**Таблица удельных сопротивлений проводников. Таблица удельных сопротивлений металлов.  
Зависимость сопротивления металлов от температуры. Температурный коэффициент электрического сопротивления металлов α .**

* В разумных температурных пределах вокруг некоторой точки зависимость удельного сопротивления металлов от температуры описывается как:
* **ΔR = α\*R\*ΔT**, где α - температурный коэффициент электрического сопротивления.
* Ниже приведена таблица значений α для ряда металлов в диапазоне температур от 0 до 100 ° C.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Зависимость сопротивления металлов от температуры. Температурный коэффициент электрического сопротивления металлов α . | | |
| **Проводник** | **Удельное сопротивление ρ, Ом\*мм2/м** | ***α, 10 -3\*C-1(или K -1)*** |
| Алюминий | 0,028 | *4,2* |
| Бронза | 0,095 - 0,1 | *-* |
| Висмут | 1,2 | *-* |
| Вольфрам | 0,05 | *5* |
| Железо | 0,1 | *6* |
| Золото | 0,023 | *4* |
| Иридий | 0,0474 | *-* |
| Константан ( сплав Ni-Cu + Mn) | 0,5 | ***0,05!*** |
| Латунь | 0,025 - 0,108 | *0,1-0,4* |
| Магний | 0,045 | *3,9* |
| Манганин (сплав меди марганца и никеля - приборный) | 0,43 - 0,51 | ***0,01!!*** |
| Медь | 0,0175 | *4,3* |
| Молибден | 0,059 | *-* |
| Нейзильбер (сплав меди цинка и никеля) | 0,2 | *0,25* |
| Натрий | 0,047 | *-* |
| Никелин ( сплав меди и никеля) | 0,42 | *0,1* |
| Никель | 0,087 | *6,5* |
| Нихром ( сплав никеля хрома железы и марганца) | 1,05 - 1,4 | *0,1* |
| Олово | 0,12 | *4,4* |
| Платина | 0.107 | *3,9* |
| Ртуть | 0,94 | *1,0* |
| Свинец | 0,22 | *3,7* |
| Серебро | 0,015 | *4,1* |
| Сталь | 0,103 - 0,137 | *1-4* |
| Титан | 0,6 | *-* |
| Фехраль (Cr (12—15 %); Al (3,5—5,5 %); Si (1 %); Mn (0,7 %); + Fe) | 1,15 - 1,35 | *0,1* |
| Хромаль | 1,3 - 1,5 | *-* |
| Цинк | 0,054 | *4,2* |
| Чугун | 0,5-1,0 | *1,0* |

[ТОЭЭ](http://bourabai.ru/toe/index.htm)   [ТЭЦ](http://bourabai.ru/toe/tec.htm)   [РиЭКТ](http://bourabai.ru/hardware/index.htm)   [Метрология](http://bourabai.ru/metrology/index.htm)   [Реальная физика](http://bourabai.ru/physics/index.htm)   [Сверхпроводимость](http://bourabai.ru/toe/superconductivity.htm)   [Теория проводимости](http://bourabai.ru/conductivity.htm)

**Удельное электрическое сопротивление проводников**

|  |
| --- |
| 1. [Таблица удельных сопротивлений проводников](http://bourabai.ru/toe/resistance.htm#1) 2. [Температурный коэфф. сопротивления металлов](http://bourabai.ru/toe/resistance.htm#2) 3. [Электрическая проводимость](http://bourabai.ru/toe/resistance.htm#provod) 4. [Материалы высокой проводимости](http://bourabai.ru/toe/resistance.htm#3) 5. [Медь](http://bourabai.ru/toe/resistance.htm#4) 6. [Алюминий](http://bourabai.ru/toe/resistance.htm#5) 7. [Железо и сталь](http://bourabai.ru/toe/resistance.htm#6) 8. [Натрий](http://bourabai.ru/toe/resistance.htm#7) 9. [Микроомметры](http://bourabai.ru/toe/microohm.htm) 10. [Литцендрат](http://bourabai.ru/toe/litzendraht.htm) 11. [Литература](http://bourabai.ru/toe/resistance.htm#8) |

В связи с тем, что существует два типа электрических сопротивлений -

**омическое сопротивление** - электрическое сопротивление постоянному току, определяемое трением, создаваемым движению носителей электрических зарядов в проводящей среде под действием потенциального электрического поля в этой среде (проводнике).

