

Министерство образования и науки РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЛЕСОТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени С. М. Кирова»

Кафедра теплотехники и теплосиловых установок

И.В. Елисеев, кандидат технических наук, старший преподаватель
И. В. Иванова, кандидат технических наук, доцент
В.А. Соколова, кандидат технических наук, доцент

ТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ И ПРИБОРЫ

Методические указания по выполнению курсового проекта
по дисциплине «Технические измерения и приборы»
для студентов очной и заочной форм обучения
направления подготовки
27.03.04 «Управление в технических системах»

Санкт-Петербург
2018

Рассмотрены и рекомендованы к изданию
Институтом технологических машин и транспорта леса
Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета
20 ноября 2017 г.

Составители:

старший преподаватель, доцент **И. В. Елисеев**,
кандидат технических наук, доцент **И. В. Иванова**,
кандидат технических наук, доцент **В. А. Соколова**

Рецензент

**кафедра математических методов в управлении
СПбГЛТУ**

Технические измерения и приборы: методические указания по выполнению курсового проекта по дисциплине «Технические измерения и приборы» для студентов очной и заочной форм обучения направления подготовки 27.03.04 «Управление в технических системах» / сост.: И.В. Елисеев, В.А. Соколова, И. В. Иванова. – СПб.: СПбГЛТУ, 2018. – 45 с.

Методические указания предназначены для выполнения курсового проекта по дисциплине «Технические измерения и приборы» студентами очной и заочной форм обучения.

Курсовой проект состоит из четырех частей. Первая и вторая части содержат методики расчета индуктивного преобразователя линейных размеров и измерительных схем автоматического моста и потенциометра. В третьей части приведена статистическая обработка результатов измерений. В четвертой части рассматриваются технологические измерения параметров производственных процессов.

Составлены в соответствии с рабочей программой курса «Технические измерения и приборы» для студентов очной и заочной форм обучения направления подготовки 27.03.04 «Управление в технических системах».

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время во всех отраслях промышленности проводится большая работа по внедрению автоматизированных систем управления технологическими процессами. Широкое применение таких систем соответствует новому этапу развития автоматизации производственных процессов, однако на пути практической реализации таких систем имеется ряд сложных, еще не решенных задач. В лесной и деревообрабатывающей промышленности одной из причин, сдерживающих внедрение автоматизированных систем в производство, является отсутствие точных и надежных средств информационного обеспечения, т. е. измерительных преобразователей параметров технологических процессов. Особенностью данных отраслей промышленности является большое разнообразие и сложность измерения технологических параметров. Поэтому для решения стоящих перед лесной и деревообрабатывающей промышленностью задач в области автоматизации производственных процессов необходимы квалифицированные специалисты, хорошо знающие технологические процессы и методы и средства измерения их параметров. Для более глубокого изучения курса «Технические измерения и приборы» служит данный курсовой проект. Проект состоит из четырех частей, касающихся методов и средств измерения размеров, температуры и обработки результатов измерений.

Пояснительная записка и чертежи должны выполняться в соответствии с прил. 1, 2 и [1].

1. Расчет индуктивного преобразователя линейных размеров

Автоматический контроль линейных размеров при помощи устройств с индуктивными преобразователями осуществляется включением их в мостовые, трансформаторные и дифференциальные схемы. Одна из мостовых схем включения дифференциального индуктивного преобразователя приведена на рис. 1.1.

Преобразователь питается переменным напряжением U от вторичной обмотки трансформатора (на схеме не показана) либо от специального генератора напряжением повышенной частоты. При изменении измеряемого размера якорь преобразователя отклонится от нейтрали. Появившееся напряжение разбаланса выпрямляется диодами $V1$ и $V2$ и поступает последовательно на операционные усилители $A1$ и $A2$. На выходе усилителя $A2$ включен измерительный вольтметр. Одновременно с выхода усилителя $A2$ сигнал поступает на светофорное устройство, состоящее из компараторов $A3$, $A4$, транзисторов $V3$, $V4$, $V7$, являющихся усилителями мощности для

индикаторных ламп, и транзисторов $V5$, $V6$ – выполняющих логическую функцию: «или – не». Если измеряемый размер превышает верхнюю границу поля допуска, напряжение на неинвертирующем входе усилителя $A3$ превышает пороговое напряжение, задаваемое резистором $R11$. Усиленная, в k раз разность перебрасывает напряжение на выходе $A3$ в область положительных напряжений, открывается транзистор $V3$ и загорается лампа $L1$ («больше»). При этом транзистор $V5$ открывается, запирая транзистор $V7$.

Если измеряемый размер находится внутри поля допуска, напряжения на инвертирующем входе $A3$ и неинвертирующем $A4$ превышают напряжения сигнала, перебрасывая выходные напряжения в область отрицательных напряжений. Транзисторы $V3$ и $V4$ заперты, лампы $L1$ и $L2$ не горят. Падения напряжения на $L1$ и $L2$, поступающего через резисторы $R19$ и $R20$, недостаточно для открытия транзисторов $V5$ и $V6$, поэтому $V7$ открыт и горит лампа $L3$ («норма»).

Работа светового устройства при измеряемом размере меньше нормы («меньше») аналогична описанному выше, только работает усилитель $A4$ и транзистор $V4$.

Рассчитать:

1. Статическую характеристику преобразователя $z_s = f(\delta)$.
2. Чувствительность преобразователя

$$K = \frac{\Delta Z}{\Delta \delta}.$$

3. Измерительное усилие преобразователя F_Σ .
4. Измерительную схему для получения напряжения выхода $0 \dots 10$ В.

Начертить:

Принципиальную электрическую схему со спецификацией входящих в нее элементов. Схема должна включать источники стабилизированного питания для операционных усилителей, измерительную схему с усилителем, устройство сигнализации с индикатором («больше», «норма», «меньше»).

Габаритные размеры преобразователя приведены на [рис. 1.2](#).

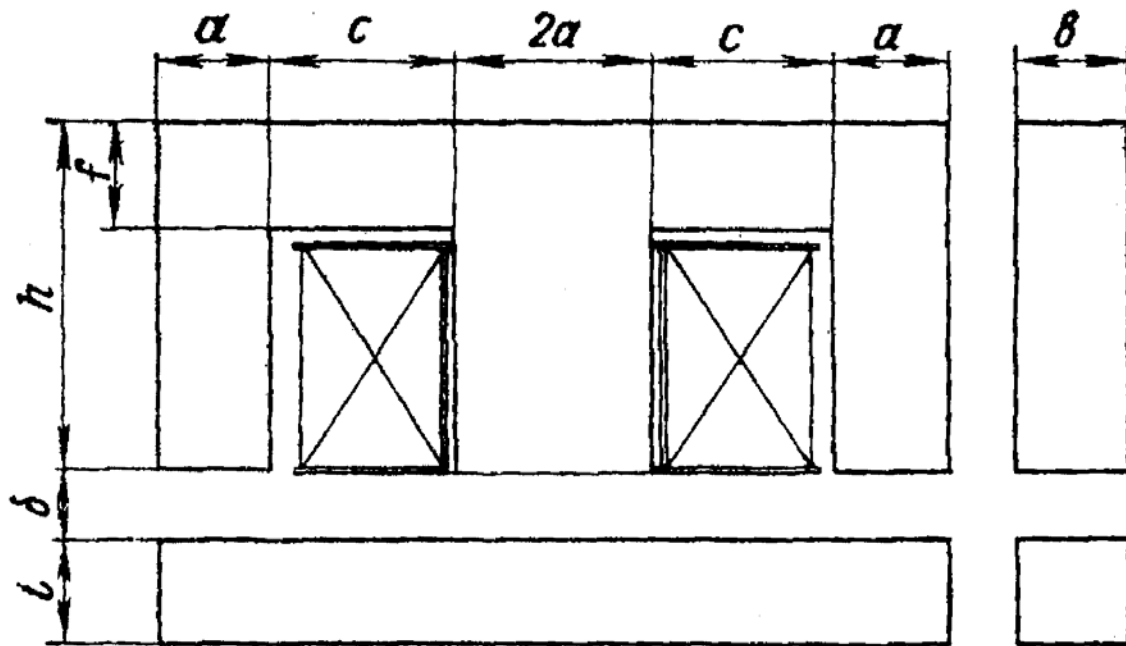


Рис. 1.2. Габаритные размеры индуктивного преобразователя

Данные для расчета выбрать из табл. 1.1. Номер варианта определяется по номеру зачетной книжки.

Таблица 1.1

Исходные данные

Последняя цифра шифра	Диапазон измерения $\Delta\delta$	$a = f = t = b$	Предпоследняя цифра шифра	c	h
	мм	мм		мм	мм
1	2	3	4	5	6
0	0,1	4,0	0	16	20
1	0,2	4,5	1	17	21
2	0,3	5,0	2	18	22
3	0,4	5,5	3	19	23
4	0,5	6,0	4	20	24
5	0,6	6,0	5	20	24
6	0,7	5,5	6	19	23
7	0,8	5,0	7	18	22
8	0,9	4,5	8	17	21
9	1,0	4,0	9	16	20

Примечание. Последняя и предпоследняя цифры шифра принимаются по последней и предпоследней цифрам зачетной книжки студента соответственно. Например, номер зачетной книжки 236538. Таким образом, для данного варианта необходимо рассчитать преобразователь со следующими исходными данными:

- диапазон измерения $\Delta\delta = 0,9$ мм;
- $a = f = t = b = 4,5$ мм;
- $c = 19$ мм;
- $h = 23$ мм.

Расчет индуктивного преобразователя с Ш-образным сердечником и плоским якорем

1. Исходя из габаритных размеров индуктивного преобразователя по известной площади окна магнитопровода с учетом каркаса определяем число витков катушки W :

$$W = \frac{4f_o Q}{\pi d^2},$$

где d – диаметр провода катушки преобразователя; рекомендуется катушку наматывать проводом высокого качества (марок ПЭЛШО, ПЭВ-2 и др.). В **табл. 1.2** приведены данные этих проводов; f_o – коэффициент заполнения: для провода марки ПЭВ-2 $f_o = 0,55$, для провода марки ПЭЛШО $f_o = 0,50$; Q – площадь, занимаемая обмоткой катушки; толщина стенок каркаса 1,0...1,5 мм; зазор между поверхностью катушки и сердечником 2,0...3,0 мм.

Тогда,

$$Q = [c - (1...1,5) - (2...3)] \cdot [h - f - 2 \cdot (1...1,5)].$$

Таблица 1.2

Сортимент эмалированных проводов

q	мм ²	0,00283	0,00385	0,00502	0,00687	0,00785	0,00950	0,0113	0,0132	0,0158
d , мм	ПЭВ-2	0,09	0,10	0,11	0,12	0,13	0,14	0,13	0,16	0,17
	ПЭЛШО	0,13	0,14	0,15	0,16	0,175	0,185	0,195	0,205	0,215

2. По заданному диапазону измерения $\Delta\delta$ выбираем начальный зазор δ_0 из условия

$$\frac{\Delta\delta}{\delta_0} = 0,15 \dots 0,2.$$

3. Для уменьшения влияния изменения характеристик магнитного материала на параметры катушек; индукцию B в магнитопроводе выбираем из условия $B = 0,2 \dots 0,6$ Т. При такой индукции магнитная проницаемость сталей Э12, Э21, Э31, Э4Л максимальна, что обеспечивает высокую стабильность характеристик.

