

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»
(ВлГУ)
Кафедра «АТБ»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВОЙ
РАБОТЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ «ТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ, ДАТЧИКИ
И ПРИБОРЫ»

Составитель:
П.С. Сабуров

Владимир 2015

УДК 004.7

ББК 32.97

Рецензент

Доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматические и мехатронные системы» Владимирского государственного университета
Веселов О.В.

Методические указания для выполнения курсовой работы по дисциплине «Технические измерения, датчики и приборы» / Сост. П.С. Сабуров., Владим. гос. ун-т., Владимир, 2015. – с. 71.

Подготовлены в соответствии с рабочей программой дисциплины «Технические измерения, датчики и приборы», содержат методические указания по выполнению курсовой работы, список рекомендуемой литературы. Приведены варианты заданий и исходных данных для расчета датчика холла, определено содержание работы. Даются развернутые методические указания по выполнению всех этапов работы. Некоторые разделы иллюстрируются примерами. Приведены рекомендации по оформлению работы и форме представления материала.

Предназначены для инженерно–технических специальностей Владимирского государственного университета имени А.Г. и Н.Г. Столетовых.

Ил. 10. Библиогр. 6 назв.

УДК 004.7

ББК 32.97

© Владимирский государственный университет
имени А.Г. и Н.Г. Столетовых (ВлГУ)

Аннотация

Данные методические указания предназначены для студентов 3 курсов, обучающихся по дисциплине “Технические измерения, датчики и приборы”, может быть применено в качестве источника знаний при выполнении курсовой работы (содержит ссылки на дополнительные источники информации). В методических указаниях проведен обзор и анализ современных датчиков тока, даны варианты заданий для выполнения курсовой работы.

Обзор датчиков тока

Существует множество датчиков тока, однако ограничимся наиболее широко применяющимися: резистивные, датчики Холла, трансформатора тока (применяются только в цепях переменного тока) и магнитооптические датчики.

1.1. Резистивные датчики

Действие резистивных преобразователей тока (резистивных шунтов) основано на появлении разности потенциалов на зажимах сопротивления, через которые протекает ток, согласно закону Ома.

Шунт представляет собой измерительный преобразователь – четырехконтактный резистор [1], содержащий, в простейшем случае, резистивную и контактную части (см. рис. 1). Последняя содержит в себе два токовых и два потенциальных контакта. Резистивные преобразователи, предназначенные для измерения больших токов, включаются в цепь по четырехзажимной схеме. При этом выходное напряжение на резистивном шунте снимается с потенциальных контактов, через которые не протекает большой ток. Подвод тока осуществляется через массивные токовые контактные колодки, от которых потенциальные зажимы удалены на достаточно большое расстояние.

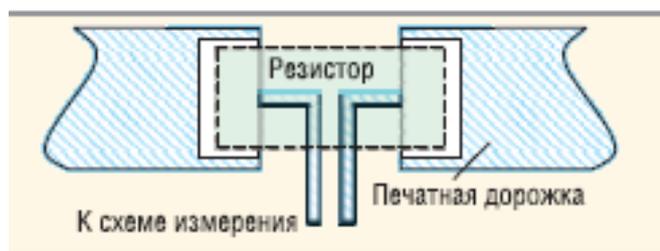


Рисунок 1. Положение токоизмерительного резистора на печатной плате

Резистивные преобразователи выполняют преимущественно из манганина (термостабильный сплав на основе меди (около 85 %) с добавкой марганца (Mn) (11,5—13,5 %) и никеля (Ni) (2,5—3,5 %)), поскольку этот материал обладает малым температурным коэффициентом сопротивления [2]. Эта конструкция является самым ответственным элементом преобразователя, поскольку главной характеристикой шунта является сопротивление.

Шунт переменного тока представляет собой пассивный преобразователь, в котором при нормальных условиях применения выходная величина пропорциональна входной величине, при этом эти величины имеют между собой

угол фазового сдвига практически равный нулю. Главной величиной характеризующей шунт переменного тока является импеданс, определяемый как отношение двух комплексных величин:

$$Z = \frac{\dot{U}}{\dot{I}},$$

где U' и I' – действующие напряжение и ток.

Основные особенности резистивных шунтов:

1. линейная характеристика;
2. сравнительная простота изготовления;
3. погрешность измерения меньше 1 %;
4. низкая стоимость;
5. отсутствует гальваническая развязка по току;
6. внесение потерь в цепь измерения;
7. саморазогрев и термоЭДС при больших токах;
8. влияние скин-эффекта при больших частотах;
9. ограничение частотного диапазона, обусловленное паразитной индуктивностью.

1.2. Датчики Холла

Эффект Холла заключается в появлении напряжения на концах полоски проводника или полупроводника, помещённого перпендикулярно силовым линиям магнитного поля. Главными преимуществами датчиков основанных на этом эффекте является отсутствие вносимых потерь и «естественная» гальваническая развязка [3].

Рассмотрим основные соотношения для данного датчика. Напряжение Холла для преобразователя составляет:

$$U = k I_x B,$$

где k – коэффициент Холла; B – магнитная индукция.

Поддерживая $I_x = const$ и предполагая линейную зависимость между измеряемым током I_m и индукцией B в воздушном зазоре, получим линейную зависимость напряжения Холла U от измеряемого тока I_m (см. рис. 2).

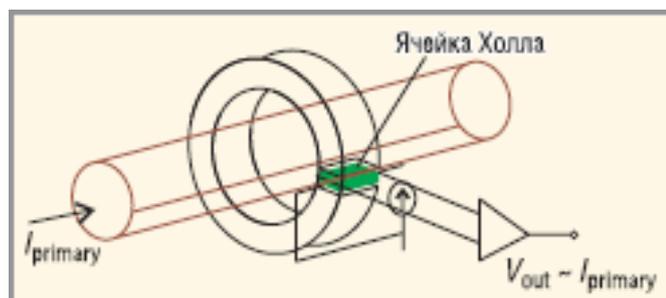


Рисунок 2. Холловский датчик тока разомкнутого типа

С целью уменьшения влияния внешних магнитных полей, а также для упрощения монтажа часто применяется сердечник разделенный на 2 части с двумя зазорами и двумя датчиками Холла. Напряжение Холла, вызванное измеряемым током в обоих датчиках Холла суммируется, а напряжения, происходящие от паразитных полей, взаимно компенсируются.

