

Особенности выбора и применения резисторов

В СИЛОВОЙ ТЕХНИКЕ

Резисторы, то есть электрические приборы, обладающие заданным электрическим сопротивлением, являются, пожалуй, одним из самых распространенных типов электронных компонентов. Они применяются в аппаратуре практически любого назначения и области применения. От правильности выбора резисторов, согласно условиям эксплуатации и назначения устройства, во многом зависит безаварийная работа аппаратуры в течение всего срока службы.

Дмитрий Андронников

adv@west-l.ru

Кажущаяся простота и очевидность применения резисторов создает у разработчиков силовой преобразовательной аппаратуры обманчивое впечатление малого влияния резисторов, как крайне простых, с точки зрения схемотехники, приборов на результирующую надежность разрабатываемого устройства. Однако это не так, и применение резисторов, как и любых других компонентов, требует тщательного подхода к выбору типов и обеспечению благоприятных условий работы.

Для лучшего понимания особенностей работы резисторов обратимся к базовым понятиям. Резистор, как элемент электрической цепи, служит для создания сопротивления протеканию электрического тока. В идеальном случае работа резистора определяется фундаментальным законом, установленным немецким физиком Георгом Симоном Омом и носящим его имя:

$$I = U/R, \quad (1)$$

где R — электрическое сопротивление участка цепи; U — напряжение, приложенное к участку цепи; I — ток, протекающий в цепи.

При протекании тока через резистор энергия упорядоченного движения носителей заряда превращается в тепловую и рассеивается в окружающем пространстве за счет теплопередачи и излучения. Мощность, выделяемая в резисторе, может быть определена по формуле, следующей из закона Ома:

$$P = I^2 R \quad (2)$$

или

$$P = U^2/R. \quad (3)$$

Здесь P — мощность, выделяемая в участке цепи; R — электрическое сопротивление участка цепи; U — напряжение, приложенное к участку цепи; I — ток, протекающий в цепи.

Мощность, выделяемая в резисторе, вызывает рост его температуры. Максимальная температура, которую резистор может выдерживать без повреждений, зависит от конструкции резистора и применяемых материалов — как собственно резистивного элемен-

та, так и его арматуры. Именно максимальная температура наиболее горячего участка резистора определяет ту мощность, которую резистор способен рассеивать.

В зависимости от условий, в которых находится резистор (температура, влажность, давление окружающего воздуха и скорость его движения), одна и та же рассеиваемая мощность вызывает различный прирост температуры прибора, поэтому при выборе резистора важно не только определить выделяемую мощность, но и условия его работы. Номинальная мощность резистора определяется как мощность, рассеиваемая прибором без превышения предельно допустимой температуры при естественном воздушном охлаждении на высоте 0 м над уровнем моря при температуре воздуха 25 °С.

При эксплуатации резистора следует помнить, что выделяемая мощность имеет квадратичную зависимость от приложенного к резистору напряжения или от протекающего тока (рис. 1):

Это означает, что небольшой рост напряжения или тока в цепи вызовет существенный рост рассеиваемой мощности, которая может превысить максимальную допустимую для примененного резистора, что приведет к выходу прибора из строя. Поэтому при выборе резистора важно не только знать номинальные ток и напряжение для него, но и учитывать возможные продолжительные отклонения, в частности из-за колебаний напряжения питающей сети.

Если мощность, рассеиваемая резистором, постоянна, то через некоторое время температура резистора стабилизируется (когда количество тепла, выделяемого в резисторе, станет равным количеству тепла, отдаваемого резистором в окружающую среду посредством излучения, конвекции и теплопередачи конструкции). Чем больше физический размер резистора, тем эффективнее происходит процесс отдачи тепла и тем ниже будет равновесная температура при одной и той же выделяемой мощности. Кроме того, эффективность излучения, конвекции и теплопередачи существенно зависит от конструкции резистора, применяемых материалов и условий охлаждения.

Приводимые в справочных материалах величины максимальной рассеиваемой мощности резисторов относятся к условиям естественного охлаждения.

