

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ

Методические указания
к расчетно-графической работе
для студентов дневного отделения ЭМФ
по теме «Расчет датчика мощности»

УДК 621.38 : 53(07)
Ф 505

Составители:

*А.М. Погорельский,
О.Ю. Рубцова,
В.В. Христофоров*

Рецензент проф. *Л.А. Борыняк*

Работа подготовлена на кафедре общей физики

© Новосибирский государственный
технический университет, 2008

**ФИЗИЧЕСКИЕ
ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ**

**Методические указания
к расчетно-графической работе**

Редактор *Т.П. Петроченко*
Выпускающий редактор *И.П. Брованова*
Корректор *И.Е. Семенова*
Компьютерная верстка *Н.В. Гаврилова*

Подписано в печать 29.02.2008. Формат 60 × 84 1/16. Бумага офсетная. Тираж 200 экз.
Уч.-изд. л. 0,93. Печ. л. 1,0. Изд. № 272. Заказ № . Цена договорная

Отпечатано в типографии
Новосибирского государственного технического университета
630092, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

Цель работы – рассчитать преобразователь мощность–напряжение на основе эффекта Холла и коэффициент передачи согласующего устройства датчика с вольтметром.

1. ДАТЧИК МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Эффект Холла заключается в том, что при протекании электрического тока i_x вдоль прямоугольной пластины (рис. 1), помещенной в поперечное магнитное поле \mathbf{B} , носители заряда отклоняются на верхнюю и нижнюю грани пластины. При этом возникает холловское напряжение:

$$U_x = R_x \frac{i\mathbf{B}}{d}, \quad (1)$$

где d – толщина пластины; R_x – постоянная Холла, определяемая параметрами материала пластины.

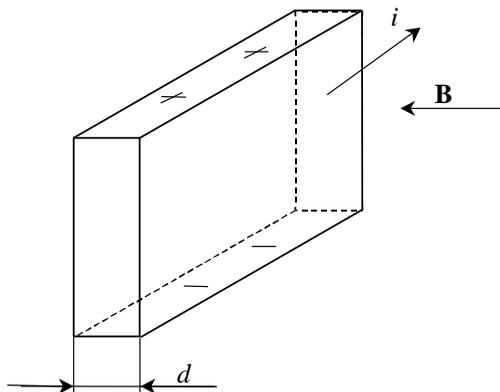


Рис. 1

Если параметры R_x , i_x и d не зависят от внешних факторов, то $U_x = \alpha_B \mathbf{B}$ и, следовательно, такая пластина является линейным измерительным преобразователем – датчиком магнитного поля. Толщина пластины d не зависит от внешних условий. При питании датчика от генератора тока (рис. 2) постоянной, не зависящей от внешних условий, будет и сила тока $i_x = \text{const}$. Тогда для выполнения условия $\alpha_B = \text{const}$ необходимо, чтобы постоянная Холла не зависела от внешних условий $R_x = \text{const}$. Выясним, как этого добиться.

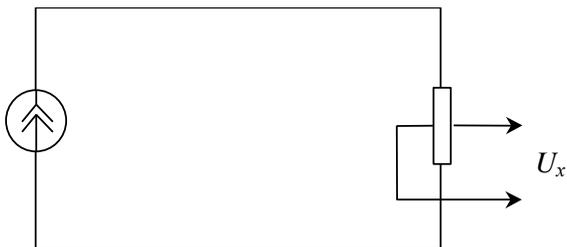


Рис. 2

В общем случае постоянная Холла определяется концентрациями и подвижностями носителей заряда. Так, в полупроводниках с двумя типами носителей заряда, когда подвижность определяется в основном рассеянием на фононах:

$$R_x = \frac{3\pi}{8} \frac{n\mu_n^2 - p\mu_p^2}{e n\mu_n + p\mu_p}, \quad (2)$$

где n – концентрация электронов; p – концентрация дырок; μ_n – подвижность электронов; μ_p – подвижность дырок; e – элементарный заряд. Поскольку как концентрация, так и подвижность являются функциями температуры, то и R_x зависит от температуры. Однако если, например ($n \gg p$), то

$$R_x = \frac{A}{en}, \quad (3)$$

где A определяется механизмом рассеяния носителей заряда и в широком диапазоне не зависит от температуры. Таким образом, для получения $R_x = \text{const}$, необходимо, чтобы концентрация не зависела от температуры. Это условие выполняется в металлах, однако из-за больших значений концентрации $n \approx 10^{27} \text{ м}^{-3}$ постоянная Холла в них оказывается очень малой – $R_x = 6 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3/\text{Кл}$ и коэффициент преобразования даже при сравнительно больших токах i_x и малых значениях d получается небольшим, что делает использование металлических датчиков нецелесообразным.