4. Определяем магнитное сопротивление магнитопровода $R_{m\Sigma}$. Для расчета магнитной цепи составляем схему замещения (рис. 1.3). Так как цепь симметрична, условно принимаем, что сопротивление среднего сердечника состоит из двух равных, параллельно включенных магнитных сопротивлений z_{mII} и двух равных сопротивлений воздушных зазоров $R_{\delta II}$. Магнитное сопротивление одной из половин магнитопровода равно сумме сопротивлений воздушных зазоров $R_{\delta I} + R_{\delta IV}$ и магнитных сопротивлений участков цепи $z_{mI} + z_{mIV}$:

$$R'_m = z_{mI} + z_{mII} + z_{mIII} + z_{mIV} + R_{\delta II} + R_{\delta IV}.$$

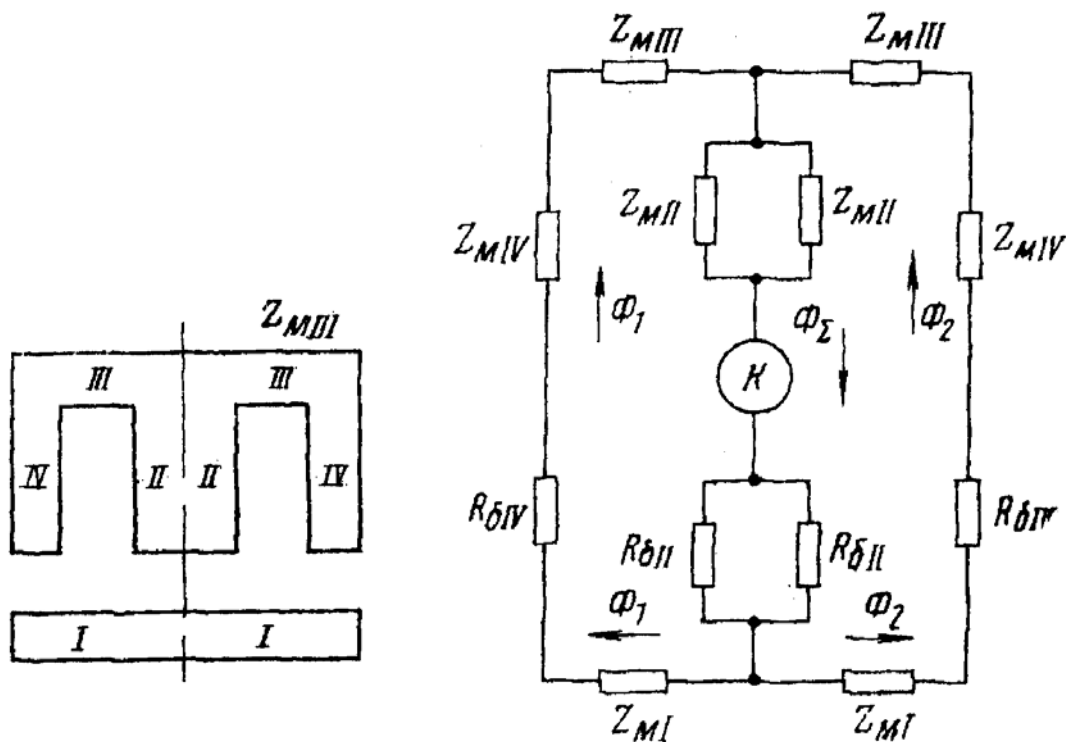


Рис. 1.3. Схема замещения магнитной цепи

Для упрощения расчета из-за малости величины сопротивления сердечников пренебрегаем:

$$R'_{m \Sigma} = R_{\delta II} + R_{\delta IV}. \quad (1.1)$$

Суммарное магнитное сопротивление всей цепи равно

$$R_{m \Sigma} = \frac{R'_{m \Sigma}}{2}. \quad (1.2)$$

Общий магнитный поток

$$\Phi_{\Sigma} = \Phi_1 + \Phi_2.$$

При расчете обычно пользуются не сопротивлением, а величиной проводимости воздушных зазоров. Поскольку магнитное поле в зазоре не является плоскопараллельным, для расчета проводимости применяют метод разбиения поля на простые геометрические фигуры, проводимость которых определяется по известным формулам.

4.1. Разбиваем поле на восемь простых фигур (рис. 1.4).

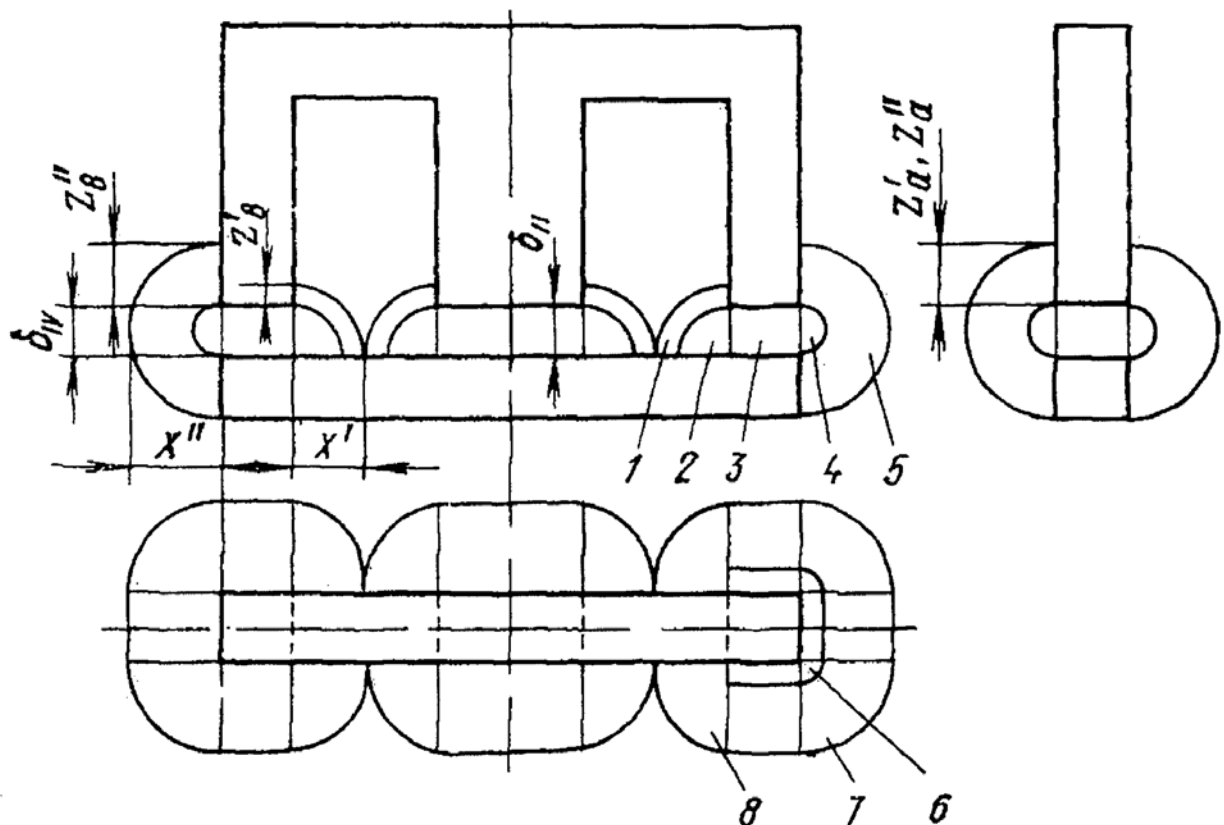


Рис. 1.4. Схема разбиения магнитного поля

Координаты поля выпучивания x' , x'' , z'_a , z''_a , z'_b , z''_b определяем по графику (рис. 1.5).

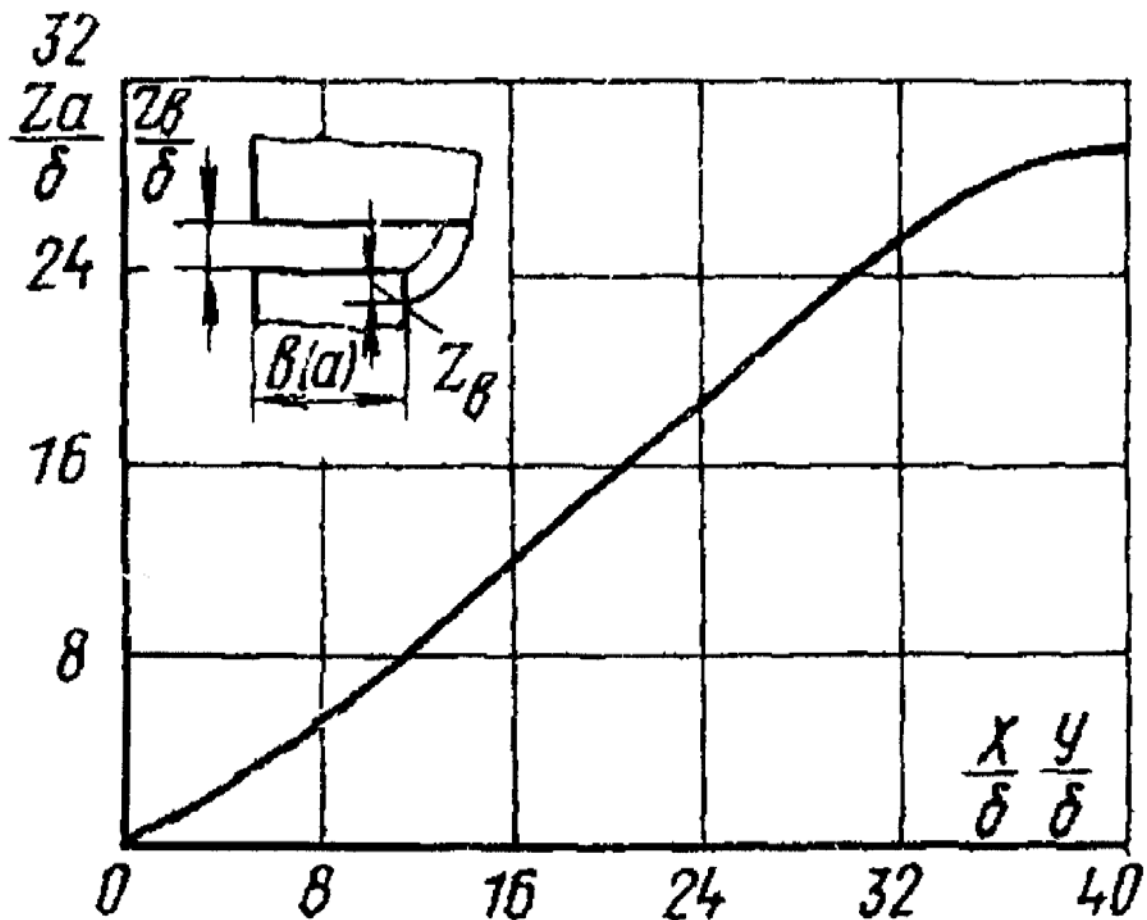


Рис. 1.5. График определения координат магнитного поля

Координату x' принимаем (см. рис. 1.4)

$$x' = \frac{c}{2}.$$

Все величины магнитных проводимостей определяем для максимального воздушного зазора $\delta_{\max} = \delta_0 + \frac{\Delta\delta}{2}$, при котором ток через катушку максимален.

Тогда по величине $\frac{x'}{\delta_{\max}}$ согласно графику (рис. 1.5) определяем вели-

чину $\frac{z'_B}{\delta_{\max}}$, откуда затем определим z'_B .

С достаточной для практики точностью можно принимать

$$z'_B = z''_B = z'''_B = t.$$

Аналогично, по известному значению $\frac{z''_B}{\delta_{\max}}$ по графику (рис. 1.5) определяем величину $\frac{x''}{\delta_{\max}}$, откуда затем определим x'' .

4.2. Определяем проводимости отдельных фигур, показанных на рис. 1.4, в соответствии с выражениями табл. 1.3. Магнитную проводимость воздушных зазоров определяем как сумму их составляющих.