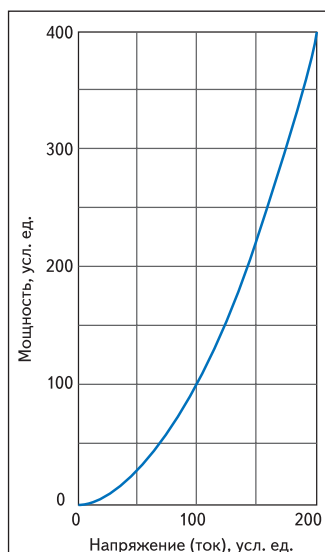
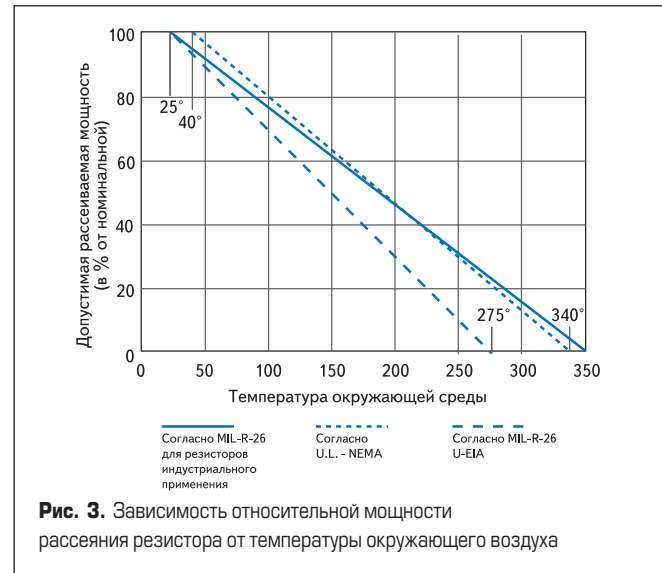
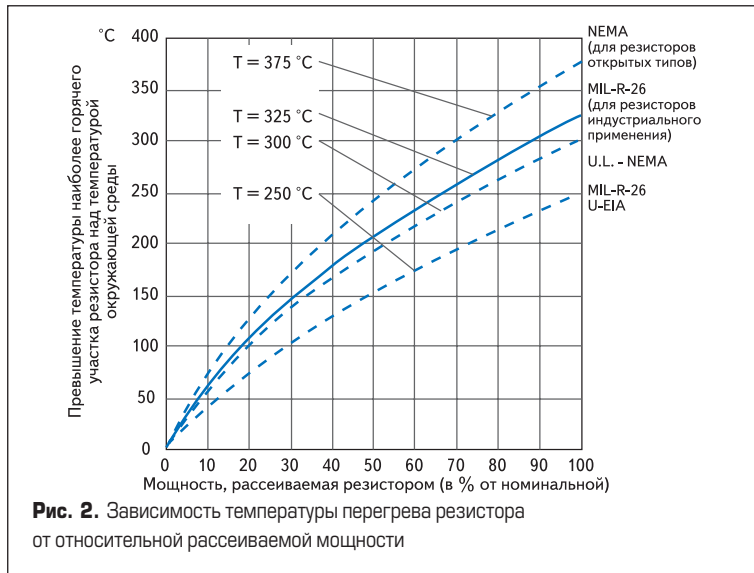


Рис. 1. Зависимость выделяемой мощности от напряжения (тока) резистора



На сегодняшний день существует ряд стандартов, регламентирующих метод определения максимально допустимой мощности рассеяния резисторов исходя из температуры перегрева наиболее горячего участка резистора. Ведущие производители мощных резисторов (Danotherm, Ohmite, Arcol, SIR и др.) при нормировании мощности своих приборов обычно руководствуются рекомендациями National Electrical Manufacturers Association (NEMA) и Underwriters Laboratories, Inc. (UL). Согласно таковым, максимально допустимая мощность при естественном охлаждении для резистора заданных физических характеристик и размеров, определяется как мощность, вызывающая температуру (измеренную термопарой) перегрева наиболее горячего участка резистора в 300 °С при температуре окружающего воздуха 40 °С. Измерение производится при неподвижном воздухе в условиях свободной конвекции и удалении резистора от ближайшего объекта (в частности, стен, панелей, приборов) не менее чем на 35 см.

Несколько иные условия измерений определяет стандарт MIL-R-26, первоначально разработанный для проволочных резисторов военного и аэрокосмического применения, а затем распространенный и на приборы промышленного и коммерческого назначения. Согласно этому стандарту максимальная температура нагрева наиболее горячего участка резистора устанавливается равной 350 °С при температуре окружающего воздуха 25 °С. Таким образом, соответствующая температура перегрева составляет 325 °С.

На рис. 2 показаны усредненные графики зависимости температуры перегрева резисторов по различным стандартам в зависимости от относительной рассеиваемой мощности:

В первом приближении температура резистора зависит от площади его поверхности, а также (в меньшей степени) от ряда других факторов, таких как теплопроводность основания и покрытия резистора, эффективность излучения поверхности, отношения длины резистора к его диаметру, теплопередача через выводы и средства монтажа.