Рассмотрим вопрос получения линейной зависимости магнитной индукции в зазоре магнитной цепи в зависимости от намагничивающего поля [4]. Сумма магнитных напряжений вдоль замкнутой магнитной цепи равняется намагничивающей силе $F_{н.с.}$. Для ферромагнитного сердечника, имеющего n равномерных зазоров получаем:

$$(H_{s1} + H_{s2} + \dots + H_{sn})l_s + H_{Fe}l_{Fe} = F_{н.с.},$$

где H_{s1}, \dots, H_{sn} – напряженность поля в соответствующем зазоре; l_s – длина зазора; H_{Fe} – напряженность поля в сердечнике; l_{Fe} – средняя длина линии поля в сердечнике.

Сумма индукций $B_{s1} + \dots + B_{sn}$ в зазорах сердечника равняется:

$$B_{s1} + B_{s2} + \dots + B_{sn} = \frac{\mu_0}{l_s} (F_{н.с.} - H_{Fe}l_{Fe}),$$

где μ_0 – проницаемость воздуха.

Для получения линейной зависимости между суммой индукции в зазорах сердечника и намагничивающей силы необходимо стремиться к выполнению следующего неравенства:

$$H_{Fe}l_{Fe} \ll F_{н.с.} \quad (1)$$

Следовательно сердечник должен быть изготовлен из материала с узкой петлей гистерезиса и большим значением индукции насыщения, т. к. в этом случае можно получить большое значение индукции в воздушном зазоре. Воспользовавшись неравенством (1) получим:

$$B_{s1} + B_{s2} + \dots + B_{sn} = \frac{\mu_0}{l_s} F_{н.с.} \quad (2)$$

Линейная зависимость в формуле (2) справедлива только до определенного предельного значения намагничивающей силы $F_{н.с.пр.}$, зависящего от индукции насыщения сердечника и рассеяния в зазорах.

По сравнению с резистивными датчиками тока, приборы на основе ячейки Холла имеют более узкий частотный диапазон, паразитное напряжение смещения низкую точность, высокую стоимость и требуют для работы внешний источник питания. На рис. 2 и 3 схематически представлены две основные разновидности датчиков тока на основе эффекта Холла – разомкнутого и замкнутого типов соответственно. Датчики замкнутого типа (с компенсирующей обмоткой) обеспечивают высокую точность, в несколько раз более широкую полосу пропускания и, как правило, не имеют выходного смещения при нулевом токе. Их чувствительность прямо пропорциональна числу витков компенсирующей обмотки.

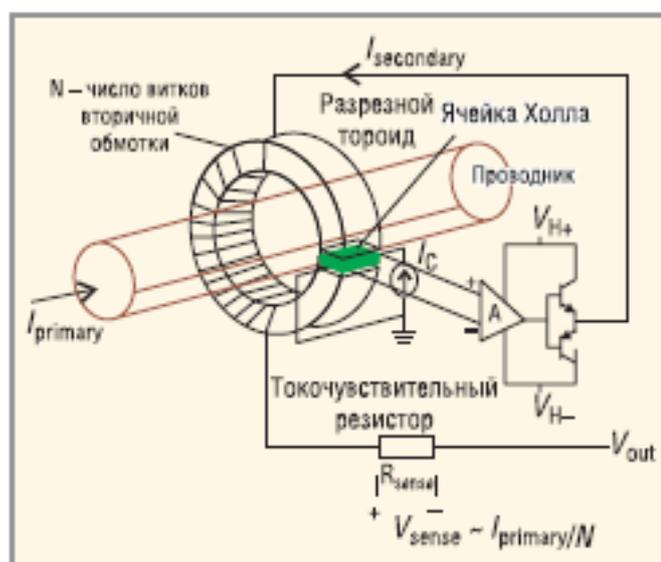


Рисунок 3. Датчик Холла замкнутого типа

Основные особенности датчиков Холла:

1. возможность бесконтактных измерений;
2. отсутствие гальванической связи между входным и выходным сигналами;
3. возможность исследования распределения тока;
4. отсутствие обмоток (большая динамическая устойчивость);
5. возможность измерения любого сигнала: постоянного, переменного и импульсного произвольной формы;
6. необходимость внешнего источника питания;
7. громоздкий сердечник;

8. чувствительность к внешним помехам;
9. относительно высокая стоимость.

1.3.Катушка Роговского

В качестве датчиков переменного тока используются и катушки Роговского. Она представляет собой тороид с воздушным сердечником, с равномерной намоткой витков. Концы катушки выводятся вместе и замыкаются через сопротивление нагрузки (см. рис. 4.). Отличием от токового трансформатора является то, что в катушке Роговского одновитковая первичная обмотка [5].

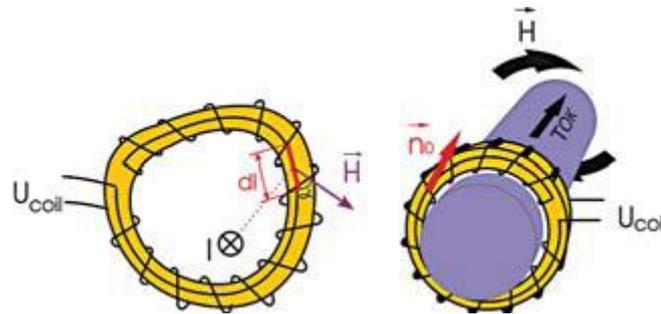


Рисунок 4. Структура катушки Роговского

В катушке, которая окружает проводник с измеряемым током, при замыкании контура наводится э. д. с. Согласно закону Ампера линейный интеграл напряженности магнитного поля по любому замкнутому контуру равен полному току через поверхность, ограниченную этим контуром [Там же]:

$$\oint H \cos \alpha \, dl = I$$

где H – напряженность магнитного поля; α – угол между вектором магнитного поля и направлением нормали к плоскости витка элементарной секции длиной dl .

Связь между магнитным потоком Φ и напряженностью магнитного поля H определяется следующим выражением:

$$\Phi = \iint \mu_0 \times H dS = \mu_0 \times A \times n \oint H \times dl,$$

где $dS = A \times n \times dl$ (A – поперечная площадь элементарной секции; n – число витков в секции длиной dl).

В замкнутом контуре э. д. с. Возникает из-за наведенного электрического поля при изменении магнитного поля:

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt} = -\mu_0 \times A \times n \frac{dl}{dt} = -M \frac{dl}{dt},$$

где $M = \mu_0 \times A \times n$ – взаимная индуктивность между катушкой и проводником. Вследствие того, что э. д. с. наводится только при изменении магнитного поля, данный вид датчик не может использоваться для измерения постоянной составляющей тока. Также существенным является то, что при намотке катушки должна соблюдаться равномерность распределения витков по всей длине.