**активное сопротивление** - электрическое сопротивление переменному току, определяемое трением, создаваемым движению носителей электрических зарядов в проводящей среде под действием потенциального и вихревого электрических полей в проводнике, проводящей среде.

следует различать два следующих основных понятия удельного сопротивления.

1. **Удельное электрическое сопротивление постоянному току** - это электрическое сопротивление единицы длины проводника единичной площади сечения [Ohm·m], оказываемое движению носителей заряда в проводнике, а также полупроводнике и проводящих ионы растворах, под действием потенциального электрического поля. Удельное электрическое сопротивление постоянному току с одной строны является производным понятием от электрического сопротивления проводника, а с другой - базовым понятием электротехнического материаловедения, так как определяет свойства материала проводника вне зависимости от его длины и формы вообще.
2. **Удельное электрическое сопротивление переменному току** - это электрическое сопротивление единицы длины проводника единичной площади (для тонких проводников) [Ohm·m]/ длины поверхности сечения (для толстых проводников) [Ohm], оказываемое движению носителей заряда в проводнике, а также полупроводнике и проводящих ионы растворах, под совместным действием потенциального и вихревого электрического поля определенной частоты. Удельное электрическое сопротивление переменному току всегда больше, чем удельное сопротивление постоянному току в связи с тем, что к сопротивлению постоянному току добавляется всегда положительная величина - сопротивление вихревым движениям носителей электрических зарядов в проводнике (и полупроводнике). Удельное электрическое сопротивление переменному току зависит не только от свойств материала проводника, но и его формы, определяющей параметры вихревого движения носителей электрического заряда. Размерность удельного сопротивления переменному току различна для тонких и толстых проводников. Толстыми проводниками считаются проводники полутолщиной большей, чем глубина проникновения тока в проводник.

В связи с электромагнитными явлениями, возникающими в проводниках при прохождении через него переменного тока в них возникает два важных для их электротехнических свойств физических явления.

1. **Поверхностный эффект, скин-эффект** - затухание электромагнитного поля по мере его проникновения в проводящую среду. (см. [скин-эффект в физике](http://bourabai.ru/physics/3686.html), [поверхностный эффект в электротехнике](http://bourabai.ru/toe/skin.htm))
2. **Эффект близости** - снижение плотности тока в проводе из-за влияния токов в соседних проводах. (см. [поверхностный эффект и эффект близости в электротехнике](http://bourabai.ru/toe/skin.htm))

Два последних явления делают неэффективным применение проводников радиусом больше характерной глубины проникновения электрического тока в проводник. Эффективный диаметр проводников (2RБхар): 50Гц - 2,8мм для 400Гц - 1мм, 40кГц - 0,1мм. Поэтому на высоких частотах эффективно применение лишьт плоскоских проводников и кос, многожильных кабелей ([литцендратов](http://bourabai.ru/toe/litzendraht.htm))

В связи с высокой проводимостью металлов их сопротивление измеряется специальными приборами - [микроомметрами](http://bourabai.ru/toe/microohm.htm), сегодня, как правило, цифровыми, имеющими нижний предел измерения сопротивления порядка 10-7 Ом. Используя [микроомметры](http://bourabai.ru/toe/microohm.htm), можно определить качество электрических контактов, сопротивление электрических шин, обмоток [трансформаторов](http://bourabai.ru/toe/chapter03.htm), [электродвигателей и генераторов](http://bourabai.ru/toe/chapter07.htm), наличие дефектов и инородного металла в слитках (например, сопротивление слитка чистого золота вдвое ниже позолоченного слитка вольфрама).

Для расчета длины провода, его диаметра и необходимого электрического сопротивления, необходимо знать удельное сопротивление проводников ρ.

В международной системе единиц удельное сопротивление ρ выражается формулой:

ρ = Ом · мм2/м.

Оно означает: электрическое сопротивление 1 метра провода (в Омах), сечением 1 мм2, при температуре 20 градусов по Цельсию.

