании на землю одного из нагревательных элементов кратность увеличения тока по предохранителю Пр73 на основании (4.16) будет равна $k = 1,05$. Пятипроцентное увеличение тока по предохранителю не сможет вызвать его перегорания, однако оставшиеся в одной из цепей 5 элементов вместо 6 будут работать с перегрузкой.

Сравнив на основании уравнения (4.9) мощности, рассеиваемые этими элементами до и после КЗ одного из них, мож-

но определить, что каждый из оставшихся пяти элементов будет работать с перегрузкой в 1,44 раза.

Для защиты нагревательных элементов отопления от перегрузки в рассмотренном режиме в схемах отечественных вагонов и предусмотрена установка дифференциального реле Р28 (см. рис. 4.1, б) типа IP-007. Реле срабатывает, если разница токов на входе и выходе отопительной установки достигает 3÷5 А.

Ток, наиболее длительно потребляемый отопительной установкой, является основным исходным фактором для расчета сечения провода (или проводов) поездной магистрали и выбора межвагонных соединителей (штепселей и розеток). При этом учитывают, что магистраль и соединители каждого вагона должны быть рассчитаны на наибольший суммарный ток $I_{\text{м}}$, потребляемый всеми вагонами поезда [17],

$$I_{\text{м}} = I_{\text{о.макс.}} \cdot N_{\text{в}} \quad (4.17)$$

где $N_{\text{в}}$ — количество вагонов в поезде.

Для расчета сечения проводов магистрали и выбора соединителей рекомендуем обратиться к материалам учебной [3] и технической [2, 4, 5, 6] литературы. Напомним лишь, что сечение проводов и кабелей выбираются с учетом следующих факторов:

- допустимого нагрева расчетным током и током короткого замыкания;
- допустимых потерь напряжения;
- экономической целесообразности.

5. РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРЕВАТЕЛЕЙ

В отдельных случаях, когда не удастся подобрать ЭН из числа серийно выпускаемых промышленностью, прибегают к разработке новой конструкции применительно к конкретным условиям работы. В этом случае в первую очередь следует определить геометрические размеры теплоизлучающего элемента (спираль, стержень). Исходными данными для расчета служат:

- номинальная полезная мощность $P_{\text{ЭН}}$ нагревателя;
- его номинальное напряжение $U_{\text{ЭН.Н}}$;
- условия работы, характеризующиеся температурой на поверхности элемента, свойствами нагреваемой среды, условиями теплопередачи и пр.

Мощность, потребляемая ЭН из сети, в номинальном режиме работы

$$P_{\text{С}} = P_{\text{ЭН.Н}} \cdot \eta, \quad (5.1)$$

где η — КПД нагревательного прибора.

Значение КПД для нагревателей различного назначения приведены в табл. П1.6 прил. П1.

Сопротивление нагретой спирали ЭН в номинальном режиме может быть определено как

$$R_{\text{С}} = \frac{U_{\text{ЭН.Н}}^2}{P_{\text{С}}} \quad (5.2)$$

или как

$$R_{\text{С}} = \left(\rho_0 \frac{l}{S_{\text{С}}} \right) (1 + \alpha \Theta_{\text{Р}}), \quad (5.3)$$

где $P_{\text{С}}$ — мощность, потребляемая нагревателем из сети, Вт;

ρ_0 — удельное сопротивление материала спирали при условной температуре (20°C), Ом·м;

l — длина проволоки или ленты спирали, м;

α — температурный коэффициент сопротивления материала спирали, К⁻¹;

$\Theta_{\text{Р}}$ — превышение рабочей температуры спирали над условной, для которой берется значение ρ_0 ;

$S_{\text{С}}$ — площадь поперечного сечения спирали, м².

Для передачи тепла температура нагревателя должна быть выше температуры нагреваемой среды. Чем больше этот перепад, тем большая мощность передается единицей поверх-

ности нагревателя, тем интенсивнее идет нагрев. Однако одним из факторов, ограничивающих величину перепада, является предельно допустимая рабочая температура материала, из которого изготовлена спираль. Значения этих температур и удельные сопротивления для различных материалов приведены в табл. П1.7 прил. П1.

При расчете пользуются допустимой удельной поверхностной мощностью нагревателя [см. уравнение (2.1)], значение которой выбирается как

$$w_{\text{доп}} = w_{\text{уд.эф.}} \cdot k_{\text{эф.изл.}} \cdot k_{\text{ср}}, \quad (5.4)$$

где $w_{\text{уд.эф.}}$ — эффективная удельная мощность нагревателя в зависимости от температуры нагреваемой среды, Вт/м²;

$k_{\text{эф.изл.}}$ — коэффициент эффективности излучения;

$k_{\text{ср}}$ — коэффициент учета влияния среды.

Значения составляющих, входящих в уравнение (5.4), приведены в табл. П1.8, П1.9 и П1.10, прил. П1.

Совместная запись уравнений (3.1)–(3.2) и (5.2)–(5.3) применительно к материалу круглого сечения позволяет составить систему уравнений

$$d = \frac{P_{\text{С}}}{\pi \cdot w_{\text{доп}} \cdot l}; \quad \frac{U_{\text{ЭН.Н}}^2}{P_{\text{С}}} = \frac{\rho \cdot l \cdot (1 + \alpha \Theta_{\text{Р}})}{\pi \cdot d^2}$$

на основании которой определяется длина

$$l = \sqrt[3]{\frac{U_{\text{ЭН.Н}}^2 \cdot P_{\text{С}}}{4\rho_0 \pi w_{\text{доп}}^2 (1 + \Theta_{\text{Р}})}} \quad (5.5)$$

и диаметр

$$d = \sqrt[3]{\frac{4P_{\text{С}}^2 \cdot \rho_0 (1 + \alpha \Theta_{\text{Р}})}{\pi^2 \cdot w_{\text{доп}} \cdot U_{\text{ЭН.Н}}^2}} \quad (5.6)$$

проводами, необходимой для изготовления спирали нагревателя. С учетом полученных результатов выбирается проволока стандартного сечения, диаметр которой наиболее близок к расчетному сечению. После этого для выбранного диаметра нужно провести поверочный расчет и убедиться, что действительное значение удельной поверхностной мощности не превышает допустимое.