По своему принципу действия катушка Роговского подвержена влиянию внешних магнитных полей. Для уменьшения влияния этого вредного фактора делают равномерную намотку витков на круглый тороидальный сердечник, при этом влияние равномерного внешнего магнитного поля уравнивается внутри катушки.

Для уменьшения емкостной связи с внешними цепями и устранения наводок от посторонних переменных электромагнитных полей катушку Роговского помещают в электростатический экран с разрезом по внутренней стороне экрана.

Также эффективным способом подавления влияния внешних переменных магнитных полей является использование обратного витка. Если плоскость тора пронизывается переменным магнитным полем, то наводимое на обратном витке напряжение будет равно по величине и противоположно по направлению напряжению на «прямом витке», образуемом основной обмоткой и скомпенсирует его.

Поскольку напряжение на выходе катушки Роговского пропорционально производной тока, необходим интегратор, чтобы преобразовать сигнал пропорциональный dl/dt в сигнал пропорциональный $I(t)$ для дальнейшей обработки.

Основные особенности катушки Роговского:

1. большая полоса пропускания;
2. возможность измерения больших токов;
3. отсутствие насыщения и хорошая линейность, благодаря воздушному сердечнику;
4. простота использования;
5. относительно небольшая стоимость;
6. чувствительность к внешнему электромагнитному полю;
7. невозможность измерения постоянных токов.

1.4. Интеграторы на выходе Катушки Роговского

Интегрирование выходного напряжения осуществляется следующими способами:

- пассивное интегрирование (на собственной индуктивности и на RC – цепочке);
- активное интегрирование;

Пассивное интегрирование

Рассмотрим интегратор на основе RC-цепочки (см. рис. 5). Обмотка катушки вместе с интегрирующей цепочкой представляет собой колебательный контур с затуханием, для которого справедливо следующее выражение [39]:

$$L_{coil} \cdot C \cdot \frac{d^2 U_{out}}{dt^2} + (R_{coil} + R) \cdot C \cdot \frac{dU_{out}}{dt} + U_{out} = \varepsilon,$$

где U_{out} – напряжение на конденсаторе C . Предполагая, что $\tau_{н} \ll (R_{coil} + R) \cdot C$ и $\tau_{н} \ll \sqrt{L_{coil} \cdot C}$ получаем:

$$U_{out} \approx \int_0^t \frac{\varepsilon}{(R_{coil} + R) \cdot C} dt = \frac{-L_{coil}}{(R_{coil} + R) \cdot C} \cdot \frac{I(t)}{N},$$

где N – количество витков катушки Роговского.

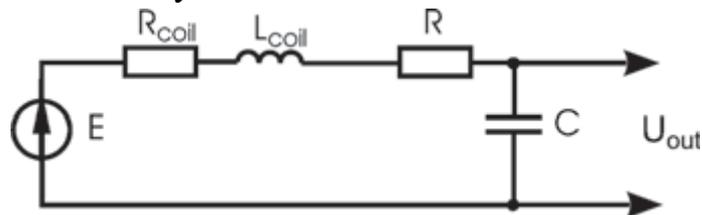


Рисунок 5. Пассивный интегратор на RC-цепочки

Этот вид интеграции применим только для токов высокой частоты.

Для исследования переходных процессов на высоких частотах применяют метод интегрирования на собственной индуктивности (см. рис. 6).

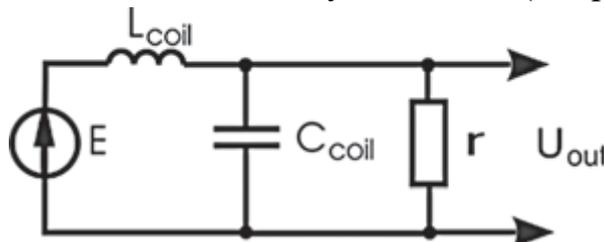


Рисунок 6. Интегратор на собственной индуктивности катушки

Для данной схемы справедливо следующее выражение:

$$\frac{L_{coil}}{r \cdot C} \cdot \frac{dU_{out}}{dt} + U_{out} = \varepsilon(t) = M \frac{di}{dt},$$

откуда получаем при $r \ll L_{coil} \cdot \omega$:

$$U_{out}(j\omega) = \frac{i(j\omega) \cdot M}{\tau},$$

где i – измеряемый ток, $\tau = L_{coil} / r$ – постоянная времени цепи.

Этот режим интегрирования является наиболее простым в реализации, поскольку достаточно намотать катушку на сердечник из материала с большим значением относительной магнитной проницаемости μ (например, на ферритовое кольцо), чтобы увеличить значение индуктивности на 2 - 3 порядка. При этом, как это будет показано далее, не происходит ограничения полосы рабочих частот измерительного устройства сверху.

Активное интегрирование

Активные интеграторы строятся на основе операционных усилителей (см. рис. 7) Напряжение на выходе интегратора. Напряжение на выходе интегратора U_{out} описывается выражением [40]:

$$U_{out} = -\frac{1}{\tau} \int \varepsilon dt = -\frac{M}{\tau} \cdot I,$$

где $\tau = RC$ – постоянная интегрирования.

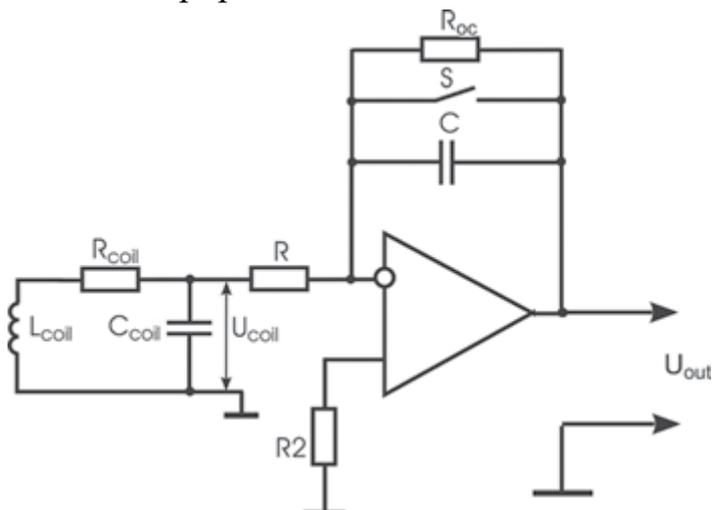


Рисунок 7. Активный интегратор на операционном усилителе

Такой вид интеграторов обладает большим диапазоном чувствительности. Однако к их недостаткам относятся влияние входных токов и напряжения смещения, насыщение операционных усилителей при приближении выходного напряжения к уровню напряжения питания, меньшая полоса частот по сравнению с пассивными интеграторами.

