

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования  
«Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники»

Кафедра радиотехнических систем

**В. Н. Левкович, М. А. Комков**

***ОБНАРУЖЕНИЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПРЕДМЕТОВ  
ЧЕРЕЗ ОХРАНЯЕМЫЙ РУБЕЖ***

Методическое пособие  
к лабораторной работе по курсу  
«Защита информации в социотехнических системах»  
для студентов специальности  
I-39 01 04 «Радиоэлектронная защита информации»  
всех форм обучения

Минск 2008

УДК 621.318.38(075.8)  
ББК 31.235 я 73  
Л 37

**Р е ц е н з е н т**  
зав. кафедрой электроники БГУИР,  
канд. техн. наук, доц. С. В. Дробот

**Левкович, В. Н.**

Л 37      Обнаружение перемещения металлических предметов через охраняемый рубеж : метод. пособие к лаб. работе по курсу «Защита информации в социотехнических системах» для студ. спец. I-39 01 04 «Радиоэлектронная защита информации» всех форм обуч. / В. Н. Левкович, М. А. Комков. – Минск : БГУИР, 2008. – 20 с. : ил.  
ISBN 978-985-488-252-9

Рассмотрены основные принципы построения и функционирования устройств для обнаружения электропроводящих предметов в непроводящих средах (металлодетекторов). Приводится описание лабораторной установки для исследования импульсного металлодетектора. Дается задание для выполнения лабораторной работы, а также вопросы для самопроверки.

**УДК 621.318.38(075.8)**  
**ББК 31.235 я 73**

**ISBN 978-985-488-252-9**

© Левкович В. Н., Комков М. А., 2008  
© УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», 2008

## Цель лабораторной работы

1. Изучить принципы построения и функционирования металлодетекторов.
2. Экспериментально исследовать работу схемы металлодетектора, реализующей метод импульсной накачки.
3. Углубить практические навыки работы с современными цифровыми измерительными приборами.
4. Получить практические навыки экспериментального исследования радиоэлектронной аппаратуры.

### 1. Назначение и принципы построения металлодетекторов

Металлодетекторами (metal detector – дословно металлообнаружитель) называют устройства, решающие задачи обнаружения проводящих предметов в непроводящей среде с помощью магнитных методов. Другие названия металлодетекторов – металлоискатели, металлообнаружители.

Первые металлодетекторы были созданы в 20-е годы в США и использовались для обнаружения инструментов и готовых изделий, выносимых рабочими с заводов. Позже металлодетекторами заинтересовались военные. Во время Второй мировой войны быстро развивалась техника обнаружения металлов и было разработано специальное оборудование для поиска мин. После войны оно дешево продавалось в США, и многие люди быстро оценили возможности миноискателей при поиске зарытых сокровищ и золотых самородков.

Послевоенные металлоискатели работали на вакуумных лампах, были громоздки и потребляли много энергии. Лишь в середине 60-х годов были созданы малогабаритные, стабильные и чувствительные приборы, которые могли различать металлы и позволяли отстраняться от влияния окружающей среды.

С каждым годом расширяется область использования металлоискателей в самых различных сферах. Металлодетекторы применяются сегодня в дефектоскопии, рудной разведке, в пищевой промышленности (для предотвращения случайно-

го попадания в пищу металлических предметов различного рода), в деревообрабатывающей промышленности, в строительстве и в процессе ремонтных работ.

Особо следует выделить применение металлодетекторов в охранных структурах и криминалистике. Любой человек сталкивался с подобными приборами при входе в банк, аэропорт или ночной клуб. Прежде всего – это «ворота», при проходе через которые можно обнаружить даже незначительные металлические предметы. Принципы работы таких устройств будут рассмотрены в данной лабораторной работе.

В настоящее время задачи обнаружения проводящих предметов в непроводящей среде решаются в основном магнитными методами. Разновидностями магнитных методов являются индукционные токовихревые с различными видами намагничивающего поля и магнитоэлектрические с использованием естественного геомагнитного поля Земли или искусственного магнитного поля.

### **1.1. Металлодетекторы с гармоническим намагничиванием**

Металлический предмет, помещенный в гармоническое магнитное поле, сам становится источником переменного магнитного поля, изменяющегося с той же частотой. Характерными признаками объекта поиска являются особенности их амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик, т.е. электрофизические свойства материалов объекта поиска, а также геометрические размеры его элементов приводят к тому, что при некотором значении частоты намагничивающего поля амплитуда и фазовый сдвиг сигнала, переизлучаемого объектом поиска, будут при конкретной ориентации иметь отличия от множества предметов личного пользования.