При установлении размеров спирального проволочного нагревателя нужно руководствоваться следующими рекомендациями [2]:

- 1) спираль навивается на оправку, диаметр которой превышает диаметр проволоки в 7–10 раз;
- 2) шаг витков спирали должен быть не менее двух диаметров проволоки;
- 3) реальное количество витков спирали увеличивается на 20 относительно расчетного для присоединения к выводным шпилькам.

6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСХОДА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ОТОПЛЕНИЕ

Расход электроэнергии, необходимой для отопления, целесообразно определять, опираясь на потребную полезную мощность P_{OY} нагревательных элементов отопительной установки. Применительно к вагону расчетами ВНИИЖТ установлено, что мощность, необходимая для его отопления, имея наибольшее значение при расчетной наружной температуре $t_{н.р.}$, линейно изменяется при ее повышении, равняясь нулю при $t_{н.р.} = 15^{\circ}\text{C}$. В этом случае расход $A_{Эод}$ электроэнергии на отопление движущегося вагона составит, кВт,

$$A_{Эод} = P_{OY} \cdot T_{д} \cdot k_{Т}, \quad (6.1)$$

где $T_{д}$ — время нахождения вагона в движении, ч;
 $k_{Т}$ — коэффициент, учитывающий изменение потребной полезной мощности на отопление при снижении наружной температуры.

При линейной зависимости $P_{OY} = f(t_{н})$

$$k_{Т} = \frac{(t_{В} - t_{н.ср.})}{(t_{В} - t_{н.р})}, \quad (6.2)$$

где $t_{н.р.}$ и $t_{В}$ — расчетная наружная температура и температура внутри вагона, с учетом которых определено значение P_{OY} ;

$t_{н.ср.}$ — средняя температура наружного воздуха за расчетный период.

Поскольку значение P_{OY} для отопления вагона закладывается в основу выбора нагревательных элементов, то находят эту мощность для самых низких температур наружного воздуха. Естественно, что при определении расхода энергии для $t_{н} = t_{н.р.}$ коэффициент $k_{Т} = 1$.

При содержании вагона в отстое мощность $P_{Эоо}$, потребная на его отопление, идет лишь на компенсацию тепловых потерь ($P_{пв}$) через ограждающие конструкции и потерь ($P_{ф}$) от инфильтрации воздуха через неплотности кузова. Расчет названных составляющих по уравнениям (3.1) и (3.2) ведется с учетом того, что $k = 1,09 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$, а $k_{ф} = 0,1$. Температура внутри вагона принимается равной $8 \div 10^{\circ}\text{C}$.

Расход электроэнергии (кВт·ч) на отопление вагона в отстое за время $T_{о}$ может быть найден как

$$A_{Эоо} = P_{OYO} \cdot T_{о} \cdot k_{Т}. \quad (6.3)$$

Коэффициент $k_{Т}$ здесь тот же, что и в уравнении (6.1). Значение мощности P_{OYO} так же, как и P_{OY} , должно быть определено для самой низкой температуры.

С учетом уравнений (6.1)–(6.3) расход электроэнергии на отопление поезда из $N_{В}$ вагонов определится как

$$\begin{aligned} A_{Эо} &= (A_{Эод} + A_{Эоо}) \left(\frac{1}{\eta} \right) \cdot N_{В} = \\ &= N_{В} \cdot k_{Т} \cdot \left(\frac{1}{\eta} \right) \cdot (P_{OY} T_{д} + P_{OYO} T_{о}), \end{aligned} \quad (6.4)$$

где η — КПД системы отопления (можно принять равным 0,95–0,98).

Стоимость же израсходованной на отопление электроэнергии составит

$$C = c \cdot A_{\text{ЭО}}, \quad (6.5)$$

где c — средняя стоимость 1 кВт·ч электроэнергии.

7. РАЗРАБОТКА СТРУКТУРНЫХ И ПРИНЦИПАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СХЕМ ОТОПЛЕНИЯ

Из общего перечня различных типов схем, приведенных в ГОСТ 2.701-76, при курсовом и дипломном проектировании, как правило, разрабатываются структурные и принципиальные схемы.

Структурные схемы определяют основные функциональные части изделия, помогая установить их назначение и взаимосвязь. Разрабатываются эти схемы на начальной стадии проектирования и служат для общего ознакомления с изделием.

Принципиальные (полные) схемы определяют полный состав элементов, входящих в изделие, и отражают все их взаимосвязи. С помощью этих схем можно получить полное представление о принципе работы изделия. Они используются при изучении изделия, его наладке, контроле технического состояния и ремонте.

При разработке принципиальных схем руководствуются следующими правилами:

а) на схемах изображаются все входящие в них элементы аппаратов и машин;

б) схемы изображаются без соблюдения масштаба;

в) действительное пространственное расположение составных частей либо не учитывается вообще, либо учитывается приближенно;

г) элементы различных аппаратов размещаются на схеме исключительно из соображений удобства начертания и наглядности чтения;

д) схемы выполняются для изделий, находящихся в отключенном состоянии;

е) элементы схем изображаются в виде условных графических обозначений, установленных стандартами (ГОСТ 2.755-74, ГОСТ 2.756-78, ГОСТ 2.727-68, ГОСТ 2.732-68, ГОСТ 2.730-73, ГОСТ 2.721-74);

ж) каждый аппарат в схеме должен иметь буквенно-цифровое обозначение по ГОСТ 2.710-81;

з) все элементы одного аппарата обозначаются одинаково, если в схеме есть несколько однотипных аппаратов с одинаковым функциональным назначением, то в их обозначение вводится дополнительный цифровой индекс (см. ГОСТ 2.702-75);

и) дополнительно на схеме могут быть приведены поясняющие надписи, диаграммы переключения контактов многопозиционных устройств, а также координатная линейка (адреса), облегчающая анализ схемы при чтении технического описания.

Составление и анализ электрических схем невозможны без знаний условных графических изображений и буквенно-цифровых обозначений их элементов. На рис. 7.1 и 7.2 использованы элементы, наиболее часто употребляемые при разработке схем электрического отопления. В случае необходимости дополнительные данные могут быть найдены в стандартах Единой системы конструкторской документации (ЕСКД).

При курсовом и дипломном проектировании, как правило, выполняют две принципиальные схемы: схему силовых цепей и схему цепей управления. Силовая схема (рис. 7.1) отражает порядок соединения нагревательных элементов с источником питания, включая в себя используемые для этих целей коммутационную и защитную аппаратуру. В перечень коммутационных аппаратов входят: высоковольтные (до 3000 В) разъединители, переключатели и контакторы, низковольтные (220/380 В) контакторы, магнитные пускатели, реле. К защитной аппаратуре относятся: высоковольтные и низковольтные предохранители, дифференциальные реле, автоматические выключатели.