**Таблица удельных сопротивлений проводников**

|  |  |
| --- | --- |
| Материал проводника | Удельное сопротивление *ρ* в http://bourabai.ru/toe/img/482-image002.png |
| Серебро Медь Золото Латунь Алюминий Натрий Иридий Вольфрам Цинк Молибден Никель Бронза Железо Сталь Олово Свинец Никелин (сплав меди, никеля и цинка) Манганин (сплав меди, никеля и марганца) Константан (сплав меди, никеля и алюминия) Титан Ртуть Нихром (сплав никеля, хрома, железа и марганца) Фехраль Висмут Хромаль | 0,015 0,0175 0,023 0,025... 0,108 0,028 0,047 0,0474 0,05 0,054 0,059 0,087 0,095... 0,1 0,1 0,103... 0,137 0,12 0,22 0,42 0,43... 0,51 0,5 0,6 0,94 1,05... 1,4 1,15... 1,35 1,2 1,3... 1,5 |

Из таблицы видно, что железная проволока длиной 1 м и сечением 1 мм2 обладает сопротивлением 0,13 Ом. Чтобы получить 1 Ом сопротивления нужно взять 7,7 м такой проволоки. Наименьшим удельным сопротивлением обладает серебро. 1 Ом сопротивления можно получить, если взять 62,5 м серебряной проволоки сечением 1 мм2. Серебро - лучший проводник, но стоимость серебра исключает возможность его массового применения. После серебра в таблице идет медь: 1 м медной проволоки сечением 1 мм2 обладает сопротивлением 0,0175 Ом. Чтобы получить сопротивление в 1 Ом, нужно взять 57 м такой проволоки.

Химически чистая, полученная путем рафинирования, медь нашла себе повсеместное применение в электротехнике для изготовления проводов, кабелей, обмоток электрических машин и аппаратов. Широко применяют также в качестве проводников алюминий и железо.

Сопротивление проводника можно определить по формуле:

http://bourabai.ru/toe/img/482-image004.png

где *r* - сопротивление проводника в омах; *ρ* - удельное сопротивление проводника; *l* - длина проводника в м; *S* - сечение проводника в мм2.

**Пример 1.** Определить сопротивление 200 м железной проволоки сечением 5 мм2.

http://bourabai.ru/toe/img/482-image006.png

**Пример 2.** Вычислить сопротивление 2 км алюминиевой проволоки сечением 2,5 мм2.

http://bourabai.ru/toe/img/482-image008.png

Из формулы сопротивления легко можно определить длину, удельное сопротивление и сечение проводника.

**Пример 3.** Для радиоприемника необходимо намотать сопротивление в 30 Ом из никелиновой проволоки сечением 0,21 мм2. Определить необходимую длину проволоки.

http://bourabai.ru/toe/img/482-image010.png

**Пример 4.** Определить сечение 20 м нихромовой проволоки, если сопротивление ее равно 25 Ом.

http://bourabai.ru/toe/img/482-image012.png

**Пример 5.** Проволока сечением 0,5 мм2 и длиной 40 м имеет сопротивление 16 Ом. Определить материал проволоки.

Материал проводника характеризует его удельное сопротивление.

http://bourabai.ru/toe/img/482-image014.png

По таблице удельных сопротивлений находим, что таким сопротивлением обладает свинец.

Выше было указано, что сопротивление проводников зависит от температуры. Проделаем следующий опыт. Намотаем в виде спирали несколько метров тонкой металлической проволоки и включим эту спираль в цепь аккумулятора. Для измерения тока в цепь включаем амперметр. При нагревании спирали в пламени горелки можно заметить, что показания амперметра будут уменьшаться. Это показывает, что с нагревом сопротивление металлической проволоки увеличивается.

У некоторых металлов при нагревании на 100° сопротивление увеличивается на 40 - 50 %. Имеются сплавы, которые незначительно меняют свое сопротивление с нагревом. Некоторые специальные сплавы практически не меняют сопротивления при изменении температуры. Сопротивление металлических проводников при повышении температуры увеличивается, сопротивление электролитов (жидких проводников), угля и некоторых твердых веществ, наоборот, уменьшается.

Способность металлов менять свое сопротивление с изменением температуры используется для устройства термометров сопротивления. Такой термометр представляет собой платиновую проволоку, намотанную на слюдяной каркас. Помещая термометр, например, в печь и измеряя сопротивление платиновой проволоки до и после нагрева, можно определить температуру в печи.

**температурный коэффициент сопротивления** - это изменение сопротивления проводника при его нагревании, приходящееся на 1 Ом первоначального сопротивления и на 1° температуры, обозначается буквой α.