На высоких частотах начинает проявляться резонансные явления в катушке. Поэтому используют соответствующие демпфирующие резисторы, для снижения добротности колебательного контура. На наличие резонанса влияет также

наличие электростатического экрана и длина выходного кабеля между катушкой и интегратором, который вносит дополнительную емкость.

1.5. Магнитооптические датчики тока на основе эффекта Фарадея

Существует еще один класс датчиков появившейся относительно недавно. Это магнитооптические датчики тока основанные на эффекте Фарадея. Они используются для бесконтактных измерений сильных магнитных полей и (возбуждающих их) соответствующих токов. Магнитооптический эффект заключается во вращении плоскости поляризации линейно поляризованного света, распространяющегося в веществе вдоль силовых линий магнитного поля, проходящих через это вещество. Это открытие Фарадея явилось первым доказательством наличия прямой связи между магнетизмом и светом.

Проходящее через среду линейно поляризованное излучение всегда может быть формально представлено как суперпозиция двух поляризованных по правому и левому кругу волн с противоположным направлением вращения. Намагниченное внешним полем оптически прозрачное вещество в общем случае нельзя охарактеризовать единым показателем преломления n . Показатели преломления n_+ и n_- для излучения правой и левой круговых поляризаций становятся различными (магнитная анизотропия). Различие n_+ и n_- приводит к тому, что поляризованные по правому и левому кругу компоненты излучения распространяются в среде с различными фазовыми скоростями, приобретая разность фаз, линейно зависящую от оптической длины пути. В результате на выходе из вещества плоскость поляризации монохроматической световой волны поворачивается на угол φ . При этом знак угла поворота плоскости поляризации не зависит от направления распространения света (по вектору магнитной индукции или против него). Важно лишь, чтобы вектор индукции был параллелен направлению распространения оптической волны.

Радианная мера угла фарадеевского вращения φ при магнитной индукции B и длине оптического пути в веществе L выражается как [6]:

$$\varphi = V \cdot B \cdot L, \quad (3)$$

где V – постоянная Верде; определяющая магнитооптическую активность для данного вещества (зависит от химического состава вещества, температуры и рабочей длины волны).

Исходя из того, что между величиной магнитной индукции B и протекающим в обмотке соленоида током существует однозначная связь, магнитооптический датчик можно использовать для измерения тока, который можно вычислить из формулы:

$$B = 0.0126 \cdot \frac{N \cdot I}{l}, \quad (4)$$

где N – количество витков соленоида; I – протекающий ток; l – длина намотки.

Применение магнитооптического датчика для измерения тока соленоида мощного электромагнитного клапана иллюстрирует рис. 8 [7]. Диапазон изменения тока — от 1 А в режиме удержания до 10 А — в стартовом режиме. Оптический датчик закреплен на оси измеряемого соленоида, на расстоянии около 5 мм от верхней плоскости силовой обмотки. Датчик представляет собой цилиндр, содержащий поляризатор, монокристалл железоиттриевого граната (ЖИГ) и расщепитель выходного луча, к торцам которого подсоединены выходные оптические многомодовые волокна. Входной световод подключен с помощью стержневой линзы к верхнему торцу цилиндра.

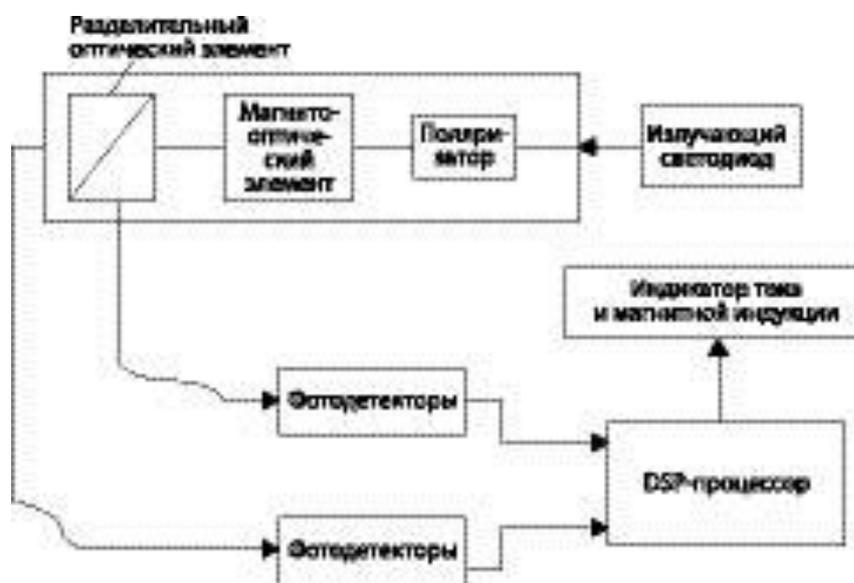


Рисунок 8. Магнитооптический датчик на эффекте Фарадея

Для повышения помехозащищенности измерений в аппаратуре датчика используется алгоритм обработки сигнала по методу двух лучей. В данном случае прошедшая через магнитооптический кристалл световая волна с плоскостью поляризации, повернутой на угол φ , расщепляется на два луча, имеющие взаимно перпендикулярные плоскости поляризации P и S . Интенсивность каждой компоненты выражается по следующим формулам:

$$U_p = U \cdot (1 + m) \quad (5)$$

$$U_s = U \cdot (1 - m), \quad (6)$$

где U_p и U_s – напряжение выходных сигналов фотодетекторов для плоскостей; U – напряжение соответствующие немодулированному исходному лучу; $m = \sin\varphi$ – индекс поляризации.

Процессор схемы обработки вычисляет следующие отношение:

$$\frac{U_P - U_S}{U_P + U_S}, \quad (7)$$

после цифровой фильтрации выходной сигнал пропорционален m и не зависит от флуктуаций световой мощности.

Каждый луч детектируется отдельным фотодетектором, после чего DSP вычисляет величину m и далее, с учетом выражений (3 - 7) рассчитывается величина магнитной индукции B и соответствующий ей ток I соленоида. Данные измерений выводятся на индикатор.