Рассмотрим это на следующем примере. Фазовый сдвиг поля, переизлучаемого металлическим предметом, будет больше у массивного предмета, к которому ближе объект поиска, чем у тонкостенного, что более характерно для предметов личного пользования. Это связано с воздействием на намагничивающее поле реакции вихревых токов, протекающих ближе к поверхности ме-

талла. Из-за поверхностных вихревых токов с глубиной уменьшается напряженность электромагнитного поля. Эти токи оказывают экранирующее влияние на проникновение поля, что одновременно вызывает их ослабление и нарастающий с глубиной сдвиг по фазе по отношению к намагничивающему полю. Глубина проникновения электромагнитных полей и вихревых токов в металл зависит от частоты:

$$\delta \cong \frac{1}{\sqrt{2\pi f \sigma \mu}}, \quad (1.1)$$

где  $f$  – частота,  $\sigma$  – электропроводность,  $\mu$  – магнитная проницаемость.

Из формулы видно, что глубина проникновения вихревых токов в металл уменьшается с ростом частоты. Поэтому на высоких частотах массивный металлический предмет и тонкостенный (одинаковой площади и формы, изготовленные из одного и того же материала) окажутся источниками одинаковых переизлученных полей, т.е. на высоких частотах нельзя отличить массивный предмет от немассивного.

Теория метода вихревых токов дает возможность при различных частотах намагничивающего поля определить изменение активной и реактивной составляющих комплексного сопротивления катушки в зависимости от электропроводности, размера и формы предмета, помещенного в катушку. Теория базируется на уравнениях Максвелла. Из решения этих уравнений вытекает ряд формул, на основании которых можно получить семейство зависимостей комплексного сопротивления катушки от электропроводности, магнитной проницаемости материала и размеров предмета, помещенного в нее. Эти зависимости показывают, что имеется максимум реактивной составляющей комплексного сопротивления катушки, соответствующий определенным параметрам (размерам, материалу), находящегося в ней предмета.

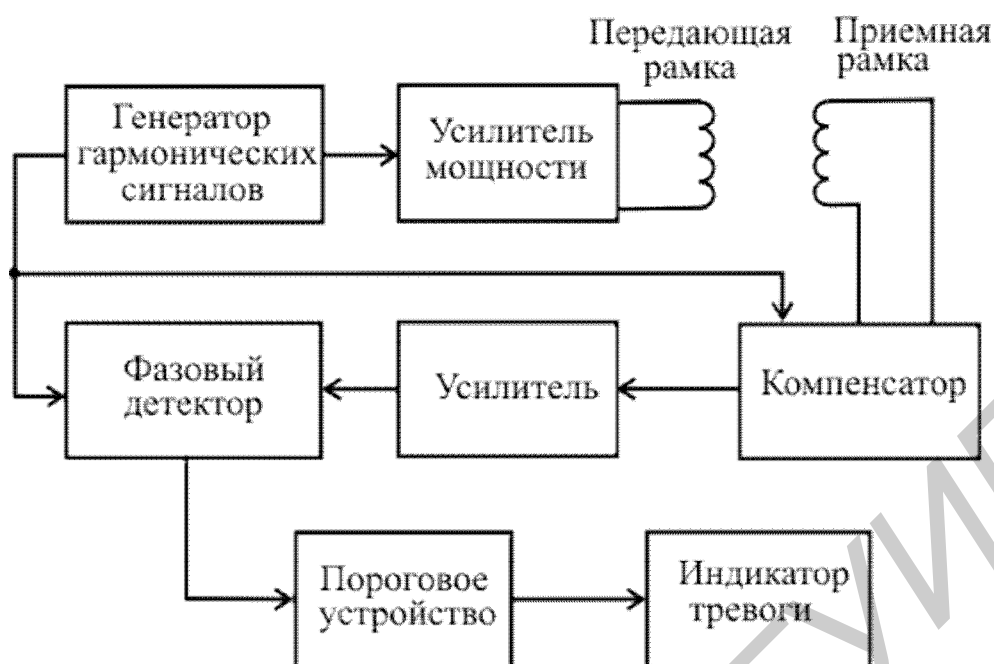


Рис. 1.1. Функциональная схема металлодетектора с гармоническим намагничиванием

На рис. 1.1 показана функциональная схема металлодетектора с использованием гармонического намагничивания. При гармоническом методе поле переизлучения объекта поиска измеряется на фоне намагничивающего поля, превышающего его по амплитуде в тысячи и миллионы раз. Поэтому в металлодетекторе используется компенсатор, устраняющий сигнал, наведенный в приемной катушке намагничивающим полем. В пороговом устройстве оцениваются амплитуда и фазовый сдвиг поля переизлучения объекта поиска, фиксируемого приемной катушкой.

**Достоинство** гармонического метода – высокая помехозащищенность, обусловленная возможностью эффективной фильтрации в диапазонах частот, отличных от рабочих.

**Недостаток** – необходимость значительной жесткости конструкций катушек и предохранения их от сотрясений и прикосновения субъектов контроля.

## 1.2. Импульсные металлодетекторы

На рис. 1.2 приведена функциональная схема металлодетектора, в котором используется импульсное намагничивание. Именно по этому принципу работает лабораторный макет. Рассмотрим более подробно принцип его действия.