Максимально допустимая температура резистора будет определяться свойствами его конструктивных материалов и является пре-

дельной величиной, при превышении которой прибор может потерять работоспособность. В общем случае на данную величину можно ориентироваться только для расчета предельных режимов работы устройства.

В нормальных условиях эксплуатации следует принимать во внимание не только и не столько физическое функционирование резистора, но и другие параметры, такие как изменение сопротивления при росте температуры, нагрев окружающих резистор устройств за счет выделяемого им тепла, зависимость сопротивления от влажности окружающего воздуха (особенно для резисторов открытых типов), изменение характеристик при циклической нагрузке и т. п.

Если температура окружающей среды отличается (в сторону увеличения) от 25 °С (или 40 °С), то рассеиваемая резистором мощность должна быть соответственно снижена до значений, при которых не превышает максимально допустимая температура нагрева прибора. На рис. 3 изображены графики зависимости относительной рассеиваемой мощности резисторов от температуры окружающего воздуха согласно рекомендациям NEMA, UL и MIL-R-26 (U-EIA):

При построении данных зависимостей принимается, что температура перегрева не зависит от величины температуры окружающей среды. Однако это не совсем верно. Точный расчет должен учитывать повышение эффективности излучения с ростом температуры согласно законам Стефана-Больцмана и Вина. Но вклад, вносимый за счет этого при невысоких температурах (до 1000–1500 °С) весьма невелик, и его можно не учитывать в подавляющем большинстве конструктивных расчетов.

Для некоторых типов резисторов в справочных данных указывается предельно допустимая тепловая нагрузка поверхности. Для большинства типов проволочных резисторов она составляет от 0,7 Вт/см² (для резисторов большого размера на мощности более 150–200 Вт) до 2 Вт/см² (для небольших резисторов с мощностью 10–20 Вт). Эту величину удобно использовать при расчете работы резистора в качестве нагревательного элемента.

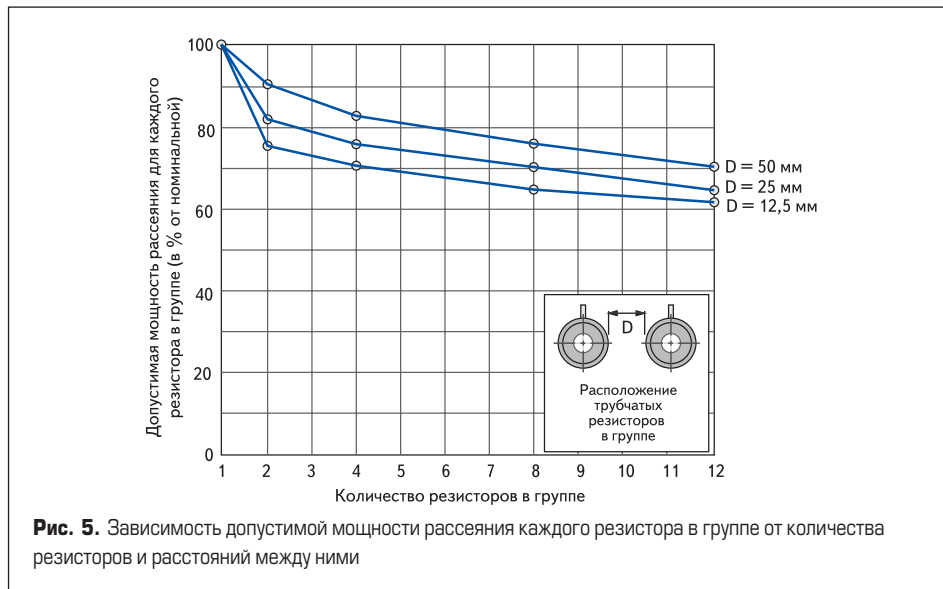
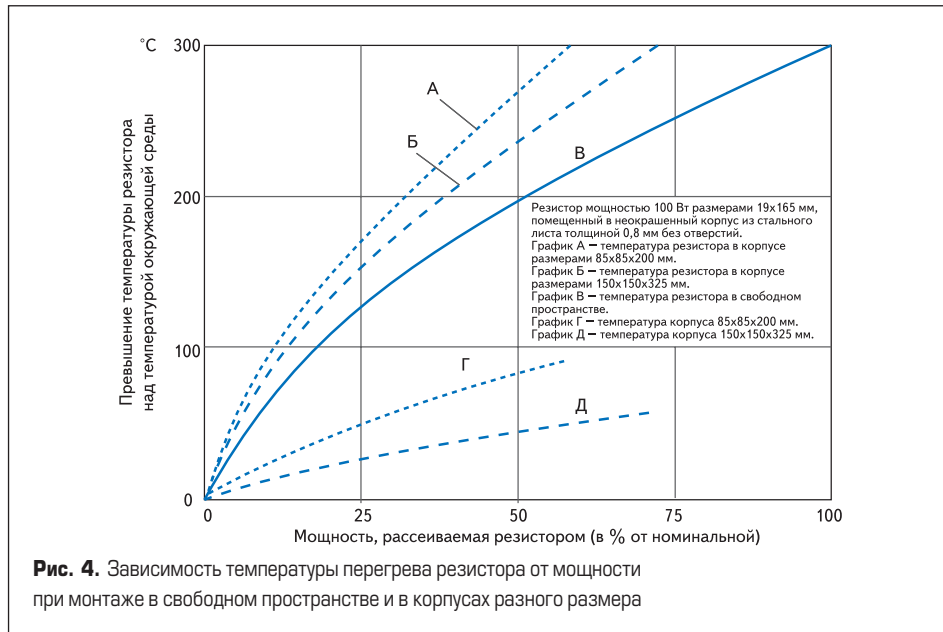
Следует обратить внимание на то, что в рекомендациях по определению максимальной