Зависимость логарифма концентрации электронов от обратной температуры для полупроводников n -типа приведена на рис. 3.

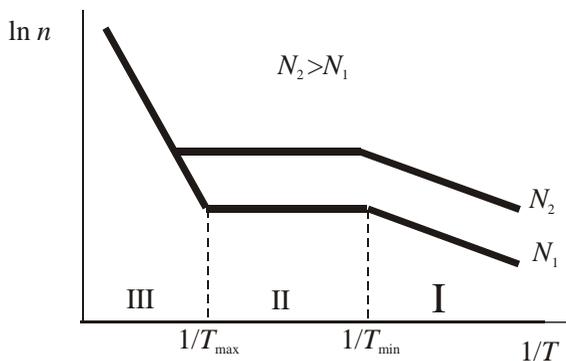


Рис. 3

Эта зависимость имеет три области.

I – область активации примесей, где концентрация носителей заряда зависит от температуры, II – область истощения примесей, где концентрация практически не зависит от температуры, и III – область собственной проводимости, где

$$\ln n = \ln n_0 - \frac{\Delta E}{2kT}. \quad (4)$$

Здесь ΔE – ширина запрещенной зоны; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура, причем в этой области $n \approx p$. Следовательно, с точки зрения постоянства величины R_x рабочей областью может являться только область истощения примесей. Следует отме-

туть, что области I и II перемещаются на графике вверх, если увеличивать концентрацию примесных атомов N в собственном полупроводнике. Это позволяет смещать точку пересечения области II и III влево путем увеличения концентрации примеси (рис. 3).

Температура T_{\min} при использовании материалов с достаточно малой энергией активации обычно не выше 50 К, что гораздо ниже, чем рабочая область температур датчиков. Поэтому расчет ведется только по температуре T_{\max} . Для этого определяется концентрация в точке пересечения двух прямых на графике (рис. 3), вычисленная по формуле (4) для области собственной проводимости и $n = \text{const}$ для области истощения примесей. Чтобы определить n_0 , можно использовать выражение для концентрации собственных носителей:

$$n_i = n_0 e^{-\frac{\Delta E}{2kT}}. \quad (5)$$

Основные параметры широко используемых полупроводниковых материалов германия и кремния следующие:

Ge: $\mu \approx 0,36 \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, $n_{i0} = 3 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ при $T_0 = 300 \text{ К}$, $\Delta E = 0,72 \text{ эВ}$;

Si: $\mu \approx 0,1 \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, $n_{i0} = 4 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3}$ при $T_0 = 300 \text{ К}$, $\Delta E = 1,1 \text{ эВ}$.

Из (5) с учетом указанных параметров полупроводниковых материалов определяем

$$n_0 = n_{i0} e^{+\frac{\Delta E}{2kT_0}}$$

и, подставляя в (5), получим концентрацию перехода от области истощения примеси к области собственной проводимости при заданной температуре T_{\max} :

$$n_i = n_{i0} e^{\frac{\Delta E}{2k} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_{\max}} \right)}. \quad (6)$$

Если найденная нами концентрация носителей заряда для данного собственного полупроводника, соответствующая температуре T_{\max} , будет равна концентрации носителей заряда, даваемых примесью, содержащейся в этом собственном полупроводнике, при температуре T_{\min} , то (рис. 3) в диапазоне температур от T_{\min} до T_{\max} мы получим

область насыщения примеси, где концентрация носителей заряда, а следовательно R_x , не зависит от температуры. Концентрацию носителей заряда в области примесной проводимости и в области истощения примеси можно увеличивать, повышая концентрацию примесных атомов в собственном полупроводнике. Кроме того, при увеличении концентрации примесных атомов точка пересечения области II и III смещается влево. Поэтому для надежного выхода на горизонтальный участок концентрацию, найденную по (6), увеличивают в 100 раз, т.е.

$$n_{\text{тр}} \geq 100n_{i0}e^{\frac{\Delta E}{2k}\left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_{\text{max}}}\right)}, \quad (7)$$

где $n_{\text{тр}}$ – требуемая рабочая концентрация носителей заряда.