Работа силовой схемы обеспечивается и контролируется схемой управления. Такие схемы в вагонах, как правило, полу-

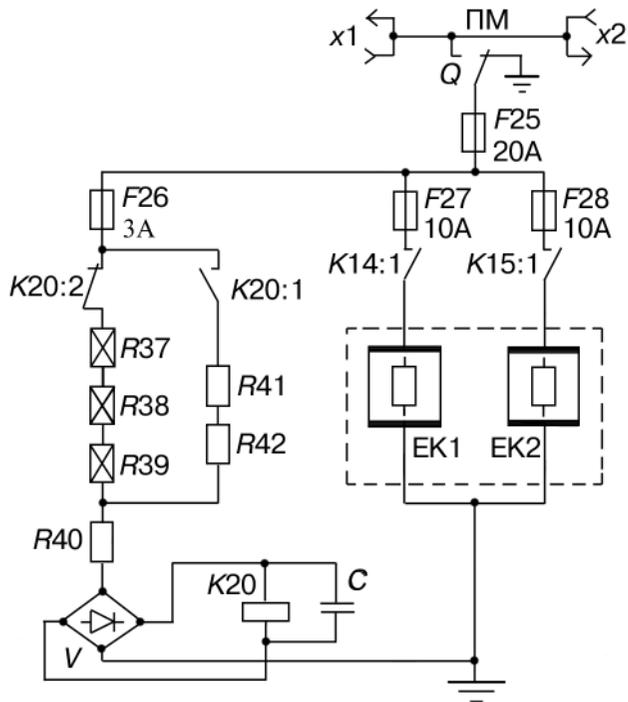


Рис. 7.1. Силовая схема комбинированного отопления

чают питание от низковольтной сети. В установках вагоноремонтных предприятий для питания цепей управления используют чаще всего промышленную сеть с напряжением 220 В. Цепи управления содержат: управляющие катушки коммутационных аппаратов; переключатели режима работы отопительной установки и датчики, контролирующие температурный режим ее работы и обеспечивающие необходимую степень защиты. Кроме того цепи управления имеют и элементы собственной защиты от токов перегрузки и коротких замыканий.

Для примера рассмотрим взаимодействие, порядок работы и назначение элементов схемы управления, упрощенный вариант которой представлен на рис. 7.2. Эта схема управляет работой системы комбинированного высоковольтного отопления пассажирского вагона (см. рис. 7.1).

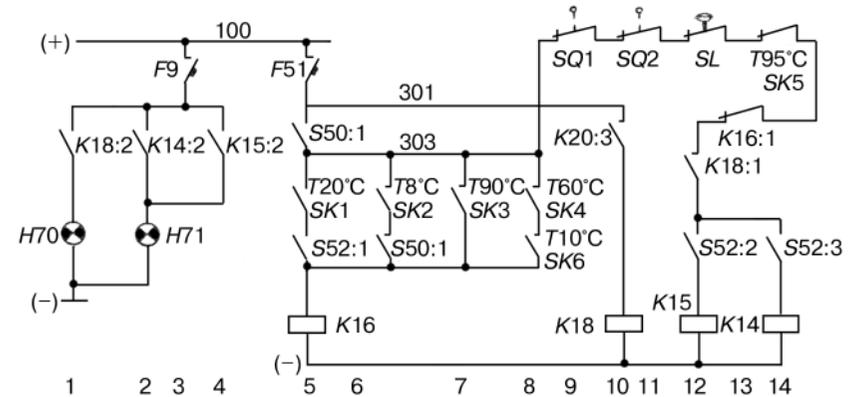


Рис. 7.2. Упрощенная схема управления работой комбинированного отопления пассажирского вагона

Работа отопительной установки в ручном или автоматическом режимах задается переключателями $S50$ и $S52$, расположенными на щите управления вагона. Выбор режима осуществляется вручную. О производимых ими переключениях можно судить по схеме рис. 7.2.

Быстро отыскать в схеме рассматриваемый элемент позволяют помещенные внизу рисунка адреса (цифры от 1 до 14). Адрес в описании указывается в скобках после буквенно-цифрового обозначения элемента и означает, что последний нужно искать в схеме по вертикали над номером адреса.

Схема управления (см. рис. 7.2) начнет работать после подачи питания к ее цепям. Для этого должны быть включены автоматы $F9(3)$ и $F51(5)$. После этого управляющие катушки $K15(12)$ и $K14(14)$ высоковольтных контакторов смогут получить питание и включить своими силовыми контактами $K14:1$ и $K15:1$ (см. рис. 7.1) нагревательные элементы $EK1$ и $EK2$ лишь при соблюдении следующих условий:

- закрыт высоковольтный подвагонный ящик с коммутационной, защитной и сигнальной аппаратурой цепей отопления (замкнут контакт $SQ1(9)$ путевого (концевого) выключателя);
- закрыт защитный кожух нагревательных элементов котла отопления (замкнут контакт $SQ2(11)$ концевого выключателя);

- в системе отопления находится достаточное для ее работы количество воды (замкнут контакт *SL*(12) датчика, контролирующего уровень воды в котле);

- вода в котле имеет температуру ниже 95°C (замкнут контакт *SK*5(14) реле температуры);

- к высоковольтной магистрали вагона подано напряжение;

- температура в вагоне ниже 20°C (разомкнут контакт *SK*1(5) ртутного контактного термометра).

Необходимость выполнения первых четырех условий становится понятна после анализа схемы управления, из которой видно, что через контакты названных защитных датчиков подается питание к катушкам *K*15 и *K*14.

Наличие напряжения в магистрали контролируется с помощью сигнального реле *K*20 (см. рис. 7.1). При закрытом подвагонном ящике разъединитель *Q* соединяет цепи отопления с магистралью. Если в магистрали есть напряжение, то через размыкающий контакт *K*20:2, высоковольтные разрядники *R*37, *R*38 и *R*39, резистор *R*40 и выпрямительный мост *V* получает питание сигнальное реле *K*20. Замкнувшийся контакт *K*20:1 этого реле обеспечивает питание катушки *K*20 через резисторы *R*41 и *R*42. Разрядники, каждый из которых имеет пробивное напряжение 600 В, позволяют при закрытом высоковольтном ящике и отсутствии напряжения в магистрали проверить сопротивление ее изоляции [3].