мощности резисторов не указано расположение резистора относительно поверхности земли. Но имеется точное указание на то, что температура измеряется для наиболее горячего участка резистора. У горизонтально расположенного трубчатого проволочного резистора с равномерной намоткой резистивного элемента температура в районе середины прибора может быть в 1,5–2,5 раза выше, чем температура у торцов (в зависимости от способа крепления). При вертикальном расположении зона максимального нагрева смещается вверх на 3–10% длины резистора, а верхний торец имеет большую температуру, чем нижний. Это вызывает некоторое увеличение механических напряжений в конструкции прибора и может снизить его надежность. Поэтому при прочих равных условиях всегда следует предпочитать горизонтальное расположение резисторов, за исключением специально предназначенных для вертикального монтажа приборов, например в теплоотводящих корпусах из алюминиевого профиля. Для ряда особых случаев применения (например, в качестве равномерного источника тепла) выпускаются специальные резисторы с неравномерной намоткой резистивного элемента (более частая у краев и редкая в середине), у которых температура практически постоянна по всей длине прибора.

Рассмотрим подробнее основные факторы, определяющие температуру резистора, либо, с другой стороны, требуемую величину номинальной мощности, при которой температура не превышает заданной:

1. Температура окружающей среды

Повышение температуры окружающей среды вызывает соответствующее снижение допустимой температуры перегрева и соответствующей ей мощности рассеяния. График зависимости относительной допустимой мощности рассеяния от температуры окружающей среды приведен выше, на рис. 3. Если температура окружающей среды ниже той, для которой была определена максимальная мощность рассеяния (25 °С или 40 °С), то в ряде случаев можно допустить повышение максимальной мощности выше типовой величины, но при этом необходимо дополнительно уточнять возможности резистора по работе с токами, превышающими номинальный. Превышение тока резисто-



ра в данном случае может вызвать не увеличение его температуры выше предельно допустимой, а разрушение внешних и внутренних контактов (места соединения резистивного элемента с выводами) и локальные перегревы и плавление резистивного элемента.

2. Монтаж в закрытом корпусе

Монтаж резистора в корпусе ухудшает условия отвода тепла за счет излучения (часть излучения отражается стенками корпуса, остальная часть излучается как в окружающее, так и во внутреннее пространство корпуса), а также за счет конвекции (корпус нарушает конвекционный ток воздуха и преграждает доступ холодного воздуха к резистору). Существенное влияние на температуру резистора, помещенного в корпус, оказывают размер, толщина стенок, их материал и наличие перфорации и окраски поверхности. Ухудшение условий работы резистора при помещении в корпус хорошо демонстрируют графики на рис. 4.

3. Монтаж групп резисторов

Резисторы, монтируемые на малом расстоянии друг от друга, при работе разогреваются сильнее, чем одиночный резистор при такой же рассеиваемой мощности (на каждом из ре-

зисторов группы). Это происходит за счет взаимного нагрева резисторов излучением и увеличением количества тепла, приходящегося на единицу объема охлаждающего воздуха при естественной конвекции. Для того чтобы температура резисторов, работающих в группе, не превысила допустимого значения, необходимо снижать мощность, приходящуюся на каждый из приборов по отношению к максимально допустимой для одного свободно установленного резистора. Рис. 5 дает представление о порядке требуемого снижения мощности рассеяния на каждом из резисторов в зависимости от количества резисторов в группе и расстояний между ними.