Обычно для датчика выбирают отношение длины к ширине пластины $l/b \geq 3$, а толщина полупроводниковой пленки составляет $d \approx 10$ мкм. Чувствительность датчика можно повысить, увеличив ток i_x через датчик, однако он не должен приводить к саморазогреву датчика. Для этого плотность тока $j_x = \frac{i_x}{bd}$ не должна превышать 4 А/мм², т.е. $i_{\text{пред}} = 4bd$. Генератор тока имеет предельное напряжение на выходе U_{max} , таким образом, $i_{\text{пред}} = \frac{U_{\text{max}}}{R_{\text{д}}} = 4bd$, откуда сопротивление датчика не должно быть более чем

$$R_{\text{д}} \leq \frac{U_{\text{max}}}{4bd}. \quad (8)$$

Сопротивление датчика определяется как параметрами материала, так и его размерами:

$$R_{\text{д}} = \rho \frac{l}{S} = \rho \frac{l}{bd},$$

где $\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{en\mu}$, следовательно, возникает еще одно условие:

$$\rho \leq \frac{U_{\max}}{4bd} \frac{bd}{l} = \frac{U_{\max}}{4l}$$

или

$$n \geq \frac{4l}{e\mu U_{\max}}. \quad (9)$$

Таким образом, при проектировании датчика магнитного поля для получения максимального коэффициента преобразования выбирают максимальную длину датчика (она не должна превышать области, где поле можно считать однородным) и подсчитывают концентрацию как по формуле (7), так и по формуле (9). Из двух значений выбирают наибольшее, а затем определяют ток через датчик и коэффициент преобразования.

2. ДАТЧИК ТОКА

Поскольку любой проводник с током I создает магнитное поле, пропорциональное этому току $B \sim I$, датчик Холла, помещенный в это магнитное поле, может являться бесконтактным датчиком тока. Для передачи больших токов используются шины – проводники прямоугольного сечения (рис. 4), у которых ширина значительно превосходит толщину.

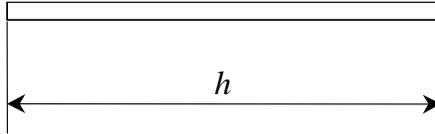


Рис. 4

Индукция магнитного поля вблизи шины в вакууме или воздухе по величине равна

$$B = \mu_0 \frac{I}{2h} = KI,$$

где $K = \frac{\mu_0}{2h}$ – коэффициент пропорциональности между индукцией \mathbf{B} и силой тока I . Тогда

$$U_x = R_x \frac{i_x \mathbf{B}}{d} = R_x \frac{i_x \mu_0 I}{2hd} = \alpha_I I,$$

где $\alpha_I = R_x \frac{i_x \mu_0}{2hd}$ – коэффициент преобразования по току.

При малой силе тока для соединения генератора с потребителем электроэнергии используют провод круглого сечения. С целью увеличения \mathbf{B} можно в некотором месте цепи из этого провода изготовить длинный соленоид относительно малого диаметра, внутри которого индукция равна

$$\mathbf{B} = \mu_0 \frac{N}{l_c} I = KI,$$

где N – число витков соленоида; l_c – длина соленоида; $K = \mu_0 \frac{N}{l_c}$ – коэффициент пропорциональности между индукцией \mathbf{B} внутри «бесконечного» соленоида и силой тока I в его витках. Тогда

$$U_x = R_x \frac{i_x \mathbf{B}}{d} = R_x \frac{i_x \mu_0 N}{dl_c} I = \alpha_I I, \quad (10)$$

где $\alpha_I = R_x \frac{i_x \mu_0 N}{dl_c}$ – коэффициент преобразования по току. Расчет ведется аналогично расчету датчика магнитного поля.