Для зазора δ_{IV}

$$G_{\delta_{IV}} = 3 G_1 + 3 G_2 + 2 G_3 + 2 G_4 + G_5 + G_7 + 4 (G_3 + G_4).$$

Магнитное сопротивление зазора δ_{IV}

$$R_{\delta_{IV}} = \frac{1}{G_{\delta_{IV}}}.$$

Для зазора δ_{II}

$$G_{\delta_{II}} = 2G_1 + 2 G_2 + G_5 + G_6 + G_7 + 4 (G_3 + G_4).$$

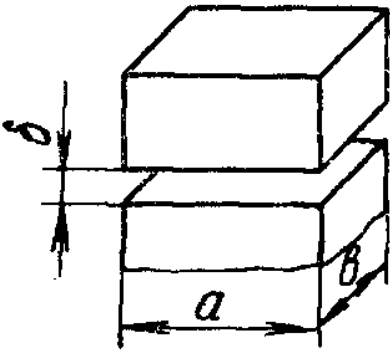
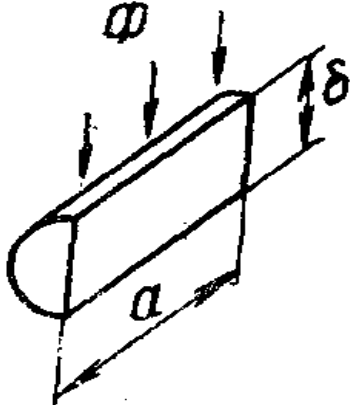
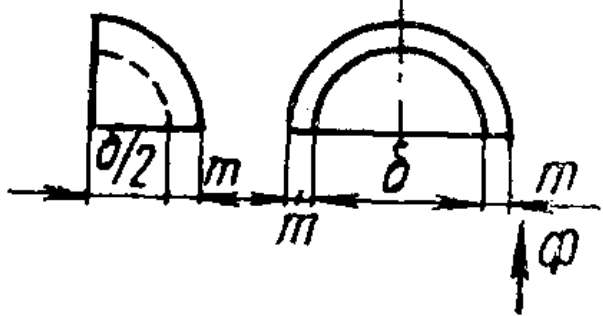
Магнитное сопротивление зазора

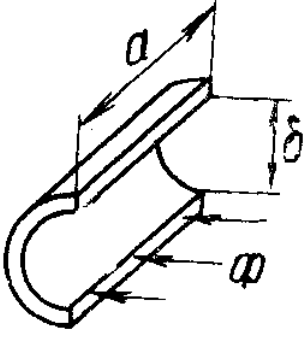
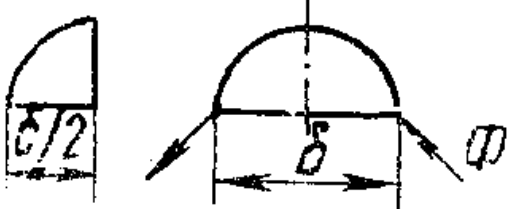
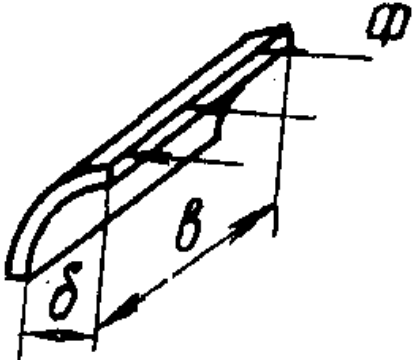
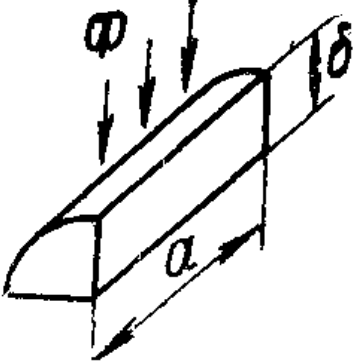
$$R_{\delta_{II}} = \frac{1}{G_{\delta_{II}}}.$$

Суммарное магнитное сопротивление одной половины магнитной цепи преобразователя определяем по формуле (1.1). Суммарное магнитное сопротивление всей цепи определяем из выражения (1.2).

Таблица 1.3

Основные формулы магнитного поля и аналитическое выражение их магнитных проводимостей

№ п/п	Эскиз объемной фигуры магнитного поля	Формула магнитной проводимости
1	<p style="text-align: center;">2</p>  <p style="text-align: center;">Прямоугольный параллелепипед</p>	<p style="text-align: center;">3</p> $G_3 = \mu_0 \frac{a b}{\delta},$ <p>где $\mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-6} \text{ Г/м}$</p>
2	 <p style="text-align: center;">Полуцилиндр</p>	$G_4 = 0,26 \mu_0 a$
3	 <p style="text-align: center;">Квадрант сферической оболочки</p>	$G_7 = \mu_0 \frac{m_1}{4},$ $\text{где } m_1 = \frac{z'_B + \left(x'' - \frac{\delta}{2}\right)}{2}$

№ п/п	Эскиз объемной фигуры магнитного поля	Формула магнитной проводимости
1	2	3
4	 <p data-bbox="443 779 826 815">Половина полого цилиндра</p>	$G_5 = \mu_0 \frac{2a}{\pi \left(\frac{\delta}{m_1} + 1 \right)},$ <p data-bbox="1034 674 1385 815">где $m_1 = \frac{z'_B + \left(x'' - \frac{\delta}{2} \right)}{2}$</p>
5	 <p data-bbox="475 1081 794 1117">Сферический квадрант</p>	$G_6 = 0,077 \mu_0 \delta$
6	 <p data-bbox="435 1532 834 1568">Четверть полого цилиндра</p>	$G_1 = \mu_0 \frac{2b}{\pi \left(\frac{\delta}{m_2} + 0,5 \right)},$ <p data-bbox="1007 1413 1414 1514">где $m_2 = \frac{z'_B + (x' - \delta_{\max})}{2}$</p>
7	 <p data-bbox="499 1957 770 1993">Четверть цилиндра</p>	$G_2 = 0,52 \mu_0 a$

5. Зная $R_{m \Sigma}$, определяем электрическое сопротивление катушки z_3 :

$$z_3 = R_a + \omega \cdot \frac{W^2}{R_{m \Sigma}},$$

где R_a – активное сопротивление катушки, Ом; $\omega = 2\pi f$ – круговая частота, где f – частота, Гц, для **курсового проекта** принять $f = 50$ Гц.

$$R_a = \rho \frac{l_{cp}}{q} W,$$

где ρ – удельное сопротивление медной проволоки, $\rho = 0,0175$ Ом · мм²/м; l_{cp} – средняя длина витка, м (**рис. 1.6**), $l_{cp} = 4a + 2b + 2\pi r$; q – поперечное сечение голого провода, мм², выбираем по **табл. 1.2** для принятого диаметра провода.

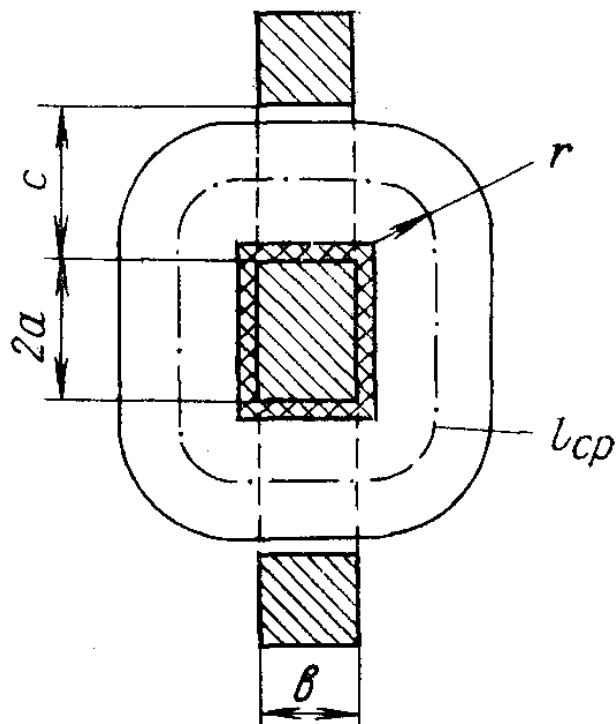


Рис. 1.6. Сечение индуктивного преобразователя

Модуль электрического сопротивления определяем из выражения

$$z_3 = \sqrt{\left(R_a + \frac{\omega W^2}{R_{m\Sigma}} \right)^2}.$$

6. Определяем эффективное значение тока через катушку, необходимого для создания выбранной магнитной индукции В:

$$I = \frac{\Phi_\Sigma R_{m\Sigma}}{W\sqrt{2}},$$

где Φ_Σ – магнитный поток в сердечнике, $\Phi_\Sigma = B \cdot S$, Т · м²; S – площадь сечения среднего сердечника, м².

7. Проверяем катушку на допустимую плотность тока. Рекомендуется плотность тока

$$j = \frac{l}{q} \leq 2 \dots 2,5 \text{ А/мм}^2.$$

8. Определяем напряжение питания катушки:

$$U = I z_3, \text{ В.}$$

9. Определяем чувствительность преобразователя. Для этого необходимо определить сопротивление магнитной цепи $R'_{m\Sigma}$ и электрическое сопротивление катушки z'_3 при наименьшем зазоре δ_{\min} :

$$\delta_{\min} = \delta_o - \frac{\Delta\delta}{2}.$$

Аналогично п. 4.1 находим z'_B и x'' для δ_{\min} . Далее выполняем расчеты по п.п. 4.2, 5.6, в результате которых получаем новые значения $R^*_{m\Sigma}$, z^*_3 , I^* . Таким образом, при изменении зазора на величину $\Delta\delta$ сопротивление катушки изменилось на величину

$$\Delta z_3 = z^*_3 - z_3.$$

Считая, что чувствительность во всем диапазоне измерения постоянна, получаем

$$K = \frac{\Delta z_3}{2 \Delta \delta}.$$

10. Определяем измерительное усилие преобразователя исходя из величины максимальной электромеханической силы притяжения F_{Σ} якоря к сердечнику. У дифференциального преобразователя на якорь действует разность сил, направленная в сторону меньшего зазора:

$$F_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n F_{\delta_{\min i}} - \sum_{i=1}^n F_{\delta_{\max i}},$$

где $F_{\delta i} = \frac{1}{2} \cdot (I W)^2 \frac{G_{\delta i}}{\delta_i}$; $G_{\delta i}$, δ_i – проводимость и величина зазора у полюса.

Для дифференциального преобразователя

$$F_2 = \left[\frac{1}{2} (I' W)^2 \frac{G_{IV}}{\delta_{\min}} \cdot 2 + \frac{1}{2} (I' W)^2 \frac{G_{II}}{\delta_{\min}} \cdot 2 \right] -$$

$$- \left[\frac{1}{2} (I W)^2 \frac{G_{IV}}{\delta_{\max}} \cdot 2 + \frac{1}{2} (I W)^2 \frac{G_{II}}{\delta_{\max}} \cdot 2 \right].$$

11. Измерительное усилие $F_{\text{изм}}$, создаваемое пружиной, должно быть больше электромеханической силы притяжения:

$$F_{\text{изм}} \geq (5 \dots 10) F_{\Sigma}.$$

12. Рассчитываем схему включения преобразователя, которая представлена на [рис. 1.7](#).

Величина выходного напряжения $U_{\text{вых}} = U_{\text{вх}}$ зависит от величины притяжения электрического сопротивления при перемещении якоря относительно неподвижных сердечников. В начальном положении сопротивление $z_1 = z_2 = z_0$:

$$z_0 = \frac{z'_3 - z_3}{2}.$$

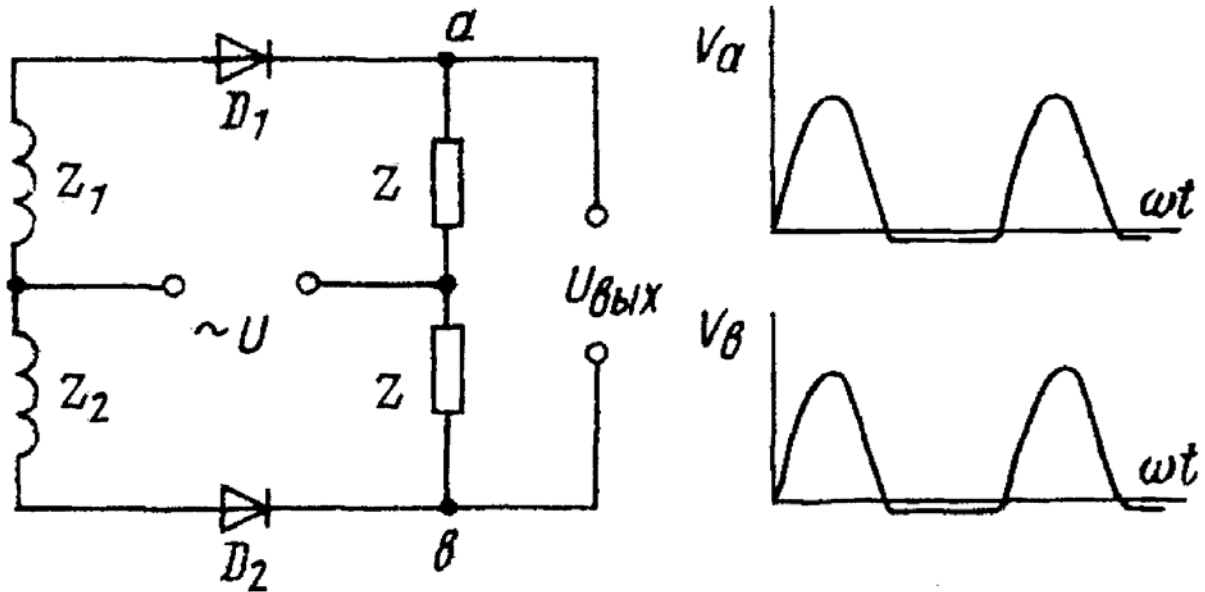


Рис. 1.7. Схема включения дифференциального индуктивного преобразователя

При смещении якоря относительно нейтрального положения зазор относительно одного неподвижного сердечника станет равным δ_{\max} , в то же время как относительно другого – δ_{\min} :

$$z_1 = z_0 - \Delta z \text{ при } \delta = \delta_{\max};$$

$$z_2 = z_0 + \Delta z \text{ при } \delta = \delta_{\min}.$$

Определяем величину выходного напряжения.