4. Высота над уровнем моря

Количество тепла, отводимого от резистора за счет конвекции воздуха, зависит от плотности последнего. Чем более разрежен воздух, тем меньшее количество тепла он способен отвести. При подъеме в атмосфере плотность воздуха снижается, а это означает, что максимальная мощность рассеяния резисторов будет снижаться. На высотах более 20 000 м плотность воздуха уже настолько мала, что конвективный отвод тепла перестает играть сколько-нибудь заметную роль в общем тепловом балан-



се резистора и тепло отводится только за счет излучения и теплопередачи элементам конструкции. На рис. 6 представлен график зависимости относительной мощности рассеяния резистора от высоты его размещения (над уровнем моря).

5. Работа в импульсных режимах

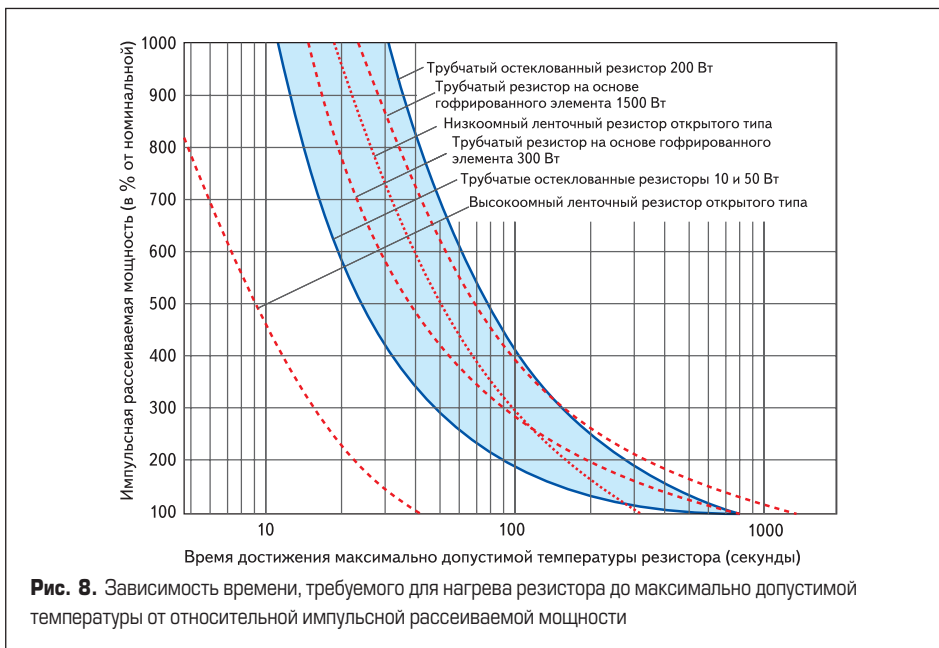
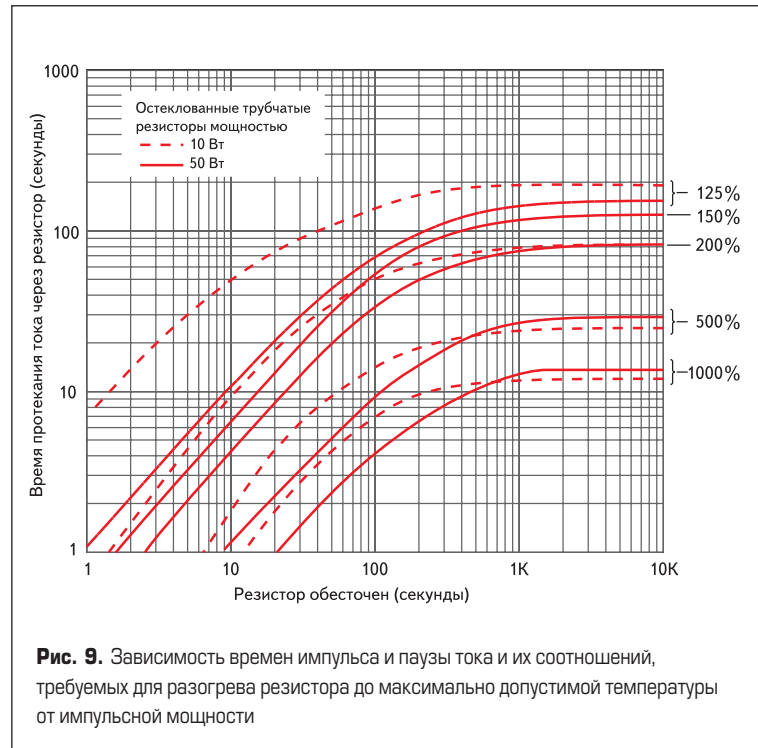
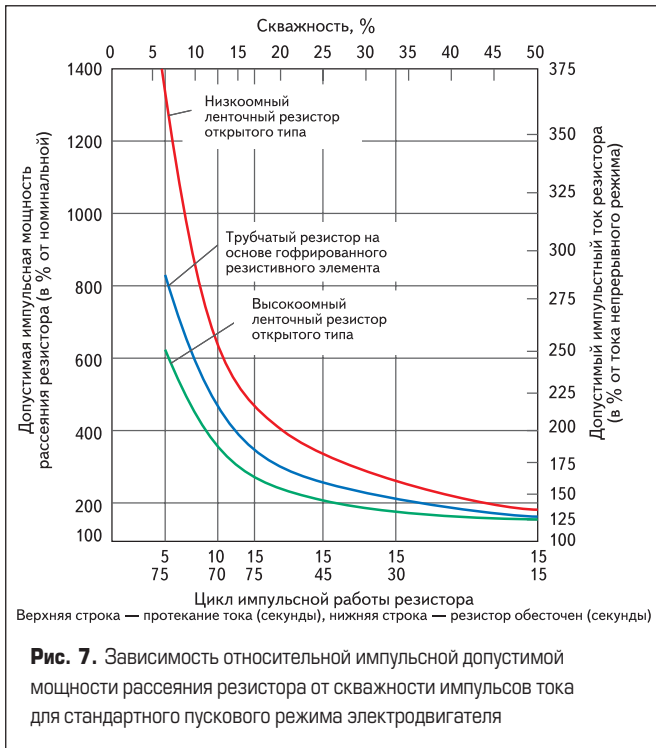
Если ток через резистор протекает не постоянно, а в течение определенных интервалов времени, а в остальные моменты резистор обесточен, то количество тепла, выделяемое в течение значительного промежутка времени, будет меньше, чем при непрерывной работе. «Усреднение» по времени происходит за счет теплоемкости конструкции, монтажных элементов и окружающего воздуха. В результате температура резистора не превышает максимально допустимую даже при импульсных мощностях, многократно превышающих максимальную мощность непрерывного режима. Величина допустимой импульсной мощности зависит как от конструктивных особенностей резистора (теплоемкость и теплопроводность конструкции), так и от длительности импульса и соотношения длительностей импульса и паузы (скважности). На рис. 7 приведены зависимости относительной допустимой импульсной рассеиваемой мощности для резисторов различных типов, определенные согласно рекомендациям NEMA для пусковых и тормозных резисторов.