В схеме управления (см. рис. 7.2) при замыкании контакта *K*20:3 (10) подается питание к катушке *K*18(10) промежуточного реле. Оно своим замкнувшимся контактом *K*18:1(12) подготавливает к включению цепи питания катушек *K*15(12) и *K*14(14). Одновременно другой контакт *K*18:2(1) подает питание к сигнальной лампе *H*70(1), сигнализирующей о наличии напряжения в магистрали.

С этого момента режим работы отопления будет определяться положением контактов переключателей *S*50 и *S*52. При ручном режиме управления замкнуты контакты *S*50:1(5), *S*52:2(12) и *S*52:3(14). Катушки *K*15 и *K*14 получают питание, включая ЭН отопления. В этом случае контроль за температурой воздуха в вагоне отсутствует, так как разомкнут кон-

такт *S*52:1(5) и нет питания в цепи ртутного контактного термометра (РКТ) *SK*1(5), контролирующего эту температуру.

Отопление в этом режиме может быть выключено либо вручную размыканием контактов *S*52:2(12) и *S*52:3(14), либо под влиянием защитных датчиков *SK*3(7), *SK*4(8), *SK*5(14), контролирующих температуру воды в котле и датчика *SK*6, контролирующего наружную температуру.

Если температура наружного воздуха выше минус 10°C, то замкнут контакт РКТ *SK*6(8). Как только температура воды в котле достигает 50–60°C, замыкается контакт термоконтактора *SK*4(8). Получает питание катушка промежуточного реле *K*16(5), размыкается его контакт *K*16:1(13) и отключается отопление, так как теряют питание катушки *K*15 и *K*14.

При температуре наружного воздуха ниже минус 10°C цепь термоконтакта *SK*4 разомкнута, и отопление отключается, как только температура воды в котле достигнет 90°C. В этом случае замкнутся контакты термоконтактора *SK*3(7), вызывая цепь операций (переключений), описанных выше.

В автоматическом режиме дополнительно оказывается замкнут контакт *S*52:1(5) переключателя режима. В работу вводится цепь РКТ *SK*1(5). Теперь отопление будет отключаться как только температура воздуха в вагоне достигнет 20–50°C и замкнется контакт *SK*1(5). Размыкание этого контакта, из-за снижения температуры в вагоне, приведет к включению отопления. При работе в автоматическом режиме контакторы *K*15 и *K*14 срабатывают (отключаются и включаются) одновременно, подавая (или снимая) питание ко всем ЭН сразу. В ручном же режиме может работать любая группа отопительных приборов или обе группы вместе. Это зависит от положения ручного переключателя *S*52.

Схема управления может обеспечивать и автоматическое поддержание температуры в вагоне на уровне 8±10°C (режим отстоя). В этом случае замкнут контакт *S*50:2(6) переключателя режима, а основным контролирующим датчиком становится РКТ *SK*2(6).

Сигнальная лампа *H*70(3) оповещает о включении отопления, так как в цепь ее питания введены вспомогательные контакты *K*14:2(2) и *K*15:2(4) контакторов отопления.

Действие цепей термоконтакторов SK3(7) и SK4(8) сохраняется и при автоматическом режиме работы схемы. Кроме того, в любом режиме работы сохраняется защитное действие элементов SL(12) и SK5(14).

Напомним, что в реальных схемах управления электрическим отоплением пассажирского вагона [4, 6] работа ЭН и системы вентиляции взаимно связаны. Кроме того, в схемах отечественных вагонов с системой электроснабжения ЭВ.10 устанавливают специальный электронный блок управления отоплением (БУО), который, контролируя одновременно температуру воды в котле, воздуха снаружи и внутри вагона, осуществляет автоматически выбор и поддержание оптимальной температуры воды в котле.

Задача любой системы автоматического управления отопительной установкой — обеспечить поддержание заданного температурного режима в контролируемом пространстве. Для пассажирского вагона этот уровень составляет $20 \pm 2^\circ\text{C}$ [16].

ЛИТЕРАТУРА

Основная

1. Новиков В.Е. Системы электроснабжения вагонов: Конспект лекций. — М.: РГОТУПС, 2002. — 86 с.

Дополнительная

2. Электротехнический справочник. Т. III. Кн. 2. — Использование электрической энергии. — М.: ГЭИ, 1982.

3. Электрооборудование вагонов / А.Е. Зорохович, А.А. Реморов и др. Учеб. для вузов ж.-д. тр.-та. — М.: Транспорт, 1982. — 367 с.

4. Гомола Г.Г. Повышение энергетических и эксплуатационных качеств высоковольтного оборудования пассажирских вагонов. — М.: Транспорт, 1976 (Труды Всесоюзного науч.- исслед. института ж.-д. тр.-та. Вып. 566).

5. Калымулин Ю.М., Просин И.А., Болотин З.М. Электрическое отопление пассажирских вагонов. — М.: Транспорт, 1977.

6. Электрооборудование пассажирских вагонов модели 61-425 (ЦМВО-66) / О.Ф. Никитин, В.Е. Новиков, А.В. Тальмин и др. — М.: Транспорт, 1977. — 144 с.

7. ГОСТ 13109-67. Нормы качества электрической энергии у ее приемников, присоединенных к электрическим сетям общего назначения.

8. ГОСТ 6962-75. Транспорт электрифицированный с питанием от контактной сети. Ряд напряжений.

9. Каталог 12.15.04-77. Трубчатые электронагреватели ТЭН. Информэлектро.

10. Альтгаузен А.П. и др. Низкотемпературный электронагрев. — М.: Энергия, 1968.

11. Миндин Г.Р. Электронагревательные трубчатые элементы. — М.-Л.: ГЭИ, 1960.

12. Китаев Б.Н., Рубинчик И.М., Гудыма Е.В. Пути улучшения теплотехнических показателей пассажирских вагонов с кондиционированием воздуха при высоких скоростях движения. — М.: Транспорт, 1974. (Труды Всесоюз. науч.-исслед. института ж.-д. тр.-та. Вып. 528).

13. Теплотехнический справочник. Т. 2. — М.: Энергия, 1976.

14. Новиков В.Е. Энергетическое оборудование вагонов. Рабочая программа и задание на курсовую работу с методическими указаниями для студентов V курса специальности «Вагоны». — М.: РГОТУПС, 2002. — 48 с.