При положительной полуволне питающего напряжения усредненное за период напряжение в точке a равно

$$\bar{U}_a^+ = \frac{\sqrt{2} U_a^+}{2\pi} \int \sin \omega t d\omega t = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_a^+ = 0,45 U_a^+. \quad (1.3)$$

Выражая U_a через напряжение питания и сопротивления элементов схемы, получаем

$$\bar{U}_a^+ = U \frac{z_0}{z_0 + r_{np} + z_1}; \quad (1.4)$$

$$\bar{U}_b^+ = U \frac{z_0}{z_0 + r_{np} + z_2}.$$

Подставляя выражение (1.3) в формулу (1.4) получаем

$$\bar{U}_a^+ = 0,45 U \frac{z_o}{z_1 + z_o + r_{пр}} ;$$

$$\bar{U}_b^+ = 0,45 U \frac{z_o}{z_1 + z_o + r_{пр}} .$$

Напряжение между точками a и b равно

$$\begin{aligned} \bar{U}_{ab}^+ &= 0,45 U z_o \frac{z_o + \Delta z + z_o + r_{пр} - z_o + \Delta z - z_o - r_{пр}}{(z_1 + r_{пр} + z_o)(z_2 + r_{пр} + z_o)} = \\ &= 0,45 U z_o \frac{\Delta z}{(z_o + z_o + r_{пр})^2} , \end{aligned}$$

где $r_{пр}$ – сопротивление диода в прямом направлении.

При отрицательной полярности ток через нагрузку пойдет в противоположную сторону, но через большое обратное сопротивление диода $r_{обр}$. Поэтому результирующее выходное напряжение равно

$$U_{вых} = \bar{U}_{ab}^+ - \bar{U}_{ab}^- = 0,9 U \left[\frac{z_o \Delta z_o}{(2z_o + r_{пр})^2} - \frac{z_o \Delta z_o}{(2z_o + r_{обр})^2} \right] .$$

Значения сопротивлений определяются из **табл. 1.4** для выбранного диода.

Таблица 1.4

Основные параметры некоторых выпрямительных диодов

№ п/п	Тип диода	$I_{пр. ср макс},$ мА	$U_{обр. макс},$ В	$U_{пр},$ В	$I_{обр. ср при}$ $U_{обр. макс},$ мА
1	2	3	4	5	6
1	Д9Г – Д9М	30	30	1	250...60
2	Д7А – Д7Ж	300	50...400	0,5	100
3	Д206 – Д211	100	100...600	1	50
4	Д226 – Д226Е	300	400	1	50
5	Д223	50	50	1	1

13. Определяем общий коэффициент усиления схемы для получения стандартного сигнала ГСП, равного $U = \pm 10$ В:

$$K = \frac{10}{U_{\text{ВЫХ}}}.$$

14. Поскольку в схеме **рис. 1.1** применено два усилителя, то разбиваем общий коэффициент усиления:

$$K = k_1 k_2$$

и при равенстве

$$k_1 = k_2 = \sqrt{K}.$$

15. Производим расчет усилителей.

В настоящее время при построении разнообразных схем находят широкое применение операционные усилители. Операционный усилитель – это усилитель постоянного тока с дифференциальным входом, обладающий большим коэффициентом усиления (порядка нескольких тысяч или десятков тысяч) и высоким входным и низким выходным сопротивлением, на основе которого, вводя в него разнообразные обратные связи, можно выполнять устройства, реализующие различные функции преобразования входного сигнала.

На **рис. 1.8** представлены некоторые схемы операционных усилителей с резистивными обратными связями, нашедшие применение в схеме **рис. 1.1**.

Предполагая, что коэффициент усиления и входное сопротивление весьма велики, для приближенного расчета передаточной функции операционного усилителя используем два условия: напряжения на инвертирующем и неинвертирующем входах усилителя (относительно земли) одинаковы и сумма токов, приходящих к каждому из входов усилителя, равна нулю.

На **рис. 1.8 а** показана схема инвертирующего усилителя с параллельной отрицательной обратной связью.

Из этих условий следуют равенства $U_{\delta} = 0$; $I_1 = I_0$.

Так как $I_1 = I_2$, получаем $\frac{U_{\text{ВХ}}}{R_1} = -\frac{U_{\text{ВЫХ}}}{R_2}$.

Отсюда $k_v = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = -\frac{R_2}{R_1}$.

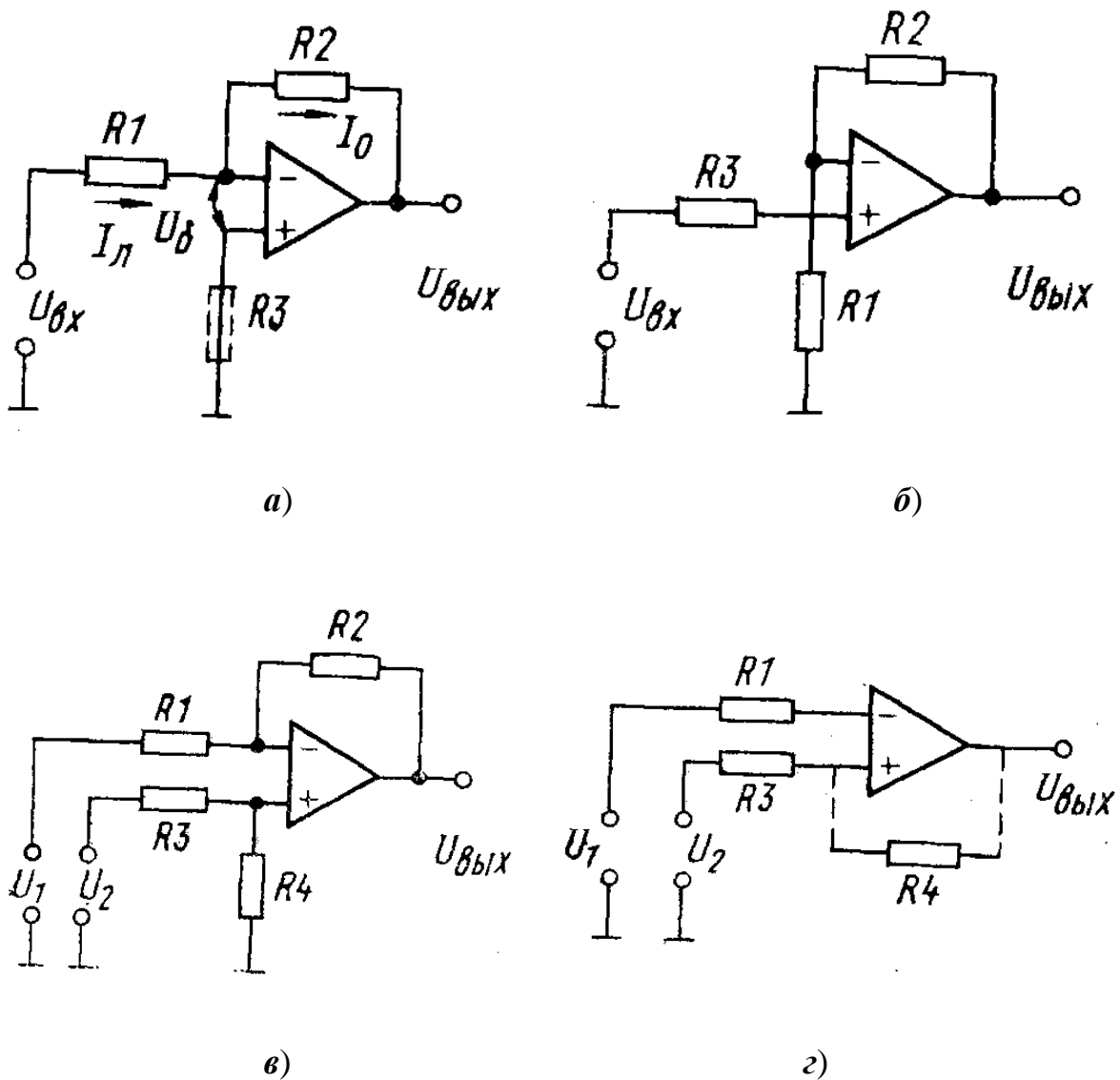


Рис. 1.8. Схемы с применением операционных усилителей:

- а* – инвертирующего усилителя с параллельной отрицательной обратной связью;
- б* – неинвертирующего усилителя с последовательной обратной связью;
- в* – инвертирующий и неинвертирующий входы операционного усилителя с обратной связью; *г* – компаратора

Резистор R_3 введен в схему усилителя с целью скомпенсировать падение напряжения на резисторах R_1 и R_2 от входного тока усилителя:

$$R_3 = \frac{R_1 + R_2}{R_1 + R_2}.$$

При этом входные токи обоих входов равны и вызванные этими токами изменения выходного напряжения тоже будут одинаковы и скомпенсируют друг друга.

Схема, показанная на **рис. 1.8 б**, предназначена для построения неинвертирующего усилителя с последовательной обратной связью. Напряжение на выходе усилителя можно найти, приравняв потенциалы его входов:

$$U_{\text{вх}} = U_{\text{вых}} \frac{R_1}{R_1 + R_2},$$

отсюда получаем

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{вх}} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right).$$

Если подать сигналы одновременно и на инвертирующий и на неинвертирующий входы операционного усилителя с обратной связью так, как показано на **рис. 1.8 в**, то получим для случая, когда $U_2 = 0$,

$$U_{\text{вых}} = -U_1 \cdot \frac{R_2}{R_1};$$

для случая, когда $U_1 = 0$.

$$U_{\text{вых}} = U_2 \cdot \frac{R_2 + R_1}{R_1} \frac{R_4}{R_3 + R_4}.$$

Если $U_1 \neq 0$ и $U_2 \neq 0$, то выходное напряжение равно

$$U_{\text{вых}} = -U_1 \cdot \frac{R_2}{R_1} + U_2 \frac{R_4}{R_1} \left(\frac{R_1 + R_2}{R_3 + R_4} \right).$$

При $R_1 = R_3$ и $R_2 = R_4$ выходное напряжение пропорционально разности напряжений U_1 и U_2 и равно

$$U_{\text{вых}} = -\frac{R_2}{R_1} U_1 + U_2.$$

На **рис. 1.8 з** приведена схема компаратора. Один из его входов соединен с источником опорного напряжения. Схему применяют для сравнения входного сигнала и опорного напряжения, совпадающих по знаку (полярности). Для изменения полярности выходного сигнала входы усилителя меняют местами. Ширина зоны переключения не превышает 1 мВ. Для уменьшения влияния помех и формирования амплитудной характеристики с гистерезисом (типа триггера Шмидта) применяют положительную об-

ратную связь (показана пунктиром).

При увеличении напряжения U_1 триггер срабатывает (напряжение на выходе меняется с $U_{\text{ВЫХ}}^-$ на $U_{\text{ВЫХ}}^+$) тогда, когда изменяется полярность между входами усилителя, что соответствует входному напряжению

$$U_1 = \frac{U_2 R_4 - U_{\text{ВЫХ}}^- R_2}{R_3 + R_4}.$$

При уменьшении напряжения U_1 срабатывание в обратную сторону будет наблюдаться при

$$U_1 = \frac{U_2 R_4 + U_{\text{ВЫХ}}^+ R_2}{R_3 + R_4},$$

где $U_{\text{ВЫХ}}^+$ и $U_{\text{ВЫХ}}^-$ – величины положительного и отрицательного напряжения на выходе усилителя при его работе в режиме ограничения.