Для ряда типов резисторов импульсная мощность ограничена не допустимым перегревом, а максимальной величиной рабочего тока резистора, при превышении которой возможны повреждения резистивного элемента и выводов за счет локальных перегревов.

Графики на рис. 8 дают представление о процессе нагрева резисторов разных типов импульсом тока и построены в координатах времени импульса, необходимого для нагрева резистора до максимально допустимой температуры и импульсной мощности.

С помощью зависимостей, представленных на рис. 9, можно определить соотношение длительностей импульса и паузы тока через трубчатые резисторы, нагревающего приборы до максимально допустимой температуры для различных абсолютных длительностей и различных относительных импульсных мощностей (в процентах от максимально допустимой мощности рассеяния непрерывного режима).

Рассмотренные выше особенности импульсных режимов относятся к типовым импульсным режимам, имеющим место при примене-



нии резисторов в цепях пуска и торможения электродвигателей, где времена воздействия значительных токов исчисляются единицами и десятками секунд, а паузы — от единиц секунд до многих часов.

Для импульсных токов малых длительностей (0,1–0,5 с и менее) импульсные характеристики будут существенно отличаться от приведенных выше, поскольку в большей мере будут определяться теплофизическими свойствами резистивного элемента, нежели теплоемкостью всего резистора в целом. При еще меньших длительностях импульсов (менее единиц миллисекунд) важную роль начинает играть индуктивность резистора, увеличивающая полное сопротивление резистора в области малых времен. Для применения на частотах более 1–3 кГц (длительности импульсов менее 1 мс) изготавливаются специальные резисторы с бифилярной намоткой, резко снижающей собственную индуктивность резис-

тора, либо поверхностные и объемные резисторы на основе проводящих пленок.