Основные особенности магнитооптических датчиков:

- чувствительный элемент оптоволоконна является абсолютно электроизолированным;
- использование специального температуро-стабилизированного волокна позволяет не использовать специальные схемы компенсации температурного дрейфа;
- большой динамический диапазон измеряемых токов (до 10^6 А);
- маленькая погрешность измерений (до 0,1 %);
- отсутствие необходимости разрыва токопроводящей линии;
- нестабильность измерений;
- сложность технологии;
- высокая стоимость;
- характеристики датчиков сильно зависят от качества оптоволоконна.

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

$$U_x = R_x \frac{iB}{d}, \quad (1)$$

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

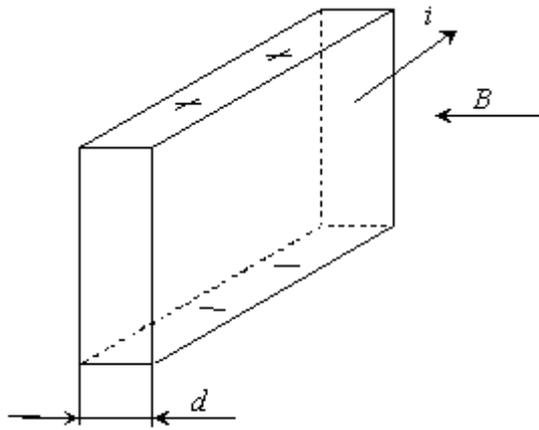


Рис. 1

Если параметры R_x , i и d не зависят от внешних факторов, то $U_x = \alpha_B B$ и, следовательно, такая пластина является линейным измерительным преобразователем-датчиком магнитного поля.

Так как толщина пластины d не зависит от внешних условий, то при питании датчика от генератора тока (Рис.2) $i = const$ и также не зависит от внешних условий. Для выполнения условия $\alpha_B = const$, необходимо, чтобы $R_x = const$.

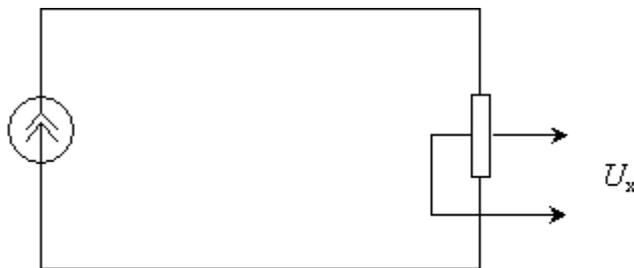


Рис.2

В общем случае постоянная Холла определяется концентрациями и подвижностями носителей заряда, так в полупроводниках при рассеянии на фононах:

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

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

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

где A определяется механизмом рассеяния носителей заряда и в широком диапазоне не зависит от температуры. Таким образом, чтобы $R_x = const$, необходимо, чтобы концентрация не зависела от температуры. Это условие выполняется в металлах, однако из-за больших значений $n \gg 10^{27} \text{ м}^{-3}$ постоянная Холла в них оказывается очень малой $R_x \gg 6 \times 10^{-9} \text{ м}^3 \Omega \text{ Кл}$ и коэффициент преобразования даже при сравнительно больших токах i 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.

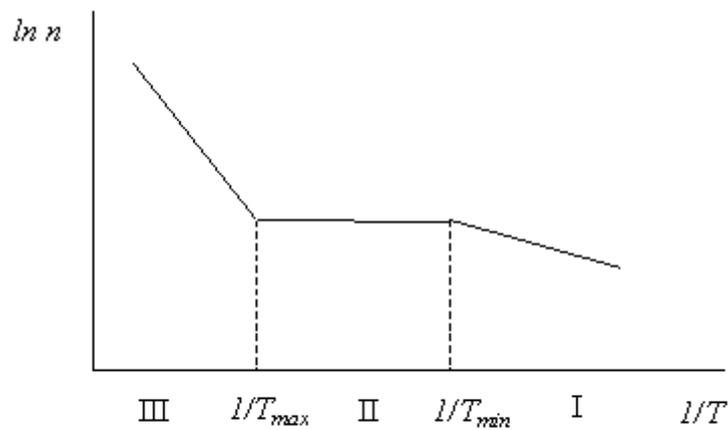


Рис. 3

Эта зависимость имеет три области:

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

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

где ΔE – ширина запрещенной зоны, k - постоянная Больцмана, T - абсолютная температура, при этом в этой области $n \gg P$. Следовательно, рабочей областью может являться только область истощения примесей.

Температура T_{min} при использовании материалов с достаточно малой энергией активации обычно не выше 50К, 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: вычисленной

по формуле (4) и $n = const$. Для определения n_0 используют выражение для концентрации собственных носителей:

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

Основные параметры полупроводниковых материалов:

Ge: $\mu = 0,36 \text{ м}^2/\text{В} \times \text{с}$, $n = 3 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$ при $T = 300\text{К}$, $\Delta E = 0,72 \text{ эВ}$.

Si: $\mu = 0,1 \text{ м}^2/\text{В} \times \text{с}$, $n = 4 \times 10^{16} \text{ м}^{-3}$ при $T = 300\text{К}$, $\Delta E = 1,1 \text{ эВ}$.

Из (5) определяем :

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

и подставляя в (2), получим концентрацию перехода от примесной области к собственной при заданной температуре T_{\max} .

$$n_0 = n_i e^{\frac{\Delta E}{2k} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_{\max}} \right)} \quad (6)$$

Для надежного выхода на горизонтальный участок концентрацию увеличивают в 100 раз, т.е.

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

где n_{TP} - требуемая рабочая концентрация.

Обычно для датчика выбирают отношение длины к ширине пластины $\frac{l}{b} \geq 3$, а толщина полупроводниковой пленки $d = 10 \text{ мкм}$. Чувствительность датчика можно повысить, увеличив ток i через датчик, однако он не должен приводить к саморазогреву датчика. Для этого плотность тока $j = \frac{i}{bd}$ не должна превышать 4 А/мм^2 , т.е. $i_{пред} = 4bd$. Генератор тока имеет предельное напряжение на выходе U_{\max} , таким образом $i_{пред} = \frac{U_{\max}}{R_{\partial}} = 4bd$, откуда сопротивление датчика не должно быть более чем

$$R_{\partial} \leq \frac{U_{\max}}{4bd} \quad (8)$$

Сопротивление датчика определяется как параметрами материала так и его размерами.

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

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

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

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

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 подсчитывают ток через датчик и коэффициент преобразования.

Порядок расчета.