Если при температуре *t*0 сопротивление проводника равно *r*0, а при температуре *t* равно *rt*, то температурный коэффициент сопротивления

http://bourabai.ru/toe/img/482-image016.png

**Примечание.** Расчет по этой формуле можно производить лишь в определенном интервале температур (примерно до 200°C).

Приводим значения температурного коэффициента сопротивления α для некоторых металлов (таблица 2).

*Таблица 2*

**Значения температурного коэффициента для некоторых металлов**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Металл | α |  | Металл | α |
| Серебро Медь Железо Вольфрам Платина | 0,0035 0,0040 0,0066 0,0045 0,0032 | Ртуть Никелин Константан Нихром Манганин | 0,0090 0,0003 0,000005 0,00016 0,00005 |

Из формулы температурного коэффициента сопротивления определим *rt*:

*rt* = *r*0 [1 + α (*t* - *t*0)].

**Пример 6.** Определить сопротивление железной проволоки, нагретой до 200°C, если сопротивление ее при 0°C было 100 Ом.

*rt* = *r*0 [1 + α (*t* - *t*0)] = 100 (1 + 0,0066 α 200) = 232 Ом.

**Пример 7.** Термометр сопротивления, изготовленный из платиновой проволоки, в помещении с температурой 15°C имел сопротивление 20 Ом. Термометр поместили в печь и через некоторое время было измерено его сопротивление. Оно оказалось равным 29,6 Ом. Определить температуру в печи.

http://bourabai.ru/toe/img/482-image018.png

**Электрическая проводимость**

До сих пор мы рассматривали сопротивление проводника как препятствие, которое оказывает проводник электрическому току. Но все же ток по проводнику проходит. Следовательно, кроме сопротивления (препятствия), проводник обладает также способностью проводить электрический ток, то есть проводимостью.

Чем большим сопротивлением обладает проводник, тем меньшую он имеет проводимость, тем хуже он проводит электрический ток, и, наоборот, чем меньше сопротивление проводника, тем большей проводимостью он обладает, тем легче току пройти по проводнику. Поэтому сопротивление и проводимость проводника есть величины обратные.

Из математики известно, что число, обратное 5, есть 1/5 и, наоборот, число, обратное 1/7, есть 7. Следовательно, если сопротивление проводника обозначается буквой *r*, то проводимость определяется как 1/*r*. Обычно проводимость обозначается буквой g.

Электрическая проводимость измеряется в (1/Ом) или в сименсах.

**Пример 8.** Сопротивление проводника равно 20 Ом. Определить его проводимость.

Если *r* = 20 Ом, то

http://bourabai.ru/toe/img/482-image020.png

**Пример 9.** Проводимость проводника равна 0,1 (1/Ом). Определить его сопротивление,

Если g = 0,1 (1/Ом), то *r* = 1 / 0,1 = 10 (Ом)

**Материалы высокой проводимости**

К наиболее широкораспрстраненным материалам высокой проводимости следует отнести медь и алюминий (Сверхпроводящие материалы, имеющие типичное сопротивление в 10-20 раз ниже обычных проводящих материалов (металлов) рассматриваются в разделе [Сверхпроводимость](http://bourabai.ru/toe/superconductivity.htm)).

**Медь**

Преимущества меди, обеспечивающие ей широкое применение в качестве проводникового материала, следующие:

1. малое удельное сопротивление;
2. достаточно высокая механическая прочность;
3. удовлетворительная в большинстве случаев применения стойкость по отношению к коррозии;
4. хорошая обрабатываемость: медь прокатывается в листы, ленты и протягивается в проволоку, толщина которой может быть доведена до тысячных долей миллиметра;
5. относительная легкость пайки и сварки.

Медь получают чаще всего путем переработки сульфидных руд. После ряда плавок руды и обжигов с интенсивным дутьем медь, предназначенная для электротехнических целей, обязательно проходит процесс электролитической очистки.

В качестве проводникового материала чаще всего используется медь марок М1 и М0. Медь марки М1 содержит 99.9% Cu, а в общем количестве примесей (0.1%) кислорода должно быть не более 0,08%. Присутствие в меди кислорода ухудшает ее механические свойства. Лучшими механическими свойствами обладает медь марки М0, в которой содержится не более 0.05% примесей, в том числе не свыше 0.02% кислорода.

Медь является сравнительно дорогим и дефицитным материалом, поэтому она все шире заменяется другими металлами, особенно алюминием.