6. Принудительное охлаждение

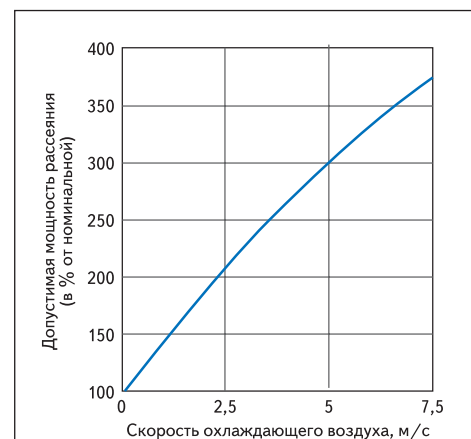
Принудительный обдув резисторов резко увеличивает количество охлаждающего воздуха по сравнению с естественным конвективным потоком и, тем самым, позволяет повысить эффективность отвода выделяемого тепла. Это очень простой и крайне эффективный способ повышения допустимой мощности рассеяния резисторов. На рис. 10 приведена зависимость относительной допустимой мощности рассеяния от скорости воздуха, охлаждающего резистор.

Об эффективности этой простой меры можно судить хотя бы по тому, что при скорости воздуха всего 2,5 м/с мощность, рассеиваемая резистором без перегрева, более чем вдвое превышает его максимальную мощность при естественном охлаждении. Если резисторы работают, например, в системах реостатного тормо-

жения электроподвижного состава, то с целью экономии электроэнергии возможно применение не постоянного обдува, а связанного с процессом торможения, когда вентиляторы подключаются параллельно тормозному резистору или его отводу. Такие схемы охлаждения тормозных резисторов применены на ряде магистральных электровозов отечественного и зарубежного производства.

7. Ограничение температуры резисторов

В ряде случаев, с целью повышения надежности и увеличения срока аппаратуры, рабочую температуру резисторов выбирают ниже максимально допустимой. Снижение температуры поверхности резистора в 2 раза по отношению к максимально допустимой увеличивает надежность работы резистора от 4 до 100 раз (в зависимости от типа), а также снижает температуру внутри устройства, в котором резистор установлен, что также является крайне благоприятным фактором. К сожалению, снижение температуры тепловыделяющих элементов, при прочих равных условиях, всегда связано с увеличением их физичес-