1. Определяется максимальный ток нагрузки $I_{\max} = \frac{P_{\max}}{U}$ [А].
2. Выбирают длину датчика Холла : для шины $l = 0,1k$ [м], для соленоида $l = 0,1 * D$ [м], где $D = 2$ см - диаметр соленоида.
3. Выбирают ширину датчика $b = l/3$ [м].
4. Оценивают ток через датчик $i_x = 4bd$ [А], где $d \approx 10$ мкм. В данной формуле размеры берутся в миллиметрах, при этом сила тока получается в амперах.
5. Определяют величину балластного резистора $R_l = U/i_x$ [Ом] для датчика активной мощности или величину конденсатора $C \approx \frac{i_x}{U\omega}$ [Ф] и $\omega = 2 * \pi * \nu$ [рад/с] (ν – частота сети, Гц) для датчика реактивной мощности.
6. Принимают сопротивление датчика $R_d = 0,01R_1$ [Ом] или $R_d = \frac{0,01}{\omega C}$ [Ом].
7. Определяют удельное сопротивление материала датчика $\rho = \frac{R_d b d}{l}$ [Ом*м].
8. Для германия и кремния определяют требуемые концентрации для обеспечения найденного удельного сопротивления $n = l / (e * \mu * \rho)$ [м⁻³].
 $\mu_{\text{гер}} = 0,36$ м²/В*с, $\mu_{\text{крем}} = 0,1$ м²/В*с, $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.
9. Для германия и кремния определяют наименьшее значение концентрации
$$n_{\min} = 100 n_0 e^{\frac{\Delta E}{2K} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_{\max}} \right)} \quad [\text{м}^{-3}]$$

 $T_0 = 300$ К, $\Delta E_{\text{гер}} = 1,152 * 10^{-19}$ Дж, $\Delta E_{\text{крем}} = 1,760 * 10^{-19}$ Дж, $n_0(\text{гер}) = 3 * 10^{19}$ м⁻³, $n_0(\text{крем}) = 4 * 10^{16}$ м⁻³, $K = 1,38 * 10^{-23}$ Дж/К.
10. Из двух значений концентраций выбирают большее и рассчитывают постоянную Холла $R_x = \frac{1,17}{en}$, где $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.
11. Определяют в зависимости от конструкции токопровода максимальное значение $B_{\max} = \frac{\mu_0 I}{2h}$ для шины или $B_{\max} = I \frac{\mu}{l} \mu_0$ для соленоида, где $\frac{N}{l} = \frac{1}{d_{\text{пр}}}$

, $d_{np} = \sqrt{\frac{I_{max}}{\pi}}$ - диаметр провода и определяют коэффициент $K = \frac{\mu_0}{2h}$ для шины

или $K = \mu_0 \sqrt{\frac{\pi}{I_{max}}}$

12. Рассчитывают $U_{x\max} = \frac{1}{2} \frac{KR_x}{R_q d} P_{A\max}$ - для активной мощности

или $U_{x\max} = \frac{1}{2} \frac{\omega CKR_x}{d} P_{p\max}$ - для реактивной.

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

Пример расчета.

1. Определение максимального тока нагрузки, А:

$$I_{\max} = \frac{P_{\max}}{U} = \frac{250}{110} = 2.273 \text{ А}$$

2. Выбор длины датчика Холла, м:

$$L = 0.1 \cdot D = 0.1 \cdot 0.02 = 0.002 \text{ м}$$

Где рекомендовано взять D=2см

3. Выбор ширины датчика:

$$b = \frac{L}{3} = \frac{0.002}{3} = 6.667 \cdot 10^{-4} \text{ м}$$

4. Оценка тока через датчик:

$$i_x = 4 \cdot b \cdot d = 4 \cdot 0.667 \cdot 10^{-2} = 0.0267 \text{ А}$$

где d=10мкм. В данной формуле размеры берутся в миллиметрах, при этом сила тока получается в амперах

5. Для датчика реактивной мощности определяем величину ёмкости

$$C \approx \frac{i_x}{U \cdot \omega} = \frac{0.0267}{110 \cdot 2512} = 96.6 \cdot 10^{-9} \text{ Ф}$$

конденсатора:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot \nu = 2 \cdot 3.14 \cdot 400 = 2512 \text{ рад/с}$$

6. Принимаем сопротивление датчика реактивной мощности равным:

$$R_D = \frac{0.01}{\omega \cdot C} = \frac{0.01}{2512 \cdot 96.6 \cdot 10^{-9}} = 41.2 \text{ Ом}$$

7. Определяем удельное сопротивление материала датчика:

$$\rho = \frac{R_D \cdot b \cdot d}{L} = \frac{41.2 \cdot 6.667 \cdot 10^{-4} \cdot 10 \cdot 10^{-6}}{0.002} = 1.373 \cdot 10^{-4} \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

8. Определяем для германия и кремния требуемые для обеспечения найденного ρ концентрации носителей тока в М^{-3} :

$$n = \frac{1}{e \cdot \mu_{\text{гер.}} \cdot \rho} = \frac{1}{1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 0.36 \cdot 1.373 \cdot 10^{-4}} = 1.264 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3} \text{ для германия}$$

$$n = \frac{1}{e \cdot \mu_{\text{крем.}} \cdot \rho} = \frac{1}{1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 0.1 \cdot 1.373 \cdot 10^{-4}} = 4.552 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3} \text{ для кремния}$$

$$\mu_{\text{гер.}} \approx 0.36 \text{ М}^2 / \text{В} \cdot \text{с}$$

$$\mu_{\text{крем.}} \approx 0.1 \text{ М}^2 / \text{В} \cdot \text{с}$$

9. По заданному t_{max} , $^{\circ}\text{C}$ определяем для германия и кремния требуемое значение концентрации:

$$n_{TP(\text{сер.})} = 100 \cdot n_{i0} \cdot e^{\frac{\Delta E_{(\text{сер.})}}{2 \cdot K} \left(\frac{1}{T_{0(\text{сер.})}} - \frac{1}{T_{\max}} \right)} = 100 \cdot 3 \cdot 10^{19} \cdot e^{\frac{1.152 \cdot 10^{-19}}{2 \cdot 1.38 \cdot 10^{-23}} \left(\frac{1}{300} - \frac{1}{343} \right)} = 1.716 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$$

$$n_{TP(\text{крем.})} = 100 \cdot n_{i0} \cdot e^{\frac{\Delta E_{(\text{крем.})}}{2 \cdot K} \left(\frac{1}{T_{0(\text{крем.})}} - \frac{1}{T_{\max}} \right)} = 100 \cdot 4 \cdot 10^{16} \cdot e^{\frac{1.760 \cdot 10^{-19}}{2 \cdot 1.38 \cdot 10^{-23}} \left(\frac{1}{300} - \frac{1}{343} \right)} = 5.746 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$$

$$\text{где } n_{i0(\text{сер.})} = 3 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$$

$$n_{i0(\text{крем.})} = 4 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3}$$

$$T_{0(\text{сер.})} = 300 \text{ К}, \quad T_{0(\text{крем.})} = 300 \text{ К}$$

$$T_{\max} = 70^{\circ} \text{ С} = 343 \text{ К}$$

$$\Delta E_{(\text{сер.})} = 0.72 \text{ эВ} = 0.72 \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} = 1.152 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$$

$$\Delta E_{(\text{крем.})} = 1.19 \text{ эВ} = 1.1 \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} = 1.760 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$$

$$K = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$$

Принимаем в качестве материала датчика кремний.