3. ДАТЧИК ПОТРЕБЛЯЕМОЙ МОЩНОСТИ

Для измерения активной мощности, передаваемой от генератора к потребителю, используют датчик тока, включенный по схеме рис. 5. Здесь балластный резистор R_1 и датчик Холла с сопротивлением R_d включены между токопроводами, идущими дальше к потребителю.

Из закона Ома следует

$$i_x = \frac{U_0 \cos \omega t}{R_1 + R_d},$$

если $R_1 \gg R_d$, то

$$i_x \cong \frac{U_0 \cos \omega t}{R_1} \text{ и } U_x = R_x \frac{i_x B}{d} = \frac{U_0 \cos \omega t}{R_1 d} R_x K I_0 \cos(\omega t + \varphi),$$

где K – коэффициент пропорциональности между B и I (см. выше);
 φ – сдвиг фаз между напряжением и силой тока в цепи. Тогда

$$\begin{aligned} U_x &= KR_x \frac{U_0 I_0}{R_1 d} \cos \omega t \cos \omega t \cos \varphi - \sin \omega t \sin \varphi = \\ &= KR_x \frac{U_0 I_0}{R_1 d} \cos^2 \omega t \cos \varphi - \cos \omega t \sin \omega t \sin \varphi . \end{aligned}$$

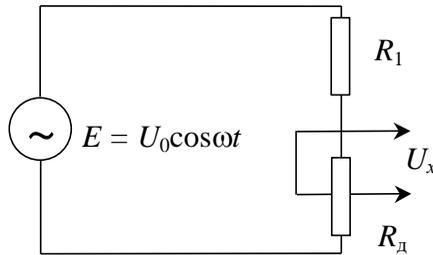


Рис. 5

Если теперь проинтегрировать это выражение по времени, то получим

$$\begin{aligned} \frac{1}{T} \int_0^T U_x dt &= KR_x \frac{U_0 I_0}{R_1 d} \left(\frac{1}{T} \int_0^T \cos^2 \omega t \cos \varphi dt + \frac{1}{T} \int_0^T \cos \omega t \sin \varphi dt \cos \omega t \right) = \\ &= \frac{1}{2} \frac{KR_x}{R_1 d} U_0 I_0 \cos \varphi, \end{aligned}$$

где $U_0 I_0 \cos \varphi = P_a$ – активная мощность.

Для измерения реактивной мощности используют датчик тока, включенный по схеме рис. 6.

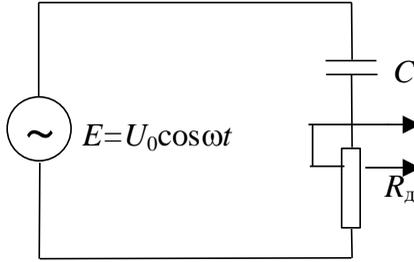


Рис. 6

Ток, протекающий через датчик, $i_x = E/Z$. Здесь $E = U_0 \cos \omega t$ или в комплексном виде $E = U_0 e^{j\omega t}$, где j – мнимая единица; $Z = R_d - \frac{j}{\omega C}$ – комплексное сопротивление (импеданс). При $\frac{1}{\omega C} \gg R_d$ ток в датчике Холла равен

$$i_x = \frac{U_0 e^{j\omega t}}{-\frac{j}{\omega C}} = j\omega C U_0 e^{j\omega t} = \omega C U_0 e^{j\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)}.$$

Переходя к вещественной форме этого выражения, получаем $i_x = -\omega C U_0 \sin \omega t$. Тогда холловское напряжение равно

$$\begin{aligned} U_x &= R_x \frac{i_x B}{d} = \frac{-\omega C U_0 \sin \omega t}{d} R_x K I_0 \cos \omega t + \varphi = \\ &= \frac{-\omega C K R_x}{d} U_0 I_0 \sin \omega t \cos \omega t \cos \varphi - \sin \omega t \sin \varphi = \\ &= \frac{\omega C K R_x}{d} U_0 I_0 - \sin \omega t \cos \omega t \cos \varphi + \sin^2 \omega t \sin \varphi \end{aligned}$$

и после интегрирования

$$\frac{1}{T} \int U_x dt = \frac{1}{2} \frac{\omega C K R_x}{d} U_0 I_0 \sin \varphi,$$

где $U_0 I_0 \sin \varphi = P_p$ – реактивная мощность.