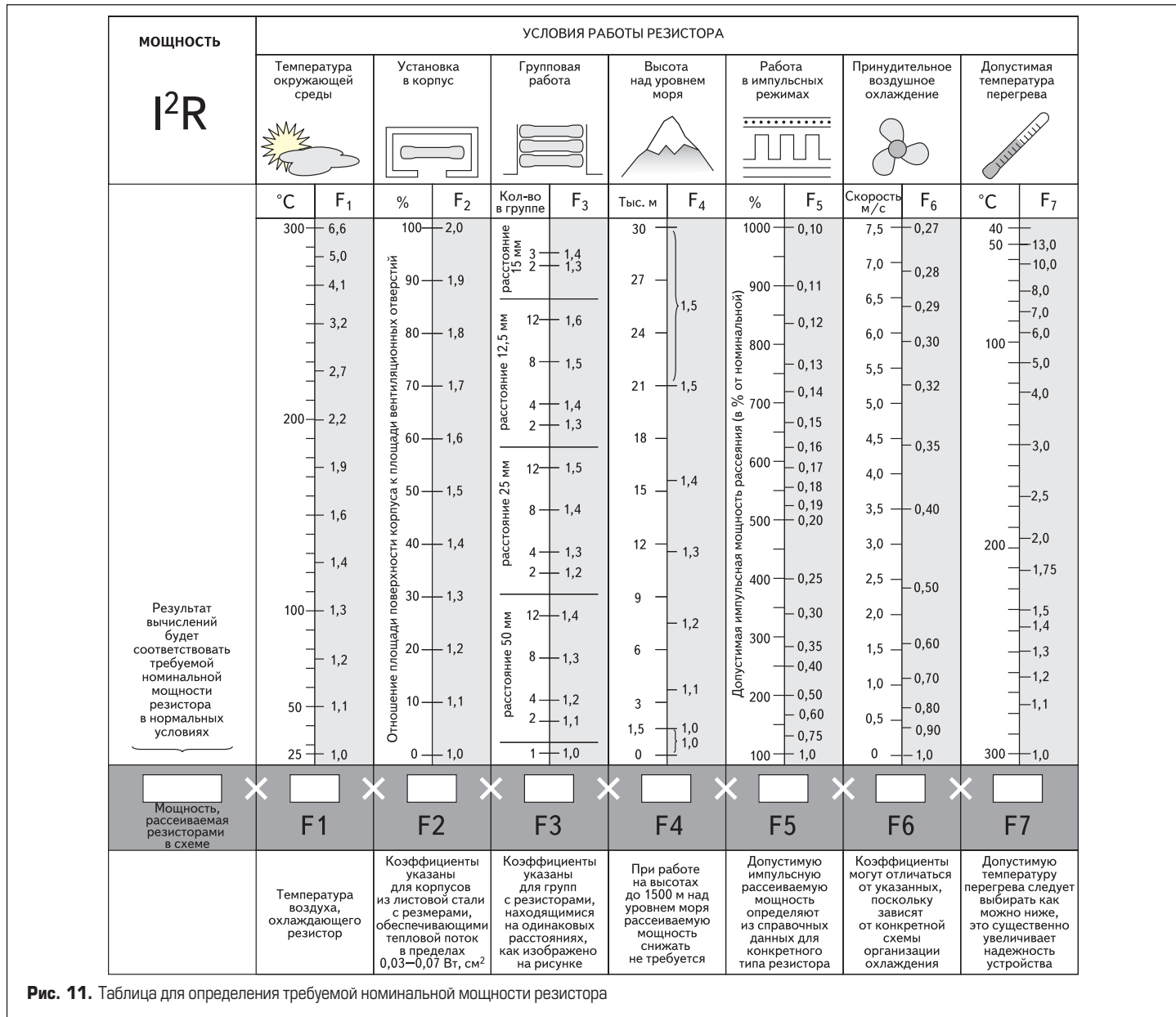


Рис. 11. Таблица для определения требуемой номинальной мощности резистора

ких габаритов, поэтому данную меру можно рекомендовать, только если это допускается массогабаритными показателями аппаратуры.

Учитывая все вышесказанное, для первичного выбора резистора можно рекомендовать воспользоваться данными мнемонической таблицы, приведенной на рис. 11. В каждой из 7 граф таблицы приведены значения коэффициентов для различных условий окружающей среды и режима работы. Если известна (из расчета электрической схемы) мощность, рассеиваемая на резисторе, то, умножив ее на коэффициенты, определенные из таблицы и соответствующие условиям и режимам работы, можно получить величину номинальной мощности резистора, который следует применить в данной схеме в данных условиях.

В качестве примера определим номинальную мощность резистора для системы пуска электродвигателя. Импульсная мощность, выделяемая на резисторах согласно расчету, составляет 1 кВт (300% от номинальной), рассеивается на группе из 4 резисторов (250 Вт на резистор), температура окружающего воздуха составляет +60 °С, резисторы смонтированы в открытой стойке, расстояние между резисторами 5 см, предполагается возможность работы устройст-

ва на высоте до 4000 м над уровнем моря, охлаждение естественное конвекционное, температура резисторов ограничена величиной 250 °С.

Определяем из таблицы соответствующие коэффициенты:

$$F_1 \approx 1,13; F_2 \approx 1; F_3 \approx 1,2; F_4 \approx 1,1; F_5 \approx 0,33; F_6 \approx 1; F_7 \approx 1,3.$$

Номинальная мощность каждого из резисторов группы составит:

$$P = (P_{tot} \div N) \times F_1 \times F_2 \times F_3 \times F_4 \times F_5 \times F_6 \times F_7 = (1000 \div 4) \times 1,13 \times 1 \times 1,2 \times 1,1 \times 0,33 \times 1 \times 1,3 \approx 160 \text{ Вт}.$$

Таким образом, номинальная мощность каждого из резисторов в группе должна составлять не менее 160 Вт.

Разумеется, расчет номинальной мощности с помощью данной таблицы является приблизительным, поскольку не учитывает многие дополнительные факторы, тем не менее, его погрешность достаточно невелика и позволяет быстро определить мощность требуемого резистора, а исходя из нее — и конкретный тип применяемого прибора.

Несмотря на то, что резисторы, по сути, являются простейшими элементами электрических цепей, от правильного выбора их типов и условий эксплуатации во многом зависит надежность, себестоимость и эксплуатационные качества аппаратуры, а правильный выбор резисторов для силовых преобразовательных устройств, выполненный на этапе проектирования, во многом определит коммерческую судьбу аппаратуры.

При подготовке статьи были использованы информационные материалы компаний Danotherm (Дания), Arcol (Великобритания), Ohmite (США), S.I.R. (Италия).

Литература

1. <http://www.danotherm.co.m/>
2. <http://www.ohmite.com/>
3. <http://www.sirresistor.it/>
4. <http://www.arcolresistors.com/>
5. Резисторы: Справочник / Под ред. И. И. Чертверткова. М.: Энергоиздат. 1981.
6. ГОСТ 24238-84 Резисторы постоянные. Общие технические условия.
7. ГОСТ 28608-90 (МЭК 115-1-82) Резисторы постоянные для электронной аппаратуры.