15. Кошкин Н.И., Ширкевич М.Г. Справочник по элементарной физике. — М.: Наука, 1975.

16. ГОСТ 12406-79. Вагоны пассажирские магистральных железных дорог колеи 1520 мм. Технические условия.

17. Бельдей В.В., Болотин З.М., Гомола Г.Г. Электрическое отопление пассажирских вагонов / Электрическая и тепловозная тяга. № 11, 1980.

Приложение П1 — Основные справочные материалы, необходимые для расчетов при курсовом и дипломном проектировании

Таблица П1.1

Изменения напряжения источника питания при различных системах электроснабжения ЭН

Тип СЭС	Род тока	Источник питания	Напряжение цепей питания ЭН, В		
			наименьшее $U_{\text{ип.мин}}$, В	номинальное $U_{\text{ип.н}}$, В	наибольшее $U_{\text{ип.макс}}$
ЦЭС вагона	Постоянный	От локомотива по однопроводной магистрали	2200	3000	4000
			1000	1500	1800
	Однофазный переменный 50, 16 2/3 Гц	От вагона-электростанции по трехпроводной магистрали	2200	3000	3600
			1140	1500	1650
	Трехфазный переменный 50 Гц		340	380	420
			800	1000	1200
АСЭС вагона	Постоянный	Генератор вагона, аккумуляторная батарея	84	110	144
			40	55	70
Промышленная сеть	Трехфазный переменный ток	Трехпроводная магистраль	340	380	420

Таблица П1.2

Буквенные индексы условного обозначения длины L_k (см. рис. 2.1) контактных стержней ТЭН в заделке

Индекс	А	Б	В	Г	Д	З
L_k , мм	40	65	100	125	160			630

Таблица П1.3

Допустимые удельные поверхностные мощности $w_{\text{доп}}$ для различных условий работы ТЭН и условные обозначения нагреваемой среды

$w_{\text{доп}}$, Вт/см ² , не более	Нагреваемая среда		Условия работы			Материалы оболочки ТЭН
	наименование	индекс	состояние среды	T , °С на оболочке ТЭН	V , м/с, воздуха	
9	Вода	Х	Нагревание, кипение	105		Медь, латунь
11		П				Нерж. сталь
		Р				Ст. 10 и 20
		Ю				Алюм. сплав
5	Воздух	С	Нагревание	450	6	Ст. 10 и 20
2,2		Т		450+700		Нерж. сталь
5		О		450		Ст. 10 и 20
5,5		К		450+600		Нерж. сталь
6,5		Э		450		Ст. 10 и 20
2,5		Н		450+460		>6
5,1				>6		

Таблица П1.4

Технические данные отдельных ТЭН, выпускаемых промышленностью

Тип	I_H , А	R_H , Ом	w_H , Вт/см ²
ТЭН-32А13/0,5Р110	4,55	24,18	5,1
ТЭН-32А13/0,63Р127	4,96	25,6	6,43
ТЭН-32А13/1Р220	4,55	48,35	10,21
ТЭН-60А13/0,5Э220	2,27	96,92	2,36
ТЭН-60Б13/1О220	4,55	48,4	5,21
ТЭН-60Б13/1К220	4,55	48,4	5,21
ТЭН-60А13/0,8Т220	3,64	60,44	2,8

Таблица П1.5
Технические данные отдельных ЭН, применяемых в пассажирских вагонах (ЭП-электропечь, ЭК-электрокалорифер, КО-комбинированное отопление)

Тип эл.оборуд.	Электронагреватель (ЭН)				ТЭН, входящий в состав ЭН						
	Вид	Тип	U _{н,В}	P _{н,Вт}	Количество на вагон	Тип	U _{н,В}	P _{н,Вт}	Длина трубки, мм	Диаметр, мм	Количество в одном ЭН
47Д/е	ЭП	BS2-1,5/3-750	1500	750	2	22Е750с	500	250	750	22	3
	ЭП	AS2-1/3-500	1000	500	7	22Е750с	500	250	750	22	2
	ЭП	BS2-1/3-1500	1000	1500	9	22Е1400с	333	500	1400	22	3
	ЭП	AS2-1/3-1000λ	1000	1000	6	22Е1400с	500	500	1400	22	2
	ЭП	AS2-2/3-1000	2000	1000	1	22Е1400	1000	500	1400	22	2
	ЭК	EELP-4	3000	18000	1	—	500	750	—	22	24
904А	ЭК	NK85	3000	22000	1	G201A	150	367	—	11	60
Красная стрела	ЭП	OK86	750	500	52	G215A	250	167	—	11	3
	ЭП	П1104-Д	900	1100	16	—	—	—	—	—	—
ОЭВРЗ	ЭП	П1104-А	600	740	2	—	—	—	—	—	—
	ЭП	П1104-Г,В	600	740	4	—	—	—	—	—	—
	ЭП	П1104-У	450	550	2	—	—	—	—	—	—
Все типы С 1972 г. Вагоны России с 1993 г.	ЭК	—	3000	14760	1	—	—	—	—	—	—
	КО	ННС2-0,5	500	2000	24	ННС2-0,5	500	2000	820	48	1
Вагоны России с 1993 г.	КО	ВПЭ-2-0,5/3	500	2000	24	—	—	—	—	—	—

Таблица П1.6

Коэффициенты полезного действия ЭН

Вид и назначение ЭН	КПД
Электрические печи сопротивления для:	
а) отопления	0,95–0,98
б) термообработки	0,6–0,85
в) сушки материалов	0,2–0,3
Электрические аккумулирующие водонагреватели	0,85–0,95
Электронагрев пресс-форм	0,5 – 0,7
Электроплитки:	
а) открытого типа	0,56
б) закрытого типа	0,6–0,8

Таблица П1.7

Основные показатели сплавов, применяемых для изготовления спиралей ЭН

Материал, марка	Температурный коэффициент сопротивления $\alpha \cdot 10^4, K^{-1}$	Удельное сопротивление $\rho_0 \cdot 10^{-6}, \text{ Ом} \cdot \text{ м, при } 293 \text{ К}$	Предельно допустимая температура, К
Нихром			
X15Н60	1–2	1,0–1,2	1300
X20Н80	1–2	1,0–1,1	1400
Фехраль			
X13Ю4	1,0–1,2	1,0–1,35	1100
X25Ю5	0,65	1,3–1,5	1500