2. Расчет измерительных схем автоматического моста и потенциометра

Одним из основных элементов автоматических приборов является измерительная схема, построенная по компенсационному методу измерения. Наиболее широкое применение для измерения как электрических, так и неэлектрических величин находят потенциометрические измерительные схемы и уравновешенные мостовые с реохордными уравновешивающими устройствами.

В задаче необходимо:

1. Рассчитать измерительные схемы автоматического моста и автоматического потенциометра.
2. Дать описание конструкции прибора, принципа действия, принципиальной электрической схемы, методики присоединения преобразователей температуры.

Данные для расчета выбрать из **табл. 2.1**. Номер варианта определяется по последней и предпоследней цифре шифра.

Исходные данные

Последняя цифра шифра	Диапазон измерения t , °С	Предпоследняя цифра шифра	Градуировка		Тип прибора
			термометр сопротивления	термопара	
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
0	0...100	0	20; 23	ХК	КСМ1
1	0...150	1	21; 24	ПП-1	КСМ2
2	0...200	2	22; 23	ХА	КСМ3
3	0...250	3	20; 24	ХК	КСМ4
4	0...300	4	21; 23	ПП-1	КСП1
5	0...350	5	22; 24	ХА	КСП2
6	0...400	6	20; 23	ХК	КСП3
7	0...450	7	21; 24	ПП-1	КСП4
8	0...500	8	22; 24	ХА	КСМ4
9	0...600	9	20; 24	ХК	КСП2

Примечание. Последняя и предпоследняя цифры шифра принимаются по последней и предпоследней цифрам зачетной книжки студента соответственно. Например, номер зачетной книжки 236538. Таким образом, для данного варианта необходимо рассчитать измерительную схему автоматического моста и потенциометра по следующим исходными данными:

- диапазон измерения $t = 0...500$ °С;
- градуировка термометра сопротивления 20; 24;
- градуировка термопары ХК;
- тип прибора – КСМ4.

Таким образом, студент должен рассчитать потенциметрическую и мостовую схемы для диапазона температур $0...500$ °С с градуировкой термопары хромель копель, термометросопротивления 24-й градуировки, тип прибора КСМ4.

2.1. Мостовая измерительная схема

Автоматические уравновешенные мосты предназначены для измерения, записи и регулирования различных электрических и неэлектрических величин, функционально выраженных активным сопротивлением. Автоматические уравновешенные мосты, предназначенные для измерения и записи температуры, работают в комплекте с электрическими термометрами сопротивления, которые монтируются в месте замера температуры.

На рис. 2.1 приведена измерительная трехпроводная схема автоматического показывающего и самопишущего прибора КСМ4.

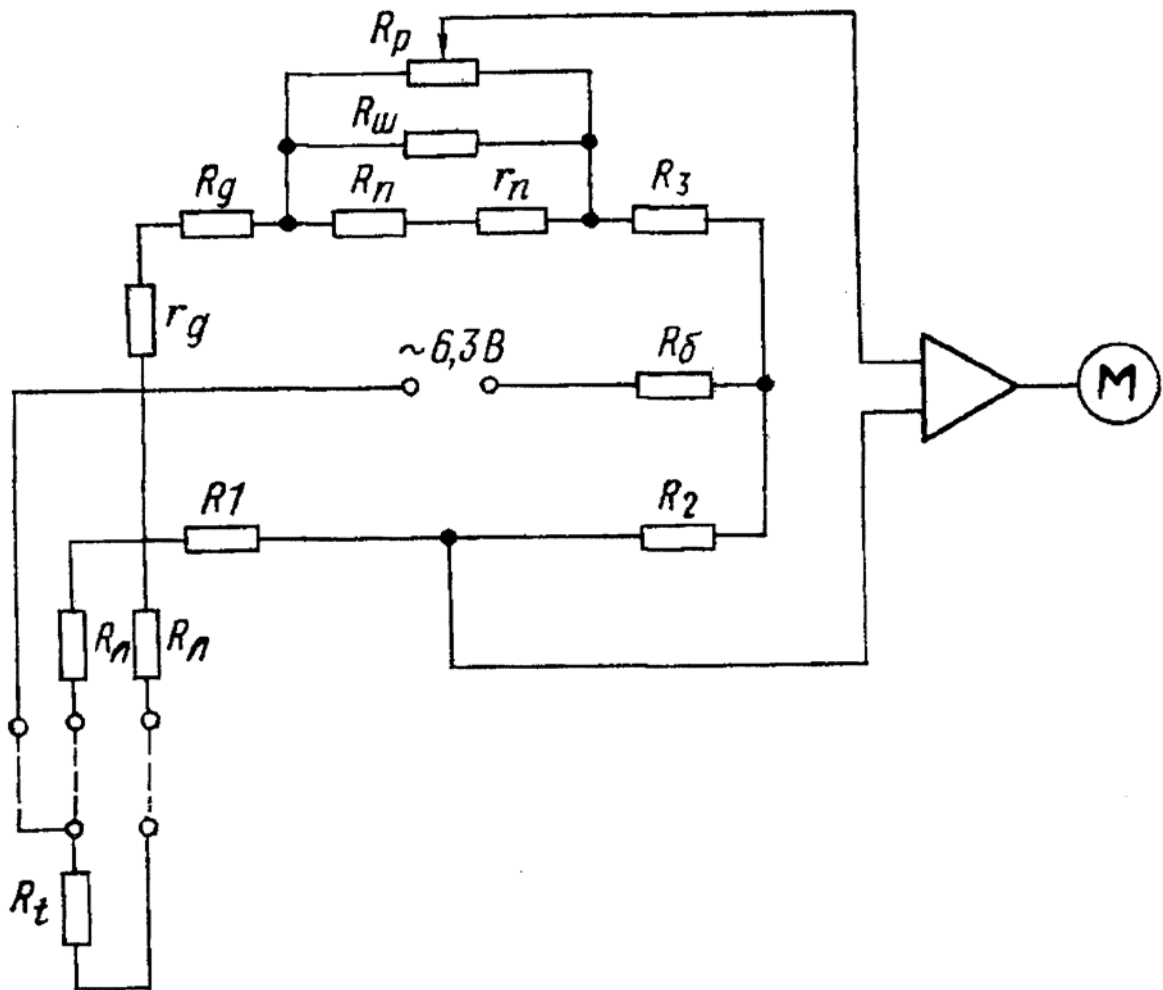


Рис. 2.1. Измерительная трехпроводная схема автоматического моста КСМ4

Аналогичную схему имеют приборы КСМ1 и КСМ2. Измерительная схема состоит из резисторов, имеющих следующие назначения:

R_p – реохорд, спираль реохорда выполнена из вольфрамо-палладиевой проволоки, а движок – из золото-серебро-медного сплава;

$R_{ш}$ – резистор шунта, служит для подгонки эквивалентного сопротивления реохорда до стандартного значения:

$$R_{э\text{кв}} = \frac{R_p R_{ш}}{R_p + R_{ш}} = 90,100,300 \text{ Ом.}$$

R_n – резистор для задания предела измерения;

R_d – резистор для задания начала шкалы, $R_d = 5 \dots 10 \text{ Ом}$;

r_n, r_d – подгоночные резисторы в виде спиралей;

R_1, R_2, R_3 – резисторы плеч моста, обычно для обеспечения максимальной чувствительности R_2 выбирают равным R_3 (равноплечий мост);

R_6 – резистор в цепи питания, служит для ограничения тока через термометр сопротивления (саморазогревание термометра сопротивлением протекающим током не должно превышать $0,2$ °С);

$R_{\text{л}}$ – резистор для подгонки сопротивления линии, $R_{\text{л}} = 2,5$ Ом;

R_t – термометр сопротивления.

К одной диагонали измерительного моста подводится питание $6,3$ В, а напряжение с другой диагонали подается на вход усилителя. При сопротивлении термометра сопротивлением и на выходе усилителя возникает напряжение разбаланса переменного тока, которое после усиления приводит в действие реверсивный двигатель M . Выходной вал реверсивного двигателя вращается в ту или иную сторону в зависимости от фазы напряжения разбаланса до тех пор, пока существует напряжение разбаланса. Вращение выходного вала реверсивного двигателя с помощью механической передачи преобразуется в прямолинейное движение каретки, на которой закреплены контакты реохорда R_p , указатель и записывающее устройство. В момент равновесия измерительной схемы положение указателя определяет значение измерителей температуры, которое также записывается на движущейся диаграммной ленте.

Расчет уравновешенной мостовой измерительной схемы

1. В соответствии с пределами измерения рассчитываем сопротивление термометров $R_{t \text{ max}}$ и $R_{t \text{ min}}$. Для медных термометров сопротивления (ТСМ)

$$R_t = R_0 [1 + \alpha (t - t_0)],$$

где $R_t; R_0$ – сопротивления электрического термометра при измеряемой и начальной температуре; α – температурный коэффициент сопротивления материала, $\alpha = 4,25 \cdot 10^{-3}$, $1/^\circ\text{C}$; $t - t_0$ – изменение температуры, $t_0 = 0$ °С.

Для платиновых термометров сопротивления (ТСП)

$$R_t = R_0 (1 + A t + B t^2) \text{ при } t > 0 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$R_t = R_0 [(1 + A t + B t^2 + C t^3 (t - 100))] \text{ при } t < 0 \text{ } ^\circ\text{C},$$

где $A = 3,96847 \cdot 10^{-3} / ^\circ\text{C}$; $B = 5,847 \cdot 10^{-7} / ^\circ\text{C}^2$; $C = -4,22 \cdot 10^{-12} / ^\circ\text{C}^4$.

2. Вычисляем R_3 при условии: ток через реохордное устройство I_{R_t} при изменении сопротивления термометра от $R_{t \text{ min}}$ до $R_{t \text{ max}}$ менялся не более чем на $10...20$ %, т. е.

$$R_3 + R_{t \min} = \eta_0 (R_3 + R_{t \max}),$$

где $\eta_0 = 0,8 \dots 0,9$,
тогда

$$R_3 = \frac{R_{t \max} \eta_0 - R_{t \min}}{1 - \eta_0}.$$

Принимаем $R_2 = R_3$.

3. Определяем величину резистора $R_{\text{п}}$.