Таким образом, если дополнить схему, представленную на рис. 5 или 6, интегратором и усилителем с коэффициентом усиления K_y (рис. 7), то получим

$$U_{\text{вых}} = \alpha_p P,$$

где $\alpha_p = \frac{1}{2} \frac{KK_y R_x}{R_1 d}$ – для датчика активной мощности и

$\alpha_p = \frac{\omega C K K_y R_x}{2d}$ – для датчика реактивной мощности.

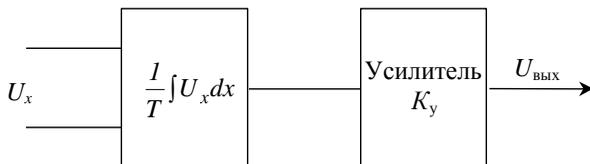


Рис. 7

Исходными данными для расчета датчика мощности являются:

- напряжение сети U ;
- частота сети ν ;
- наибольшая измеряемая мощность P_{max} ;
- максимальная рабочая температура T_{max} ;
- максимальное выходное напряжение $U_{\text{вых max}}$.

ПОРЯДОК РАСЧЕТА

1. Определяют максимальный ток нагрузки в амперах $I_{\text{max}} = \frac{P_{\text{max}}}{U}$.
2. Выбирают длину датчика Холла равной: для шины $l = 0,1h$, а для соленоида, намотанного из провода, $l = 0,1D$, где D – диаметр соленоида, его берут равным 2 см.
3. Ширину датчика выбирают равной $b = l/3$.
4. Оценивают ток через датчик $i_x = 4bd$, где $d \approx 10$ мкм. В этой формуле размеры датчика берутся в миллиметрах, при этом сила тока получается в амперах.

5. Определяют величину сопротивления балластного резистора в омах $R_1 \approx U/i_x$ для датчика активной мощности или величину емкости конденсатора в фарадах $C \approx \frac{i_x}{U\omega}$ для датчика реактивной мощности.

6. Принимают сопротивление датчика активной мощности $R_d = 0,01R_1$ или сопротивление датчика реактивной мощности $R_d = \frac{0,01}{\omega C}$.

7. Определяют удельное сопротивление материала датчика $\rho = \frac{R_d b d}{l}$ [Ом · м].

8. Для германия и кремния определяют требуемые для обеспечения найденного ρ концентрации носителей тока $n = \frac{1}{e\mu\rho}$ м⁻³.

9. Для германия и кремния определяют по заданному t_{\max} требуемое значение концентрации $n_{\text{тр}} = 100n_{i0}e^{\frac{\Delta E}{2k}\left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_{\max}}\right)}$, где при расчете по пп. 8 и 9 необходимо учесть следующие табличные данные:

Ge: $\mu \approx 0,36 \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, $n_{i0} = 3 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ при $T_0 = 300 \text{ К}$, $\Delta E = 0,72 \text{ эВ}$;

Si: $\mu \approx 0,1 \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, $n_{i0} = 4 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3}$ при $T_0 = 300 \text{ К}$, $\Delta E = 1,1 \text{ эВ}$;

$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$.

Здесь μ – подвижность носителей тока; n_{i0} – концентрация носителей при температуре T_0 ; ΔE – ширина запрещенной зоны; k – постоянная Больцмана.

10. Имея по два значения концентрации для германия, полученные в пп. 8 и 9, выбирают из них наибольшее. Затем делают это же для кремния. Выбрав из четырех значений два, из этих двух берут меньшее. Это делается для того, чтобы получить датчик с большей величиной постоянной Холла R_x , которая обратно пропорциональна концентрации. Сделав выбор концентрации n , рассчитывают по ней постоянную Холла $R_x = \frac{1,17}{en}$, где $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$.

11. Максимальное значение магнитной индукции для шины шириной h равно

$$B_{\max} = \frac{\mu_0 I_{\max}}{2h} = KI_{\max},$$

а для длинного соленоида, навитого из провода,

$$B_{\max} = I_{\max} \frac{N}{l_c} \mu_0 = KI_{\max},$$

где отношение числа витков к длине соленоида связано с диаметром провода соотношением $N/l_c = 1/d_{\text{пр}}$. Диаметр провода можно выбрать, используя известную в электротехнике формулу $d_{\text{пр}} = \sqrt{I_{\max}/\pi}$, где диаметр провода измеряется в миллиметрах, а сила тока – в амперах. Учитывая вышесказанное, определяют коэффициент $K = \frac{\mu_0}{2h}$ для шины или $K = \frac{\mu_0}{d_{\text{пр}}}$ для соленоида (провода).