Таблица П1.8

Влияние температуры среды на эффективную удельную поверхностную мощность ЭН, Вт/см²

Температура среды, °К	Температура нагревателя					
	1000	1100	1200	1300	1400	1500
500	5,5	8,5	12	16	21,5	32,3
600	5,2	8,2	11,6	15,3	20,1	31,6
800	5,0	6,8	10,2	14,4	19,3	31,3
1000		3,1	7,1	11,9	14,3	27,2
1200						16,4
1400						11,9

Таблица П1.9

Значения коэффициента эффективности излучения $k_{\text{эф.изл}}$

Тип и размещение нагревателя	$k_{\text{эф.изл}}$
Проволочные спирали, полужакрытые в пазах футеровки	0,16–0,24
Проволочные спирали на полочках в трубах	0,3–0,36
Проволочные зигзагообразные или стержневые	0,6–0,72
Ленточные зигзагообразные	0,38–0,44
Ленточные профилированные	0,56–0,7

Таблица П1.10

Значения коэффициента учета влияния среды $k_{\text{ср}}$

Среда	Материал	
	нихром	сталь
Неподвижный воздух	1	1
Подвижный воздух ($V > 5$ м/с)	2	2,5
Масло	1	1,25
Металл	2	2
Вода	3	6

Приложение П2 — Примеры расчета и выбора электрических нагревателей для пассажирских вагонов

Пример 1. Найти полезную мощность электрических нагревателей, обеспечивающих температуру плюс 20°C (по ГОСТ 12406-79) во внутренних помещениях нового купейного вагона, движущегося со скоростью 160 км/ч при температуре наружного воздуха минус 40°C.

Решение.

Воспользовавшись уравнением (3.1) найдем мощность тепловых потерь через ограждающие конструкции вагона, приняв коэффициент теплопередачи $k = 1,15$ Вт/м²·К, а площадь поверхности кузова $F = 270$ м². В результате получим

$$P_{\text{п.в.}} = 1,15 \cdot 270 [20 - (-40)] = 18630 \text{ (Вт)} = 18,63 \text{ (кВт)}.$$

В соответствии с уравнением (3.2) потери от инфильтрации наружного воздуха составят

$$P = 0,45 \cdot 18,63 = 8,38 \text{ (кВт)}.$$

Для определения по уравнению (3.3) мощности, необходимой для подогрева наружного воздуха, подаваемого в вагон вентиляционной системой, найдем прежде всего расчетную плотность воздуха ρ_p , которая определится как среднее значение между плотностью воздуха ρ_{-40} при наружной температуре и плотностью воздуха ρ_{+20} при заданной температуре внутри вагона. Для определения этих составляющих воспользуемся уравнением (3.4), решением которого получаем, что $\rho_{+20} = 1,2$ кг/м³, а $\rho_{-40} = 1,51$ кг/м³. Тогда $\rho_p = (\rho_{+20} + \rho_{-40})/2 = (1,2 + 1,51)/2 = 1,355$ (кг/м³). Приняв количество пассажиров в вагоне $n = (36 + 2) = 38$ (с учетом двух проводников), найдем, на основании уравнения (3.5), объем подаваемого в вагон воздуха, который составит $V = 0,21$ м³/с. С учетом этих данных на основании (3.3) находим мощность, необходимую для подогрева наружного воздуха, подаваемого в вагон вентиляционной системой.

$$P_B = 1,355 \cdot 1006 \cdot 0,21 [20 - (-40)] = 17,18 \text{ (кВт)}.$$

Мощность, расходуемую на горячее водоснабжение, определим, базируясь на следующих исходных данных:

- расход воды на одного пассажира $Q = 4$ кг/ч или $Q \approx 0,001$ кг/с;
- температуру нагрева воды $t_k = 50^\circ\text{C}$;
- начальную температуру воды $t_0 = 20^\circ\text{C}$.

Тогда на основании уравнения (3.6) найдем

$$P_{\text{г.в.}} = 38 \cdot 0,001 \cdot 4190 (50 - 20) = 4776 \text{ (Вт)} \approx 4,8 \text{ (кВт)}.$$

Тепло, выделяемое пассажирами при заселенности вагона 80%, может быть найдено на основании уравнения (3.7) как

$$P_{\text{п}} = (2 + 36 \cdot 0,8) \cdot 87 = 2679 \text{ (Вт)} \approx 2,7 \text{ (кВт)}.$$

В расчетах учтено, что проводники всегда находятся в вагоне. Мощность тепловой энергии, выделяемой вагонным электрооборудованием, примем равной $P_o = 2$ кВт. С учетом всех

составляющих требуемая полезная мощность отопительной установки составит

$$P_{\text{о.у.р.}} = 18630 + 8380 + 171800 + 4776 - (2679 + 2000) = + 44287 \text{ (Вт)} \approx 44,3 \text{ (кВт)}.$$

При необходимости многократного повторения проделанных вычислений для различных исходных данных можно воспользоваться программируемым микрокалькулятором. Необходимая для этого программа приведена в прил. ПЗ (см. программу ПЗ.1).

Пример 2. Выбрать электронагревательные элементы для калорифера вагона и составить схему их включения.

Условия работы: номинальное напряжение питания –3000 В;
температура наружного воздуха — минус 40°С;
температура воздуха, подаваемого в вагон плюс 20°С.

Решение.

Мощность, необходимая для подогрева воздуха, подаваемого в вагон при заданных температурных условиях, совпадающих с условиями первого примера, должна составлять $P_{\text{в}} = 17,18 \text{ кВт}$ (см. пример 1).

Площадь поперечного сечения воздуховода пассажирского купейного вагона $S = 0,96 \cdot 0,25 = 0,24 \text{ (м}^2\text{)}$.

Для рассматриваемых температурных условий объем подаваемого в вагон воздуха должен составлять $V = 0,21 \text{ м}^3/\text{с}$ (см. пример 1). Это лишь 25% воздуха, подаваемого вентиляционной системой. С учетом этого скорость подаваемого воздуха составит

$$v = \frac{V}{0,25 \cdot S} = \frac{0,21}{0,25 \cdot 0,24} = 0,35 \left(\frac{\text{м}}{\text{с}} \right).$$

Для рассматриваемых условий (см. табл. П1.3 прил. П1) подойдут ЭН с индексами С, Т, Э, Н. Предположим, что по конструктивным требованиям подходит элемент, развернутая длина которого составляет 60–80 см.