При положении движка реохорда в крайнем правом положении, когда $R_t = R_{t \min}$, условие равновесия мостовой схемы имеет вид

$$(R_{t \min} + R_{\text{л}} + R_{\text{д}} + R_{\text{пр}}) R_2 = (R_1 + R_{\text{л}}) R_3. \quad (2.1)$$

При другом крайнем положении движка реохорда, когда $R_t = R_{t \max}$, условие равновесия имеет вид

$$(R_{t \max} + R_{\text{л}} + R_{\text{д}}) R_2 = (R_2 + R_{\text{пр}}) (R_1 + R_{\text{л}}). \quad (2.2)$$

Вычитая из выражения (2.1) уравнение (2.2), получаем

$$R_{\text{пр}} = \frac{R_2 (R_{t \max} - R_{t \min})}{R_1 + R_2 + R_3}, \quad (2.3)$$

где $R_{\text{пр}}$ – приведенное сопротивление реохорда,

$$R_{\text{пр}} = \frac{R_0 R_{\text{экр}}}{R_{\text{п}} - R_{\text{экр}}}.$$

Для учета небольших нерабочих участков на краях реохорда вводим коэффициент запаса $\lambda = 1,064$, который увеличивает $R_{\text{пр}}$ на 6,4 % – по 3,2 % с каждой стороны реохорда:

$$R'_{\text{пр}} = R_{\text{пр}} \lambda.$$

После преобразования получаем

$$R_0 = \frac{R'_{\text{пр}} R_{\text{экр}}}{R_{\text{экр}} - R'_{\text{пр}}}$$

4. Определяем величину резистора R_1 . Для этого подставляем выражение (2.3) в уравнение (2.1):

$$R_2 \left[R_{t \min} + R_{\text{л}} + R_{\text{д}} + \frac{(R_{t \max} - R_{t \min})}{R_1 + R_2 + R_{\text{л}}} \right] \cdot R_2 = (R_1 + R_{\text{л}})R_3.$$

Так как $R_2 = R_3$, уравнение имеет вид

$$R_{t \min} + R_{\text{л}} + R_{\text{д}} + \frac{R_2 R_{t \max} - R_2 R_{t \min}}{R_1 + R_2 + R_{\text{л}}} = R_1 + R_{\text{л}}.$$

После преобразований получаем

$$R_1^2 + R_1(R_2 + R_{\text{л}} - R_{t \min} - R_{\text{л}}) - R_{\text{д}}R_{\text{л}} - R_{t \max}R_2 - R_{\text{д}}R_{\text{л}} = 0. \quad (2.4)$$

Решая уравнение (2.4) относительно R_1 аналогично решению обычного квадратного уравнения, получаем

$$R_1 = -\frac{1}{2}(R_2 - R_{t \min} + R_{\text{л}} - R_{\text{д}}) \pm \frac{1}{2} \sqrt{(R_2 - R_{t \min} + R_{\text{л}} - R_{\text{д}})^2 + 4(R_{\text{д}}R_2 + R_{t \min}R_{\text{л}} + R_{t \max}R_2 + R_{\text{д}}R_{\text{л}})}.$$

5. Рассчитываем балластное сопротивление R_6 из условия, чтобы максимальный ток I_{\max} , проходящий через термометр сопротивления, не превышал 7 мА. При расчете считаем, что через R_6 протекает примерно удвоенный ток верхней половины моста:

$$2 I_{\max} R_6 + I_{\max} (R_{1 \min} + R_{\text{д}} + R_{\text{л}} + R_3 + R'_{\text{пр}}) = V,$$

откуда

$$R_6 = \frac{U - I_{\max} (R_{t \min} + R_{\text{д}} + R_{\text{л}} + R'_{\text{пр}})}{2 I_{\max}},$$

где $V = 6,3 \text{ В}$ – напряжение питания моста.

2.2. Потенциометрическая измерительная схема

Автоматические потенциометры предназначены для измерения и записи температуры и других величин, изменения значений которых могут быть преобразованы в изменения напряжения постоянного тока. Наиболее часто автоматические потенциометры работают в комплекте с термоэлектрическими термометрами или радиационными пирометрами. В автоматических потенциометрах измерение производится методом компенсации путем сравнения неизвестной термоэлектродвижущей силы (ТЭДС), создаваемой термоэлектрическим термометром, с падением напряжения на калиброванном реохорде. На рис. 2.2 приведена измерительная схема автоматического потенциометра КСП4, являющаяся типовой для измерения ЭДС или напряжений.

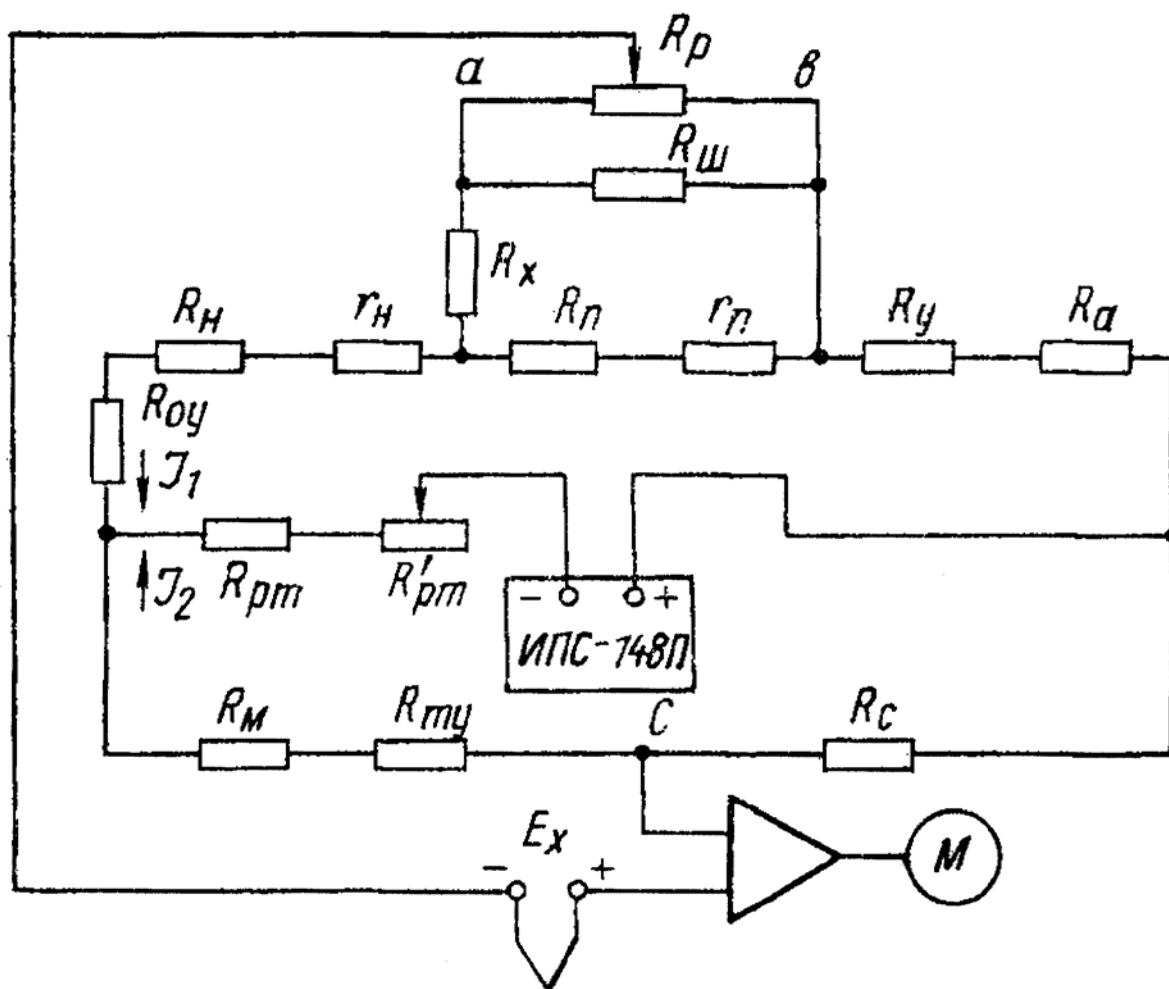


Рис. 2.2. Измерительная схема автоматического потенциометра

Схема состоит из резисторов, имеющих следующее назначение:

R_p – реохорд;

$R_{ш}$ – резистор шунта;

R_{Π} — резистор для задания предела измерения;
 $R_{Н}$ — резистор для задания начала шкалы прибора;
 $r_{Н}; r_{\Pi}$ — подгоночные резисторы;
 $R_{М}$ — вспомогательный резистор, выполненный из меди, для потенциометров с компенсацией **ТЭДС** свободных концов и из манганина для потенциометров и миллиамперметров без компенсации. Располагается вблизи зажимов термоэлектрического термометра, поэтому температура резистора равна температуре свободных концов;
 $R_{рм}; R'_{рм}$ — резисторы для ограничения и регулировки рабочего тока источника питания;
 $R_{а}$ — балластный резистор, служит для ограничения тока в измерительной схеме;
 $R_{с}$ — резистор для контроля рабочего тока;
 $R_{х}; R_{у}; R_{оу}; R_{ту}$ — сопротивления подводящих проводов между элементами измерительной схемы, учитываются при расчете автоматических потенциометров высокой точности, например, класса 0,25.

Термопара или источник измеряемого напряжения постоянного тока включены последовательно с электронным усилителем в одну из диагоналей измерительного моста. В другую диагональ включен источник стабилизированного питания, обеспечивающий постоянство рабочего тока в измерительной схеме.

При изменении сигнала E_x на входе усилителя возникает напряжение разбаланса постоянного тока, которое преобразуется в напряжение переменного тока и усиливается для приведения в действие реверсивного двигателя M . Вал двигателя связан с ползунком реохорда, указателем и пером. Действие компенсационной схемы сводится к автоматическому перемещению ползунка по реохорду в сторону уменьшения напряжения рассогласования (разности **ТЭДС** и падения напряжения на реохорде) до тех пор, пока это напряжение не станет меньше зоны нечувствительности усилителя. Таким образом, положение ползунка и, связанных с ним, указателя и пера прибора однозначно определяет величины **ТЭДС** и, следовательно, величину измеряемой температуры.

Расчет измерительной схемы автоматического потенциометра

1. В соответствии с заданными пределами измеряемой температуры и типом термопары по градуировочным таблицам определяем значение **ТЭДС** термопары, соответствующее верхнему E_{\max} и нижнему E_{\min} значению пределов измерения температуры t_{\max} и t_{\min} . Значение предела измерения E_{Π} определяем как разность, т. е.

$$E_{\Pi} = E_{\max} - E_{\min}.$$

2. Определяем величину R_c из условия равенства падения напряжения от тока I_2 на сопротивлении R_c и ЭДС нормального элемента E_c :

$$R_c I_2 = E_c,$$

E_c принимаем равной 1,019 В.

В этом случае по нормальному элементу можно проверить работу источника стабилизированного питания. Задаваясь током верхней измерительной ветви $I_1 = 3$ мА и нижней вспомогательной $I_2 = 2$ мА, получаем

$$2 \cdot 10^{-3} R_c = 1,019,$$

откуда $R_c = 509,5$ Ом.

3. Величину резистора R_{pm} принимаем равной 750 Ом, переменного резистора R'_{pm} , предназначенного для установки величины рабочего тока в схеме, равной 56 Ом.

Определяем величину резистора предела измерения $R_{п}$ из условия, что падение напряжения на цепи, состоящей из трех параллельно включенных резисторов R_p ; $R_{ш}$ и $R_{п}$, должно быть равно заданному пределу измерения

$$I_1 R_{пp} = E_{\max} - E_{\min},$$

откуда

$$R_{пp} = \frac{E_{п}}{I_1}. \quad (2.5)$$

Задаваясь эквивалентным сопротивлением реохорда $R_{\text{эКВ}} = 90, 100$ и 300 Ом, получаем

$$R_{\text{эКВ}} = \frac{R_p R_{ш}}{R_p + R_{ш}}.$$

С учетом нерабочих участков реохорда $R_{пp}$ определяем выражением

$$R_{пp} = \frac{R_{\text{эКВ}} R_{п}}{(R_{\text{эКВ}} + R_o) \cdot k}, \quad (2.6)$$

где $k = \frac{R_{\lambda_1} + R_{\lambda_2} + R_p}{R_p}$ – коэффициент, учитывающий нерабочие участки реохорда; $R_{\lambda_1} = R_{\lambda_2} = 0,0032 R_p$ – сопротивление нерабочих участков в ли-

нейном реохорде.

Приравнивая правые части уравнений (2.5) и (2.6), получаем

$$\frac{E_{\Pi}}{I_1} = \frac{R_{\text{ЭКВ}} R_{\Pi}}{(R_{\text{ЭКВ}} + R_o) \cdot k},$$

отсюда

$$R_{\Pi} = \frac{E_{\Pi} R_{\text{ЭКВ}}}{\frac{I_1 R_{\text{ЭКВ}}}{k} - E_{\Pi}}.$$

С учетом сопротивления подводящих проводов R_x ; $R_y \approx 0,01 \dots 0,03$ Ом получаем

$$R_{\Pi} = \frac{E_o (R_{\text{ЭКВ}} + R_x + R_y)}{\frac{I_1 R_{\text{ЭКВ}}}{k} - E_{\Pi}}.$$

5. Определяем величину резистора R_{Π} .