12. Рассчитывают

$$U_{x\max} = \frac{1}{2} \frac{KR_x}{R_1 d} P_{\text{аmax}}$$

– для активной мощности или

$$U_{x\max} = \frac{1}{2} \frac{\omega CKR_x}{d} P_{\text{рmax}}$$

– для реактивной.

13. Определяют требуемый коэффициент усиления усилителя $K_y = U_{\text{вых max}}/U_{x\max}$.

ЗАДАНИЕ

Определите, пользуясь изложенным выше порядком расчета, основные параметры датчика мощности на основе эффекта Холла: 1) геометрические размеры; 2) материал; 3) удельное сопротивление; 4) коэффициент усиления усилителя.

В отчете должны быть представлены результаты расчетов по всем пунктам (см. пп. 1–13). Исходные данные приведены в таблице. Номер варианта определяется по двум последним цифрам вашей зачетной книжки, которые указаны рядом с номером варианта.

Исходные данные для расчета

№ варианта (цифры в зачетной книжке)	P_{\max} , Вт	Тип токопровода	Напряжение сети U , В	Частота сети, Гц	t_{\max} , °С	$U_{\text{вых max}}$, В
1 (01, 21, 41, 61, 81)	10000 Активная	Шина, $h = 8$ см	500	0	100	10
2 (02, 22, 42, 62, 82)	1500 Активная	Провод	220	50	140	1,5
3 (03, 23, 43, 63, 83)	1500 Реактивная	Провод	115	400	140	1,5
4 (04, 24, 44, 64, 84)	20000 Активная	Шина, $h = 8$ см	380	50	60	2,0
5 (05, 25, 45, 65, 85)	3000 Активная	Шина, $h = 5$ см	27	0	120	3,0
6 (06, 26, 46, 66, 86)	100000 Активная	Шина, $h = 2$ см	500	0	40	10
7 (07, 27, 47, 67, 87)	1000 Активная	Провод	27	1000	150	1,0
8 (08, 28, 48, 68, 88)	1000 Реактивная	Провод	27	1000	120	1,0
9 (09, 29, 49, 69, 89)	4000 Реактивная	Провод	110	400	100	4,0

10 (10, 30, 50, 70, 90)	50 Активная	Провод	27	1000	50	5,0
11 (11, 31, 51, 71, 91)	50 Активная	Провод	220	50	120	5,0
12 (12, 32, 52, 72, 92)	200 Реактивная	Провод	220	50	140	2,0
№ варианта (цифры в зачетной книжке)	P_{\max} , Вт	Тип токопровода	Напряжение сети U , В	Частота сети, Гц	t_{\max} , °C	$U_{\text{вых max}}$, В
13 (13, 33, 53, 73, 93)	700 Активная	Провод	110	400	100	7,0
14 (14, 34, 54, 74, 94)	60000 Активная	Шина $h = 8$ см	600	0	120	6,0
15 (15, 35, 55, 75, 95)	200 Активная	Провод	220	50	150	2,0
16 (16, 36, 56, 76, 96)	250 Реактивная	Провод	110	400	70	2,5
17 (17, 37, 57, 77, 97)	1000 Активная	Провод	220	50	90	1,0
18 (18, 38, 58, 78, 98)	1500 Реактивная	Провод	380	50	100	1,5
19 (19, 39,	800 Активная	Провод	110	400	140	8,0

59, 79, 99)						
20 (20, 40, 60, 80, 00)	15000 Реактивная	Шина $h = 6$ см	27	1000	150	1,5

ЛИТЕРАТУРА

1. *Савельев И.В.* Курс общей физики. – М.: Наука, 1978. – Т. 2 (см. также более поздние издания этого курса).
2. *Елифанов Г.И.* Физика твердого тела. – М.: Высш. шк., 1966 (см. также более поздние издания этого курса).