Проверим возможность применения для рассматриваемых целей элемента ТЭН-78А13/0,8Т220. имеющего подходящие геометрические размеры.

В этом случае на основании уравнений (4.1), (4.2), (4.3) имеем:

$$N_{\text{общ.р.}} = 17180/800 = 21,47 \approx 22;$$

$$N_{\text{с.р.}} = 3000/200 = 13,64 \approx 14;$$

$$N_{\text{п.р.}} = 22/14 = 1,57 \approx 2.$$

Мощность $P_{\text{ЭН.к.}}$ калорифера, собранного на базе этих элементов при номинальном напряжении источника питания, составит (см. уравнение 4.10)

$$P_{\text{ЭН.к.}} = (2 \cdot 3000^2 \cdot 800) / (14 \cdot 220^2) = 21250 \text{ (Вт)},$$

увеличиваясь при наибольшем напряжении до величины

$$P_{\text{ЭН.к.макс}} = (2 \cdot 4000^2 \cdot 800) / (14 \cdot 220^2) = 37780 \text{ (Вт)}.$$

И если нагревательные элементы при номинальном напряжении (3000 В) будут работать с некоторой недогрузкой (мощность каждого нагревателя составляет ~759 Вт), то при повышенном напряжении (4000 В) мощность каждого элемента (см. уравнение 4.9) увеличится до значения

$$P_{\text{макс}} = (4000^2 \cdot 800) / (14^2 \cdot 220^2) = 1349 \text{ (Вт)}.$$

Эта мощность превышает паспортное значение (800 Вт). Необходимо проверить величину удельной поверхностной мощности каждого элемента, которая с учетом данных табл. П1.4 составит

$$w_{\text{макс}} = (2,8 \cdot 1349) / 800 = 4,72 \text{ (Вт/см}^2\text{)}.$$

Поскольку в данном случае удовлетворяется неравенство (4.11), а $4,72 \text{ Вт/см}^2 < 5,0 \text{ Вт/см}^2$ (см. табл. П1.3 прил. П1), то расчет можно считать окончанным. Выбранные элементы ТЭН-78А13/0,8Т220 должны включаться по 14 штук последовательно в две параллельные ветви.

При невыполнении неравенства (4.11) пришлось бы подбирать другие элементы и повторять весь расчет. Сократить время на проведение всех расчетов, особенно при необходимости их многократного повторения, можно воспользовавшись программируемым калькулятором. Необходимая для этого программа приведена в прил. ПЗ (см. программу ПЗ.2).

Приложение ПЗ — Программы для микрокалькуляторов МК-56 и МК-52

Программа ПЗ.1 — для расчета мощности электрических нагревателей отопительной установки пассажирского вагона ($P_{\text{ОУ.Р}} = P_{\text{ПВ}} + P_{\text{Ф}} + P_{\text{В}} + P_{\text{ГВ}}$)

Адрес команды	Нажимаемая клавиша	Код операции	Содержание выполняемой операции
00	П П	53	Обращение к подпрограмме
01	79	79	Адрес подпрограммы
02	П→х а	6-	Вызов значения k из RGa
03	х	12	Вычисление $k(t_{\text{в}}-t_{\text{н}})$
04	2	02	Ввод значения $F=270\text{м}^2$ в RGx
05	7	07	
06	0	00	
07	х	12	
08	х→П 1	41	Запись значения $P_{\text{ПВ}}$ в RG1
09	0	00	Ввод значения $(k_{\text{ф1}}+k_{\text{ф2}})$ в RGx
10	.	0.	
11	4	04	
12	5	05	Вычисление составляющей $P_{\text{Ф}}$
13	х	12	
14	х→П 2	42	Запись значения $P_{\text{Ф}}$ в RG2
15	П→х 1	61	Вызов значения $P_{\text{ПВ}}$ в RGx
16	+	10	Вычисление $(P_{\text{ПВ}}+P_{\text{Ф}})$
17	х→П 3	43	Запись значения $(P_{\text{ПВ}}+P_{\text{Ф}})$ в RG3
18	П→х b	6L	Вызов значения $t_{\text{в}}$ из RGb
19	2	02	Вычисление значения $A=1/(1+t_{\text{в}}/273)$
20	7	07	
21	3	03	
22	:	13	
23	1	01	
24	+	10	

Продолжение программы ПЗ.1

Адрес команды	Нажимаемая клавиша	Код операции	Содержание выполняемой операции
25	1	01	
26	↔	14	
27	:	13	
28	х→П 8	48	Запись значения A в RG8
29	П→х с	6I	Вызов значения $t_{\text{н}}$ в RGc
30	2	02	Вычисление значения $B=1/(1+t_{\text{н}}/273)$
31	7	07	
32	3	03	
33	:	13	
34	1	01	
35	+	10	
36	1	01	
37	↔	14	
38	:	13	
39	П→х 8	68	
40	+	10	Вычисление $(A+B)$
41	1	01	Вычисление расчетной плотности воздуха $\rho_{\text{р}}=1,29(A+B)/2$
42	.	0.	
43	2	02	
44	9	09	
45	х	12	
46	2	02	
47	:	13	
48	х→П 6	46	Обращение к подпрограмме
49	ПП	53	Обращение к подпрограмме
50	79	79	Адрес подпрограммы
51	П→х 6	66	Вызов значения $\rho_{\text{р}}$ из RG6
52	х	12	Вычисление $\rho_{\text{р}}(t_{\text{в}}-t_{\text{н}})$
53	П→х d	6Г	Вызов значения n из RGd
54	х	12	Вычисление $P_{\text{В}}= \rho_{\text{р}}(t_{\text{в}}-t_{\text{н}})n \cdot 5,59$, где $5,59=c_{\text{р}}20/3600$
55	5	05	
56	.	0.	