10. Из двух значений концентраций выбираем наибольшую и по нему рассчитываем постоянную Холла:

$$R_H = \frac{1.17}{e \cdot n_{(\text{кремний.})}} = \frac{1.17}{1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 4.552 \cdot 10^{23}} = 1.606 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3 / \text{Кл}$$

11. Определяем максимальное значение магнитной индукции для длинного соленоида, навитого из провода:

$$B_{\max} = I_{\max} \cdot \frac{N}{l_c} \cdot \mu_0 = K \cdot I_{\max}$$

$$B_{\max} = I_{\max} \cdot \frac{N}{l_c} \cdot \mu_0 = 2.273 \cdot 1175 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} = 3.359 \cdot 10^{-3} \text{ Тл}$$

$$\text{где } \frac{N}{l_c} = \frac{1}{d_{\text{пров}} \cdot 10^{-3}} = \left[d_{\text{пров}} = \sqrt{\frac{I_{\max}}{\pi}} = \sqrt{\frac{2.273}{3.14}} = 0.850 \text{ мм} \right] = \frac{1}{0.850 \cdot 10^{-3}} = 1175 \text{ м}^{-1}$$

Найдём коэффициент для соленоида:

$$B_{\max} = K \cdot I_{\max}$$

$$K = \frac{B_{\max}}{I_{\max}} = \frac{3.359 \cdot 10^{-3}}{2.273} = 1.478 \cdot 10^{-3} \text{ Тл/А}$$

12. Рассчитаем $U_{\text{хmax}}$ для реактивной мощности:

$$U_{\text{хmax}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\omega \cdot C \cdot K \cdot R_{\text{с}}}{d} \cdot P_{\text{рmax}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{2512 \cdot 96.6 \cdot 10^{-9} \cdot 1.478 \cdot 10^{-3} \cdot 1.606 \cdot 10^{-5}}{10 \cdot 10^{-6}} \cdot 250 = 7.200 \cdot 10^{-5} \text{ В}$$

13. Определяем требуемый коэффициент усиления:

$$K_{\gamma} = \frac{U_{\text{выхmax}}}{U_{\text{хmax}}} = \frac{2.5}{7.200 \cdot 10^{-5}} = 34722$$

Задание

Определить основные параметры датчика мощности на основе эффекта Холла (геометрические размеры, материал, удельное сопротивление, коэффициент усиления усилителя).

Исходные данные приведены в таблице.

№ варианта	P_{\max} , Вт	Тип токопровода	Напряжение сети, В	Частота сети, Гц	t_{\max} , °C	$U_{\text{вых max}}$ В
1	10000 активная	шина, $h = 8\text{см}$	500	0	100	10
2	1500 активная	провод	220	50	140	1,5
3	1500 реактивная	провод	115	400	140	1,5
4	20000 активная	шина, $h = 8\text{см}$	380	50	60	2,0
5	3000 активная	шина, $h = 5\text{см}$	27	0	120	3,0
6	100000 активная	шина, $h = 2\text{см}$	500	0	40	10
7	1000 активная	провод	27	1000	150	1,0
8	1000 реактивная	провод	27	1000	120	1,0
9	4000 реактивная	провод	110	400	100	4,0
10	50 активная	провод	27	1000	50	5,0
11	50 активная	провод	220	50	120	5,0
12	200 реактивная	провод	220	50	140	2,0
13	700 активная	провод	110	400	100	7,0
14	60000 активная	шина $h = 8\text{см}$	600	0	120	6,0
15	200 активная	провод	220	50	150	2,0
16	250 реактивная	провод	110	400	70	2,5
17	1000	провод	220	50	90	1,0

	активная					
18	1500 реактивная	провод	380	50	100	1,5
19	800 активная	провод	110	400	140	8,0
20	15000 реактивная	шина $h = 6\text{ см}$	27	1000	150	1,5

ОФОРМЛЕНИЕ И ЗАЩИТА КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Объем пояснительной записки таков, что дает полное представление о предмете разработки, способе работы, особенностях функционирования, но не менее 20 листов машинописного текста (без рисунков, схем и графиков). Оформление записки должно соответствовать требованиям ГОСТ на оформление конструкторской документации. Текст набирается на компьютере в редакторе Word 2003-2007 для Windows. Тип шрифта Times New Roman Cyr. Размер шрифта соответствует 14 кегль, интервал 1.5.

Обозначения надписей текстового и графического материала в документах выпускных квалификационных и курсовых работ во Владимирском государственном университете

	<u>ВлГУ</u>	<u>280700</u>	<u>XX</u>	<u>X</u>	<u>XX</u>	<u>XX</u>
1.Код университета	_____	_____	_____	_____	_____	_____
2.Код специальности	_____	_____	_____	_____	_____	_____
3.Порядковый номер	_____	_____	_____	_____	_____	_____
4.Код вида работы	_____	_____	_____	_____	_____	_____
5.Порядковый номер документа	_____	_____	_____	_____	_____	_____
6.Код документа	_____	_____	_____	_____	_____	_____

1. Четырехзначный буквенный код организации-разработчика.

Для выпускных квалификационных работ Владимирского государственного университета устанавливается код из букв «ВлГУ».

2. Шестизначный код специальностей. 280700 – “Техносферная безопасность”.

3. Порядковый номер дипломника по приказу.

Данный номер присваивается только в выпускных квалификационных работах для квалификаций инженер или бакалавр. Приказ на выполнение выпускной квалификационной работы должен быть выпущен по университету. Для курсовой работы это номер по журналу.

4. Код вида работы.

В данном коде виды работ обозначаются следующими цифрами:

- дипломный проект – 1;
- дипломная работа – 2;
- курсовой проект – 3;
- курсовая работа – 4.