При $t = t_{\min}$ движок реохорда должен находиться в точке a , т. е. в начале шкалы прибора, тогда E_{\min} должна компенсироваться U_{ac} в точках $a - c$ измерительной схемы:

$$U_{ac} = R_{\Pi} I_1 - R_M I_2 = E_{\min},$$

отсюда

$$R_{\Pi} = \frac{R_M I_2 + E_{\min}}{I_1} = \frac{R_M I_2}{I_1} + \frac{E_{\min}}{I_1}. \quad (2.7)$$

Формула для определения R_{Π} не учитывает сопротивления соединительных проводов и ЭДС термопары при средней температуре свободных концов, равной 30 °С. С учетом этого, выражение (2.7) принимает вид

$$R_{\Pi} = \frac{I_2 (R_M + R_{my})}{I_1} - R_{oy} + \frac{E_{\min} + E_o - E_{\Pi} \left(\frac{R_{\lambda_1}}{R_p} + \frac{k R_x}{R_{\text{ПП}}} \right)}{I_1}.$$

6. Определяем величину резистора R_a из условия равновесия

$$E_c + E_o = I_1 R_o + E_{\min} + E_o \left(1 - \frac{R_{\lambda_1}}{R_{\text{ЭКВ}}} + \frac{k R_y}{R_{\text{ЭКВ}}} \right).$$

Отсюда

$$R_a = \frac{1}{I_1} \left[E_c + E_o - E_{\min} - E_{\Pi} \left(1 - \frac{R_{\lambda_1}}{R_{\text{ЭКВ}}} + \frac{kR_y}{R_{\text{ЭКВ}}} \right) \right].$$

Пренебрегая последним выражением в круглых скобках ввиду малости, получаем

$$R_a = 1/3 (1,019 + E_o - E_{\min} - 1,032 E_{\Pi}).$$

7. Определяем сопротивление медной компенсационной катушки R_M из условия температурной компенсации:

$$\Delta E = \alpha R_M I_2 t,$$

где t – изменения окружающей температуры; ΔE – изменение напряжения в диагонали моста; α – температурный коэффициент сопротивления, $\alpha = 4,25 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}/^\circ\text{C}$.

Величину резистора R_{M0} при 0°C определяем из выражения

$$R_{M0} = \eta \frac{E}{I_1}.$$

Значение η , при котором осуществляется температурная компенсация:

$$\eta = \frac{c}{E_c \alpha - (c + \alpha E_x)},$$

где $c = \frac{E(t-t')}{\Delta t}$ – средняя чувствительность термопары в интервале изменения температуры ее свободных концов: $\Delta t = t - t'$. Обычно изменение окружающей температуры принимают от 0 до 50°C , т. е. $\Delta t = 50^\circ\text{C}$; E_x – измеряемая ЭДС: $E_x = \frac{E_{\Pi}}{2}$.

Величину резистора для средней окружающей температуры находим из выражения

$$R_{Mt} = R_{M0} (1 + \alpha t).$$

8. Определяем температурную погрешность прибора на $t = 10^\circ\text{C}$:

$$\gamma = \frac{\alpha \eta}{2 (1 + \eta)} t.$$

3. Статистическая обработка результатов наблюдений

При проверке показаний прибора были произведены десять измерений (результаты многократных наблюдений приведены в табл. 3.1). Для расчетов выбрать исходные данные из табл. 3.1. по последней цифре шифра, т.е. номеру зачетной книжки.

Произвести обработку результатов наблюдений и оценить погрешности результатов измерений. Результаты измерений представить по ГОСТ 8.011-72.

Таблица 3.1

Результаты наблюдений

№ п/п	Последняя цифра шифра									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	7,65	25,2	18,0	5,75	21,5	46,1	5,55	79,3	9,36	59,8
2	7,55	25,8	17,5	6,85	20,5	47,3	6,10	79,8	10,2	53,2
3	7,30	25,5	17,8	5,50	21,3	48,2	5,85	75,8	10,4	56,7
4	7,85	30,6	18,2	5,30	21,8	48,5	5,75	76,7	9,25	54,3
5	8,10	25,9	17,1	6,50	21,0	48,1	5,35	78,4	9,75	53,8
6	7,15	25,4	18,5	4,75	20,7	46,5	6,15	78,8	8,50	57,8
7	9,75	24,7	23,4	6,25	21,9	47,2	6,20	77,5	8,90	59,3
8	7,45	24,9	17,8	5,55	20,2	47,8	5,95	78,5	10,1	55,6
9	7,15	25,0	18,6	8,95	20,4	46,0	5,50	79,5	9,55	54,8
10	7,25	26,2	18,3	6,35	20,0	48,8	5,65	70,3	9,90	55,0

При статической обработке группы результатов наблюдений выполняют следующие операции.

1. Вычисляют среднее арифметическое результатов наблюдений

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i,$$

где n – объем выборки ($n = 10$).

2. Вычисляют случайные отклонения результатов наблюдений

$$\delta_i = x_i - \bar{x}$$

и их квадраты $\delta_i^2 = (x_i - \bar{x})^2$.

3. Вычисляют оценку среднего квадратического отклонения результатов наблюдений

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}.$$

4. Вычисляют оценку среднего квадратического отклонения результата измерения

$$S_{\bar{x}} = \frac{S_x}{\sqrt{n}}.$$

5. Проверяют гипотезу о том, что результаты наблюдений принадлежат нормальному закону распределения. В соответствии со стандартом СТ СЭВ 1190-78 для проверок согласия опытного распределения с распределением нормальным для объемов выборок от 3 до 50 рекомендуется применять критерий W .

5.1. Результаты наблюдений случайной величины x_i располагают в порядке их возрастания

$$x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_n.$$

Значения упорядоченной выборки записывают во вторую графу **табл. 3.2**. В первую графу **табл. 3.2** записываются значения индекса.

5.2. Вторые степени x_i^2 записывают в третью графу **табл. 3.2**.

5.3. В четвертую графу **табл. 3.2** записывают значения порядкового индекса j для $j = 1, 2, \dots, l$ в порядке, обратном индексу i . При этом

$$l = \frac{n}{2}, \text{ если } n \text{ четное;}$$

$$l = \frac{n-1}{2}, \text{ если } n \text{ нечетное.}$$

В случае $n = 10$, $l = 10 / 2 = 5$, т. е. $j = 1 \dots 5$ и занесены в четвертую графу таблицы снизу вверх.

Таблица 3.2

Данные для построения проверки согласия распределения с теоретическим по критерию W

i	x_i	x_i^2	j	a_{n-j+1}	$x_{n-j+1} - x_j$	(5) · (6)
1	2	3	4	5	6	7
1						
2						
3						
4						
5						
6			5	0,0399		
7			4	0,1224		
8			3	0,2141		
9			2	0,3291		
10			1	0,5739		
	$\sum_{i=1}^n x_i$	$\sum_{i=1}^n x_i^2$				$\sum_{j=1}^l (5) \cdot (6)$

5.4. По табл. 3.3 находят коэффициенты a_{n-j+1} для соответствующих n и l и записывают их в пятую графу табл. 3.2. Так как $n = 10$, $l = 5$ заполняем пятую графу табл. 3.2 напротив соответствующего значения j , выписывая значения a из графы $n = 10$.

Таблица 3.3

Таблица коэффициентов a_{n-j+1} для вычисления критерия проверки W

$j \backslash n$	3	4	5	6	7	8	9	10
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0,7071	0,6872	0,6646	0,6431	0,6233	0,6052	0,5888	0,5739
2		0,1677	0,2413	0,2806	0,3031	0,3164	0,3244	0,3299
3				0,0875	0,1401	0,1743	0,1976	0,2141
4						0,0561	0,0347	0,1224
5								0,0309

5.5. Вычисляют разности $x_{n-j+1} - x_j$ для каждого j и записывают их в шестую графу **табл. 3.2**. Например, для $n = 10$ и $j = 5$ необходимо вычислить разность $x_{10-5+1} = x_6 - x_5$, для $j = 4$ вычисляют (разность $x_7 - x_4$, для $j = 3$ – разность $x_8 - x_3$ и т. д. Эти разности записываются напротив соответствующего значения j .

5.6. В седьмую графу **табл. 3.2** записывают значения произведений $a_{n-j+1} \cdot (x_{n-j+1} - x_j)$, т. е. произведение граф (5) и (6) для $j = 1, 2, \dots, l$ ($l = 1 \dots 5$).

5.7. Данные второй, третьей и седьмой граф суммируются и записываются в последнюю строчку этой таблицы.

5.8. При помощи сумм, установленных по п. 5.7, вычисляют характеристики

$$\varphi^2 = \sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2}{n};$$

$$b^2 = \left[\sum_{j=1}^l a_{n-j+1} \cdot (x_{n-j+1} - x_j) \right]^2.$$

5.9. Вычисляют значение критерия проверки W по формуле

$$W = \frac{b^2}{\varphi^2}.$$

5.10. По **табл. 3.4** устанавливают, что вероятности $\alpha = 0,05$ соответствует для $n = 10$ величина $W^* = 0,842$. Следовательно, вероятность того, что вычисленное значение W будет менее W^* , равна α , и критическую область образуют все значения $W < W^*$. Следовательно, если $W \geq W^*$, то нет основания для опровержения гипотезы, что опытное распределение для данных условий является нормальным.

Уровень значимости α выбирают по **последней цифре зачетной книжки**. В случае опровержения, гипотезы о нормальности распределения необходимо определить уровень значимости, при котором эта гипотеза может быть принята.

6. Определяют наличие грубых погрешностей и промахов (анормальных результатов). Если последние обнаружены, вычисления повторяют.

Оценку анормальности результатов осуществляют в соответствии со стандартом СТ СЭВ 545-77 для результатов наблюдений случайной величины, подчиняющейся нормальному закону распределения. Из **табл. 3.2** с упорядоченной выборкой сомнительными могут быть наибольшее x_{10} и наименьшее значение x_1 .

**Квантили распределения проверочного критерия нормальности W
для $n = 5...10$**

$n \backslash \alpha$	0,01	0,02	0,05	0,10	0,50
5	0,868	0,715	0,762	0,806	0,927
6	0,713	0,443	0,788	0,826	0,927
7	0,730	0,760	0,803	0,838	0,928
8	0,749	0,778	0,818	0,851	0,932
9	0,764	0,791	0,829	0,859	0,935
10	0,781	0,806	0,842	0,869	0,938
Номер варианта	0,9	1,8	2,7	3,6	4,5

Чтобы оценить принадлежность x_n и x_1 к данной нормальной совокупности и принять решение об исключении или оставлении $x_n(x_1)$, в составе выборки находят отношение

$$U_n = \frac{x_n - \bar{x}}{S_x}; U_1 = \frac{\bar{x} - x_1}{S_x}.$$

Поскольку сомнительными являются x_{10} и x_1 , то эти выражения принимают вид

$$U_{10} = \frac{x_{10} - \bar{x}}{S_x}; U_1 = \frac{\bar{x} - x_1}{S_x}$$

Результат U_n и U_1 сравнивают с величиной h , взятой из **табл. 3.5.** для своего варианта.

Если $U_n \geq h$ (или $U_1 \geq h$), то подозреваемый в аномальности результат наблюдений должен быть исключен, а вычисления должны быть повторены с начала **задачи 3.**

Предельное значение h для случая неизвестного генерального среднеквадратичного отклонения σ_x

№ п/п	Объем выборки	Предельное значение при вероятности			
		0,01	0,075	0,050	0,025
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
1	5	1,60	1,64	1,67	1,72
2	6	1,73	1,77	1,82	1,89
3	7	1,83	1,88	1,94	2,02
4	8	1,91	1,96	2,03	2,13
5	9	1,98	2,04	2,11	2,21
6	10	2,03	2,10	2,18	2,29
	Номер варианта	от 5 до 9		от 0 до 4	

7. Определяем доверительные интервалы для параметров нормального распределения.

7.1. Доверительные границы ε (без учета знака) случайной погрешности результата измерения находят по формуле

$$\varepsilon = t S_{\bar{x}},$$

где t – коэффициент Стьюдента, который в зависимости от доверительной вероятности p и числа результатов наблюдений находят в **табл. 3.6**.

Записываем результат измерения в виде

$$\bar{x} = \dots (\varepsilon = \pm \dots ; p = \pm \dots)$$

7.2. Доверительные границы для среднего квадратического отклонения определяют в соответствии со стандартом СТ СЭВ 876-78.