Окончание программы ПЗ.1

Адрес команды	Нажимаемая клавиша	Код операции	Содержание выполняемой операции	
57	5	05		
58	9	09		
59	x	12		
60	x→П	4	44	Запись значения P_B в RG4
61	П→x	9	69	Вызов значения t_k в RG9
62	П→x	b	6L	Вызов значения $t_0 = t_b$ из RGb
63	-		11	Вычисление $(t_k - t_0)$
64	П→x	d	6Г	Вызов значения n из RGd
65	x		12	Вычисление $n(t_k - t_0)$
66	4		04	Ввод значения удельной теплоемкости воды $c=4190 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$
67	1		01	
68	9		09	
69	0		00	
70	x		12	Вычисление $nc(t_k - t_0)$
71	П→x	7	67	Вызов значения Q из RG7
72	x		12	Вычисление $P_{ГВ} = nQc(t_k - t_0)$
73	x→П	8	48	Запись значения $P_{ГВ}$ в RG8
74	П→x	4	64	Вызов значения P_B из RG4
75	+		10	Вычисление $(P_{ГВ} + P_B)$
76	П→x	3	63	Вызов значения $(P_{ГВ} + P_{Ф})$ из RG3
77	+		10	Вычисление $(P_{ОУ.Р} = P_{ГВ} + P_{Ф} + P_B + P_{ГВ})$
78	С/П		50	
79	П→x	b	6L	Подпрограмма вычисления $(t_b - t_n)$
80	П→x	c	6I	
81	-		11	
82	В/О		52	Завершение подпрограммы

Инструкция для работы с программой ПЗ.1

№	Операция	Нажимаемые клавиши
1	Включите микрокалькулятор	
2	Очистите программный счетчик	В/О
3	Перейдите в режим программирования	F ПРГ
4	Занесите программу 3.1	
5	Перейдите в режим «Автоматическая работа»	F АВТ
6	Занесите исходные данные в регистры (RG) памяти микрокалькулятора	
	значение k в RGa	x→П a
	Значение $t_n = t_n = t_0$ в RGb	x→П b
	Значение t_n в RGc	x→П c
	Значение n в RGd	x→П d
	Значение Q в RG7	x→П 7
	Значение t_k в RG9	x→П 9
7	Очистите программный счетчик	В/О
8	Запустите программу на счет	С/П
9	После остановки счета спишите с индикатора значение $P_{ОУ.Р}$	
10	Вызовите на индикатор из канала памяти RG1 значение составляющей $P_{ГВ}$, запишите его	П→x 1
11	Вызовите на индикатор из канала памяти RG2 значение составляющей $P_{Ф}$, запишите его	П→x 2
12	Вызовите на индикатор из канала памяти RG4 значение составляющей P_B , запишите его	П→x 4
13	Вызовите на индикатор из канала памяти RG8 значение составляющей $P_{ГВ}$, запишите его	П→x 8
14	Вызовите на индикатор из канала памяти RG6 значение составляющей $P_{Р}$, запишите его	П→x 6

Программа ПЗ.2 — для расчета количества нагревательных элементов калорифера

Адрес команды	Нажимаемая клавиша	Код операции	Содержание выполняемой операции
00	П→х b	6L	Вызов значения $P_{в}$ из RGb
01	П→х c	6 	Вызов значения $P_{н}$ из RGc
02	:	13	Вычисление $N_{общ,р}$
03	ПП	53	Обращение к подпрограмме
04	47	47	Адрес подпрограммы
05	х→П 1	41	Запись значения $N_{общ,р}$ в RG1
06	П→х a	6-	Вызов значения $U_{ин,л}$ в RGa
07	П→х d	6Г	Вызов значения $U_{н}$ в RGd
08	:	13	Вычисление $N_{с,р}$
09	ПП	53	Обращение к подпрограмме
10	47	47	Адрес подпрограммы
11	х→П 2	42	Запись значения $N_{с}$ в RG2
12	П→х 1	61	Вычисление $N_{н,р} = N_{общ}N_{с}$
13	↔	14	
14	:	13	Обращение к подпрограмме
15	ПП	53	
16	47 47	47	Адрес подпрограммы
17	х→П 3	43	Запись значения $N_{п}$ в RG3
18	П→х 2	62	Вызов значения $N_{с}$ из RG2
19	x	12	Уточненное значение $N_{общ}$
20	х→П 1	41	Запись уточненного значения $N_{общ}$
21	П→х a	6-	Вычисление мощности $P_{энк}$ всех ТЭН калорифера при номинальном напряжении $U_{ин,л}$ источника питания (см. уравнение 4.10)
22	П→х d	6Г	
23	:	13	

Продолжение программы ПЗ.2

Адрес команды	Нажимаемая клавиша	Код операции	Содержание выполняемой операции	
24	П→х 2	62		
25	:	13		
26	F→х ² x²	22		
27	П→х 1	61		
28	x	12		
29	П→х c	6 		
30	x	12		
31	х→П 4	44		Запись значения $P_{энк}$ при $U_{ин,л}$ в RG4
32	П→х 9	69		Вычисление мощности $P_{энк,макс}$ всех ТЭН калорифера при наибольшем напряжении $U_{ин,макс}$ источника питания (см. уравнение 4.10)
33	П→х a	6-		
34	:	13		
35	F→х ² x²	22		
36	П→х 4	65		
37	x	12		
38	х→П 5	45	Запись значения $P_{энк,макс}$ в RG5	
39	П→х 1	61	Вызов значения $N_{общ}$ из RG1 и вычисление $P_{макс}$ одного элемента	
40	:	13		
41	П→х 6	46	Запись значения $P_{макс}$ в RG6	
42	П→х c	6 	Вычисление наибольшего значения удельной поверхностной мощности $W_{макс}$ отдельного ЭН	
43	:	13		
44	П→х 8	68		
45	x	12		
46	СП	50	Остановка вычислений	
47	х→П 7	47	Подпрограмма преобразований дробных значений $N_{общ}$, $N_{п}$ и $N_{с}$ в целые числа	
48	K{x}	35		
49	0	00		
50	.	0.		
51	5	05		
52	-	11		
53	F x<0	5 		

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ
ОБОРУДОВАНИЕ ВАГОНОВ

РАЗДЕЛ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ НАГРЕВАТЕЛИ
СОПРОТИВЛЕНИЯ
В ВАГОННОМ ХОЗЯЙСТВЕ

Методические указания
к курсовому и дипломному проектированию

Редактор *Д.Н. Тихоньчев*
Компьютерная верстка *О.А. Денисова*

Тип. зак.	Изд. зак. 285	Тираж 1 000 экз.
Подписано в печать 06.11.07	Гарнитура Times	Офсет
Усл. печ. л. 3,5		Формат 60×90 _{1/16}

Издательский центр РГОТУПСа,
125993, Москва, Часовая ул., 22/2

Участок оперативной печати РГОТУПСа,
125993, Москва, Часовая ул., 22/2