6. Порядковый регистрационный номер.

Пояснительной записке присваивается нулевой регистрационный номер, т.е.

запись имеет вид «00». Далее по порядку, начиная с регистрационного номера 01», нумеруются все документы графического материала (чертежи), а затем все листы иллюстрационного материала.

7. Код документа. Текстовый документ “Пояснительная записка” имеет код “ПЗ”.

Пример оформления рамки 1 листа содержания.

					<u>ВЛГУ 280700.ХХ.Х.00.ПЗ</u>			
<u>Изм</u>	<u>Лист</u>	<u>№ докум.</u>	<u>Подпись</u>	<u>Дата</u>				
<u>Разраб.</u>	<u>Провер.</u>	<u>Реценз.</u>	<u>Н. Контр.</u>	<u>Утверд.</u>	Тема курсовой работы	<u>Лит.</u>	<u>Лист</u>	<u>Листов</u>
Фамилия	Руководитель						4	xxx
						ТСБ-XXX		
Зав. кафедрой								
Зав. кафедрой								

Пример оформления рамки последующих листов пояснительной записки.

					<u>ВЛГУ 280700.ХХ.Х.00.ПЗ</u>		<u>Лист</u>
<u>Изм</u>		<u>№ докум.</u>	<u>Подп.</u>	<u>Дата</u>			xx

Далее по порядку, начиная с регистрационного номера «01», нумеруются все документы графического материала (чертежи), а затем все листы иллюстрационного материала.

7. Код документа.

Текстовый документ - пояснительная записка имеет код «ПЗ».

Графические документы имеют следующие коды:

- **сборочный чертеж** - «СБ» - документ, содержащий изображение изделия и другие данные, необходимые для его сборки и контроля;
- **чертеж общего вида** - «ВО» - документ, определяющий конструкцию изделия, взаимодействие его основных частей;
- **теоретический чертеж** - «ТЧ» - документ, определяющий геометрическую форму изделия и координаты расположения его составных частей;
- **габаритный чертеж** - «ГЧ» - документ, содержащий контурное изображение изделия, а также данные, необходимые для его установки на месте применения;
- **чертеж детали** - не имеет буквенного обозначения. На месте, отведенном для записи кода документа, ничего не пишется;
- **схема** - документ, на котором показаны в виде условных изображений или обозначений, составные части изделия и связи между ними.

Виды и типы схем установлены ГОСТ 2.701-78, код схемы состоит из буквы, которая обозначает вид схемы, и цифры, которая обозначает тип схемы, например, запись «ЭЗ» обозначает - схема электрическая принципиальная; (для справки,

наиболее часто встречающиеся виды схем имеют обозначения: электрические - Э, гидравлические - Г, пневматические - П, кинематические - К, оптические - Л, а типы схем обозначаются: структурные - 1, функциональные - 2, принципиальные - 3, соединений - 4, подключения - 5, общие - 6).

Иллюстрационные листы имеют код «ДИ».

На этих листах, как правило, представляются графики, таблицы, дизайнерские решения и другие иллюстративные и справочные материалы, которые необходимы для пояснения или более наглядного представления разработанной темы.

Формы и размеры записи в ДП предлагаемых обозначений должны соответствовать ГОСТ 2.104-6 «Основные надписи». На всех документах и иллюстративном графическом материале ДП должны быть выполнены рамки и штампы в соответствии с требованиями ГОСТ 2.104-68 «Основные надписи».

Пояснительная записка должна содержать следующее:

1. Титульный лист.
2. Задание на курсовую работу.
3. Содержание (не более двух листов).
4. Введение.
5. Основной текст пояснительной записки (любая информация про датчики тока).
6. Заключение.
7. Список использованной литературы.

Защита проекта проводится в последнюю неделю семестра. Процедура защиты включает в себя доклад по теме разработки перед аудиторией и комиссией. Ответы на вопросы присутствующих на защите студентов и преподавателей. Проставление оценки комиссией. В состав комиссии входят не менее трех преподавателей кафедры, ведущих родственные дисциплины.

Список рекомендуемой литературы.

1. Кондратьев А.С., Прияткин Н.А. Современные технологии обучения физике: Учебное пособие. – СПб.: Изд-во С.-Петербур. Ун-та, 2006. – 342с.
2. ГОСТ 16263—70 ГСИ. Метрология «Термины и определения».
3. Коротков В. П., Тайц Б. А. Основы метрологии и теории точности измерительных устройств. М.: Изд-во стандартов. — 1978.
4. Селиванов М. Н., Фридман А. Э., Кудрянова Ж. Ф. Качество измерений. — Л.: Лениздат, 1987.
5. Тюрин Н. И. Введение в метрологию. — М.: Изд-во стандартов, — 1985.
6. Шишкин И. Ф. Основы метрологии, стандартизации и контроля качества. — М.: Изд-во стандартов, — 1988.
7. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: Наука, 1969. – 576с.
8. Агемян Т.А. Основы теории ошибок для астрономов и физиков. М.: Наука, 1972. – 172с.
9. Линник Ю.В. Метод наименьших квадратов и основы теории обработки наблюдений. М.: Физматгиз, 1958. – 334с.
10. Кассандрова О.Н., Лебедев В.В. Обработка результатов наблюдений. М.: Наука, 1970. – 104 с.
11. Долинский Е. Ф. Обработка результатов измерений. — М.: Изд-во стандартов, — 1973.
12. Данилина Н.И., Дубровская Н.С., Кваша О.П., Смирнов Г.Л., Феклисов Г.И.. Численные методы. М.: Высшая школа, 1976. – 368 с.
13. Зайдель А.Н. Погрешности измерений физических величин. СПб,б «Лань», 2005. – 112 с.
14. Агапьев Б.Д., Белов В.Н., Кесаманлы Ф.П., Козловский В.В., Марков С.И. Обработка экспериментальных данных: Учеб. пособие / СПбГУ. СПб., 2001.
15. Гутер Р. С, Овчинский Б. В. Элементы численного анализа и математической обработки результатов опыта. — М.: Наука, — 1970.
16. Мудров В. И., Кушко В. Л. Методы обработки измерений. — М.: Радио и связь, — 1983.
17. Щиголев Б. М. Математическая обработка наблюдений. — М.: Физматгиз — 1962.
18. Новицкий П. В., Зограф И. А. Оценка погрешностей результатов измерений. М.: Энергоатомиздат,— 1985.
19. Румшинский Л. З. Математическая обработка результатов эксперимента. — М.: Наука, — 1971.