В отдельных случаях применяются сплавы меди с оловом, кремнием, фосфором, бериллием, хромом, магнием, кадмием. Такие сплавы, носящие название бронз, при правильно подобранном составе имеют значительно более высокие механические свойства, чем чистая медь.

**Алюминий**

Алюминий является вторым по значению после меди проводниковым материалом. Это важнейший представитель так называемых легких металлов: плотность литого алюминия около 2.6, а прокатанного - 2.7 Мг/м3. Т.о., алюминий примерно в 3.5 раза легче меди. Температурный коэффициент расширения, удельная теплоемкость и теплота плавления алюминия больше, чем меди. Вследствие высоких значений удельной теплоемкости и теплоты плавления для нагрева алюминия до температуры плавления и перевода в расплавленное состояние требуется большая затрата тепла, чем для нагрева и расплавления такого же количества меди, хотя температура плавления алюминия ниже, чем меди.

Алюминий обладает пониженными по сравнению с медью свойствами - как механическими, так и электрическими. При одинаковом сечении и длине электрическое сопротивление алюминиевого провода в 1.63 раза больше, чем медного. Весьма важно, что алюминий менее дефицитен, чем медь.

Для электротехнических целей используют алюминий, содержащий не более 0.5% примесей, марки А1. Еще более чистый алюминий марки АВ00 (не более 0.03% примесей) применяют для изготовления алюминиевой фольги, электродов и корпусов электролитических конденсаторов. Алюминий наивысшей чистоты АВ0000 имеет содержание примесей не более 0ю004%. Добавки Ni, Si, Zn или Fe при содержании их 0.5% снижают γ отожженного алюминия не более, чем на 2-3%. Более заметное действие оказывают примеси Cu, Ag и Mg, при том же массовом содержании снижающие γ алюминия на 5-10%. Очень сильно снижают электропроводность алюминия Ti и Mn.

Алюминий весьма активно окисляется и покрывается тонкой оксидной пленкой с большим электрическим сопротивлением. Эта пленка предохраняет металл от дальнейшей коррозии.

Алюминиевые сплавы обладают повышенной механической прочностью. Примером такого сплава является ***альдрей***, содержащий 0.3-0.5% Mg, 0.4-0.7% Si и 0.2-0.3% Fe. В альдрее образуется соединение Mg2Si, которое сообщает высокие механические свойства сплаву.

**Железо и сталь**

Железо (сталь) как наиболее дешевый и доступный металл, обладающий к тому же высокой механической прочностью, представляет большой интерес для использования в качестве проводникового материала. Однако даже чистое железо имеет значительно более высокое сравнительно с медью и алюминием удельное сопротивление; ρ стали, т.е. железа с примесью углерода и других элементов, еще выше. Обычная сталь обладает малой стойкостью коррозии: даже при нормальной температуре, особенно в условиях повышенной влажности, она быстро ржавеет; при повышении температуры скорость коррозии резко возрастает. Поэтому поверхность стальных проводов должна быть защищена слоем более стойкого материала. Обычно для этой цели применяют покрытие цинком.

В ряде случаев для уменьшения расхода цветных металлов применяют так называемый ***биметалл***. Это сталь, покрытая снаружи слоем меди, причем оба металла соединены друг с другом прочно и непрерывно.

**Натрий**

Весьма перспективным проводниковым материалом является металлический натрий. Натрий может быть получен электролизом расплавленного хлористого натрия NaCl в практически неограниченных количествах. Из сравнения свойств натрия со свойствами других проводниковых металлов видно, что удельное сопротивление натрия примерно в 2.8 раза больше ρ меди и в 1.7 раз больше ρ алюминия, но благодаря чрезвычайно малой плотности натрия (плотность его почти в 9 раз меньше плотности меди), провод из натрия при данной проводимости на единицу длины должен быть значительно легче, чем провод из любого другого металла. Однако натрий чрезвычайно активен химически (он интенсивно окисляется на воздухе, бурно реагирует с водой), почему натриевый провод должен быть защищен герметизирующей оболочкой. Оболочка должна придавать проводу необходимую механическую прочность, так как натрий весьма мягок и имеет малый предел прочности при деформациях.

**Литература по удельному сопротивлению проводников**

1. Кузнецов М. И., "Основы электротехники" – 9-е издание, исправленное – Москва: Высшая школа, 1964 – 560с.