При заданной доверительной вероятности нижнюю доверительную границу определяют по формуле

$$S_{xH} = z_H S_x.$$

Верхнюю доверительную границу определяют по формуле

$$S_{xB} = z_B S_x.$$

Таблица 3.6

**Значения коэффициента t для случайной величины,
имеющей распределение Стьюдента**

№ п/п	$n - 1$	$t_p = 0,95$	$t_p = 0,99$
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
1	5	2,571	4,032
2	6	2,447	3,707
3	7	2,365	3,499
4	8	2,306	3,355
5	9	2,262	3,250
6	10	2,228	3,169
	Номер варианта	9-5	4-0

Значения z_H и z_B зависят от величины выборки и выбираются из **табл. 3.7** для заданной доверительной вероятности.

Таблица 3.7

Значения коэффициентов z_H и z_B

№ п/п	p	0,95	0,99
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
1	$n = 10$ $\left\{ \begin{array}{l} z_H \\ z_B \end{array} \right.$	0,69 1,83	0,62 2,28
2	$n = 9$ $\left\{ \begin{array}{l} z_H \\ z_B \end{array} \right.$	0,68 1,92	0,60 2,44
3	$n = 8$ $\left\{ \begin{array}{l} z_H \\ z_B \end{array} \right.$	0,63 2,04	0,59 2,6

Среднеквадратическое значение находится в интервале

$$S_{\text{хн}} \leq S_x \leq S_{\text{хв}}.$$

4. Технологические измерения параметров производственных процессов

На основании изучения конкретного технологического процесса и технических характеристик оборудования по литературным источникам сформулировать требования к средству измерения одного из технологических параметров согласно варианту.

Определить или задаться пределами изменения измерительной величины и значениями погрешностей измерения целесообразными для данных условий.

Сформулировать требования к конструктивному исполнению измерительного устройства. В процессе решения задачи сначала анализируются типовые ее решения по справочной литературе. При отсутствии типовых решений дается сравнительный анализ методов и средств, известных из специальной технической литературы, и выбирается наиболее подходящая задача. Необходимо привести принципиальную электрическую схему измерительного устройства в соответствии с требованиями ЕСКД и дать ее подробное описание. **Номер варианта брать по последней цифре зачетной книжки.**

Варианты задания

1. Средства измерений объемов круглых лесоматериалов весовым методом (на железнодорожном транспорте, на кранах и др.).
2. Средства поштучного измерения линейных размеров и объема лесоматериалов (в составе линий разделки, сортировки или самостоятельно).
3. Средства геометрического обмера пакетов лесоматериалов по габаритным размерам (в составе устройств для определения объема партии сортамента).
4. Средства измерений перемещений и положения узлов технологического оборудования (в составе манипуляторов, роботов и т. д.).
5. Средства измерения сил и деформаций в конструкциях (в технологических конструкциях, подъемно-транспортных машинах и т. д.).
6. Средства дефектоскопии древесины (в составе линий раскряжевки, сортировки).
7. Средства контроля режимов обработки древесины (скорость подачи, резания и др.).

8. Средства измерения уровня, объема, массы щепы (в бункерах, на железнодорожном транспорте и т. д.).
9. Средства дефектоскопии металлов.
10. Средства контроля условий труда (состав газов, шум, запыленность, освещение, санитарно-гигиенические условия и др.).
11. Средства поштучного определения объема лесоматериалов (в составе линий распиловки бревен).
12. Средства измерений линейных размеров (в составе линий раскря пиломатериалов, сортировок пиломатериалов, древесностружечных плит и др.).
13. Средства дефектоскопии древесины, плит, фанеры (в составе соответствующих линий).
14. Средства измерения качества поверхностей (в составе линий шлифования, лакирования, полирования).
15. Средства измерения физико-механических параметров древесины и древесных материалов (в составе силовой сортировки пиломатериалов, сортировки древесностружечных плит и др.).
16. Средства измерения состава и свойств вещества (в составе линий производства фанеры, древесностружечных плит, линий крашения и отделки плит и т. д.).
17. Средства измерения режимов механической обработки древесины и древесных материалов.
18. Средства измерения режимов гидротермической и пьезотермической обработки древесины.
19. Средства измерения влажности древесины и древесных материалов (в процессах сушки пиломатериалов, шпона, измельченных древесных частиц).
20. Средства контроля условий труда (состав газов, запыленность, шум, освещение, санитарно-гигиенические условия).

Библиографический список

1. *Леонов, Л. В., Вороницин, В. К.* Технологические измерения и контрольно-измерительные приборы в деревообрабатывающей промышленности / Л.В. Леонов, В.К. Вороницин. – М.: Лесная промышленность, 1976. – 280 с.
2. *Кондрашкова, Г. А.* Технологические измерения и приборы целлюлозно-бумажной промышленности / Г.А. Кондрашкова. – М.: Лесная промышленность, 1982. – 375 с.
3. Автоматические приборы, регуляторы и вычислительные системы: справочное пособие / под ред. Б. Д. Кошарского. – Л.: Машиностроение, 1976. – 488 с.

4. Орлов, А. Т., Стрижев, Ю. П. Автоматизация технологических процессов производства фанеры / А.Т. Орлов, Ю.П. Стрижев. – М.: Лесная промышленность, 1974. – 200 с.
5. Шварцман, Г. М. Технологические основы автоматизации производства древесностружечных плит / Г.М. Шварцман [и др.]. – М.: Лесная промышленность, 1976. – 300 с.
6. Волосов, С. С. Основы автоматизации измерений / С.С. Волосов [и др.]. – М.: Изд-во Стандартов, 1975.— 336 с.
7. Андреев, А. А. Автоматические электронные показывающие, регистрирующие и регулирующие приборы / А.А. Андреев. – Л.: Машиностроение, 1981. – 261 с.
8. Кузнецов, Н. Д., Чистяков, В. С. Сборник задач и вопросов по теплотехническим измерениям и приборам / Н.Д. Кузнецов, В.С. Чистяков. – М.: Энергия, 1978. – 216 с.
9. Преображенский, В. П. Теплотехнические измерения и приборы / В.П. Преображенский. – М.: Энергия, 1978. – 703 с.
10. Агейкин, Д. И. Датчики контроля и регулирования: справочные материалы / Д.И. Агейкин [и др.]. – М.: Машиностроение, 1965. – 928 с.
11. ГОСТ 21524-76. Лесоматериалы. Средства для линейных и объемных измерений. Типы и основные параметры. Технические требования. – М.: Изд-во Стандартов, 1976. – 6 с.
12. ГОСТ 24447-80. Влагомеры древесины. Общие технические требования. – М.: Изд-во Стандартов, 1981. – 5 с.
13. Харитонов, В.В. Основы автоматизации лесозаготовительного производства / В.В. Харитонов. – М.: Лесная промышленность, 1970. – 232 с.
14. Бауманн, Э. Измерение сил электрическими методами / Э. Бауманн. – М.: Мир, 1978. – 381 с.
15. Проектирование датчиков для измерения механических величин. – М.: Машиностроение, 1979. – 480 с.
16. Музалевский, В. И. Измерение влажности древесины / В.И. Музалевский. – М.: Лесная промышленность, 1976. – 110 с.
17. Обзорная информация ЦНИИТЭИПриборостроения.
18. Экспресс-информация ЦНИИТЭИПриборостроения.
19. Экспресс-информация ВНИПИЭИлеспрома.
20. ГОСТ 8.011—72. Показатели точности измерения и формы представления результатов измерений.
21. Стандарт СЭВ СТ СЭВ 876—78. Прикладная статистика. Правила определения оценок и доверительных границ для параметров нормального распределения.
22. Стандарт СЭВ СТ СЭВ 1190—78. Прикладная статистика. Правила проверки согласия опытного распределения с теоретическим.
23. ГОСТ 8.207—76. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. Основные положения.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ ТИТУЛЬНОГО ЛИСТА

<p>Министерство образования и науки РФ</p> <p>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЛЕСОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ имени С. М. Кирова»</p> <hr/> <p><i>Кафедра Математических методов в управлении</i></p> <p>КУРСОВОЙ ПРОЕКТ</p> <p>Технические измерения и приборы</p> <p>Выполнил (а) Ст-т (ка) _____, _____, _____ институт курс группа</p> <p>_____, _____ подпись Ф.И.О.</p> <p>Проверил преподаватель кафедры</p> <p>_____, _____ подпись Ф.И.О.</p> <p>Санкт-Петербург 20____</p>
--

А. Указания по оформлению курсового проекта

1. Курсовой проект выполняется в рукописной или печатной форме на листах формата А4.

2. Листы должны быть сброшюрованы любым способом.

3. При написании текста соблюдать размеры полей (верхнее, нижнее – 25 мм, справа – 15 мм, слева – 30 мм).

4. Страницы должны быть пронумерованы (титульный лист – страница 1 (номер страницы не ставится), на последующих страницах номер представляется арабскими цифрами в правом нижнем углу).

5. Соблюдать межстрочный интервал не менее 5 мм, абзацы.

6. Курсовой проект должен содержать: титульный лист; содержание; исходные данные; основную часть; список использованных источников.

7. Текст основной части можно разделить на разделы, подразделы, пункты.

Нумерация разделов арабскими цифрами: раздел – 1.; подразделы – 1.1., 1.2.; пункты – 1.1.1., 1.1.2. и т. д. Слова СОДЕРЖАНИЕ и СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ – пишутся заглавными буквами и не нумеруются.

8. Формулы пишутся с новой строки по центру. Между формулами и текстом должно быть не менее 1-2 интервалов сверху и снизу.

9. Нумерация формул: арабскими цифрами в круглых скобках: первая цифра – номер раздела, затем – номер формулы. Номер проставляется на той же строке, что и сама формула с правой стороны листа (у правого поля).

10. Нумерация рисунков: рисунок должен иметь номер и название. Номер и название рисунка пишутся под рисунком. Номер рисунка состоит из номера раздела и порядкового номера рисунка в пределах раздела. Подрисуночная надпись не должна выходить за пределы рисунка.

Например:

Рис. 1.1. Принципиальная схема автоматического контроля линейных размеров

Если рисунок выполнен на альбомном листе – лист располагать так, чтобы подрисуночная надпись была справа.

11. Между текстом и рисунком должно быть не менее 1-2 интервалов. Между рисунком и названием – не менее 1 интервала. Между названием рисунка и последующим текстом – не менее 1-2 интервалов.

12. Нумерация таблиц: таблицы нумеруются арабскими цифрами. В правом верхнем углу таблицы над заголовком (названием таблицы) пишется слово «Таблица» и номер таблицы. Ниже по центру – название таблицы, далее сама таблица.

13. Сведения, приведенные в работе, подтверждаются ссылками на источники с указаниями страниц, если это формулы или таблицы – то и их номера.

Б. Правила оформления расчетов

1. Название расчета.

2. Краткое описание цели расчета, основных понятий и величин, которые предстоит рассчитать.

3. Расчетные формулы с расшифровкой величин, входящих в эти формулы: а) название величины; б) размерность; в) численное значение (в квадратных скобках указать источник получения этого значения с обоснованием выбора).

4. В расчетную формулу подставляются численные значения **всех** величин, входящих в эту формулу, без каких-либо предварительных расчетов. Далее можно привести промежуточные расчеты по желанию. Окончательный ответ должен быть записан с **единицей измерения** искомой величины.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	
1. Расчет индуктивного преобразователя линейных размеров.....	ОШИБКА! ЗАКЛАДКА НЕ ОПРЕДЕЛЕНА.
2. Расчет измерительных схем автоматического моста и потенциометра	Ошибка! Закладка не определена.
3. Статистическая обработка результатов наблюдения .	Ошибка! Закладка не определена.
4. Технологические измерения параметров производственных процессов	Ошибка! Закладка не определена.
Библиографический список.....	Ошибка! Закладка не определена.
Приложения.....	

Составители:

Елисеев Игорь Владимирович
Иванова Ирена Викторовна
Соколова Виктория Александровна

ТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ И ПРИБОРЫ

Методические указания по выполнению курсового проекта
по дисциплине «Технические измерения и приборы»
для студентов очной и заочной форм обучения
направления подготовки
27.03.04 «Управление в технических системах»

Редактор *Л. В. Лукьянчук*
Компьютерная верстка – *Н. А. Ушакова*

Подписано в печать с оригинал-макета **15.01.18.**
Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Печать трафаретная.
Уч.-изд. л. 1,0. Печ. л. 3,0. **Тираж 100 экз. Заказ № 113. С 80.**

Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет
Издательско-полиграфический отдел СПбГЛТУ
194021, Санкт-Петербург, Институтский пер., 3