Блок задержек в схеме обеспечивает проведение измерений после прекращения действия импульса возбуждающего поля.

Характерными признаками объекта поиска при использовании такого метода являются продолжительность и вид процесса затухания вихревых токов в обследуемом предмете, переносимые в сигнал, наведенный в приемной катушке переизлученным полем. В качестве критериев селекции могут использоваться как мгновенные значения переходной характеристики для различных моментов времени, так и результат их совместной обработки по специальным алгоритмам, выбранным для распознавания объекта поиска.

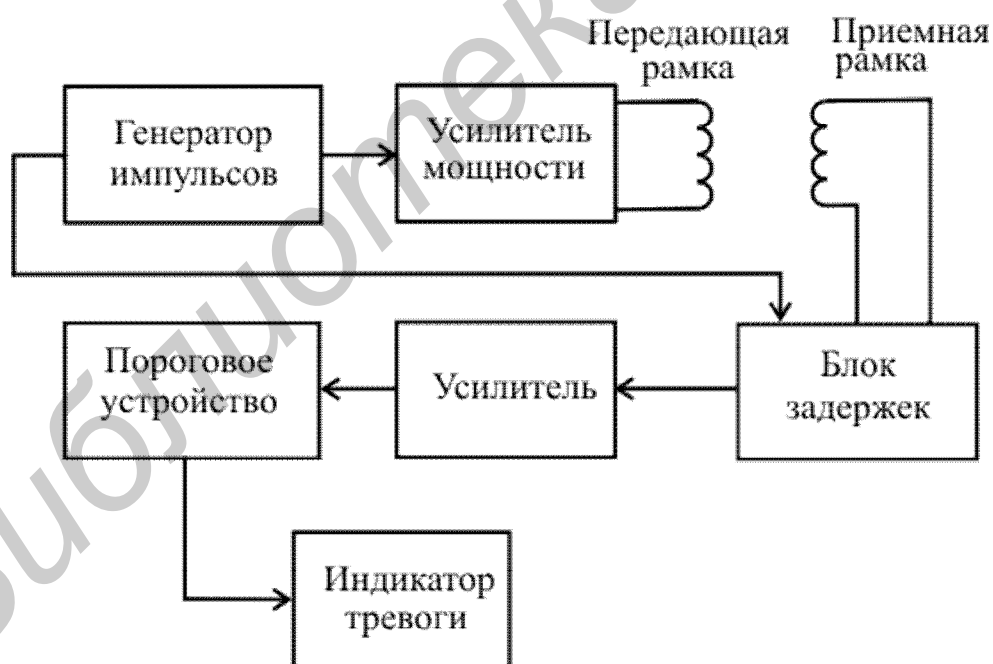


Рис. 1.2. Функциональная схема металлодетектора с импульсным намагничиванием

Теоретически можно, стробируя сколь угодно подробно переходную характеристику переизлучения, получить неограниченный объем информации об электромагнитных характеристиках объекта поиска. Кроме того, в момент измерения намагничивающее поле выключено и не создает помех для оценки поля переизлучения. Однако сложности технической реализации метода переходных процессов существенно снижают его обнаруженческие и селективные возможности. При применении этого метода идеальным является намагничивающее поле, изменяющееся по прямоугольному закону. Однако на практике получить его в настоящее время невозможно. Для получения максимальной напряженности намагничивающего поля при ограниченных размерах (массе) катушки и энергозатратах активное сопротивление катушки стараются минимизировать (не более единиц или десятков ом). Срез импульса намагничивающего тока зависит от быстродействия силовых ключей, разрывающих цепь этого тока, и еще в большей степени от условий отсутствия затухающих колебаний намагничивающего поля после выключения тока. Кроме постоянной времени намагничивающей цепи необходимо учитывать и постоянную времени приемной катушки, воспринимающей поле переизлучения объекта. Для предотвращения возникновения затухающих колебаний эта постоянная также должна быть не менее некоторого значения.

Важным **преимуществом** метода переходных процессов перед гармоническим является отсутствие высоких требований к жесткости конструкции катушек и относительная независимость от малых перемещений и сотрясений. Также принципиальным достоинством данного метода является возможность произвольного расположения приемной и излучающей рамок, так как прямое проникновение излучаемого сигнала в приемную рамку и действие на нее отраженного сигнала разнесены во времени. В принципе, одна рамка может исполнять роль как приемной, так и излучающей, однако в данном случае гораздо сложнее будет развязывать высоковольтные выходные цепи генератора импульсов тока и чувствительные входные цепи.



К недостаткам импульсных металлодетекторов следует отнести сложность реализации на практике дискриминации объектов по типу металла, высокие технические требования к аппаратуре генерации и коммутации импульсов тока и напряжения большой амплитуды и худшая, чем у гармонического метода, помехозащищенность.

Для уменьшения вышеописанных недостатков в современных металлодетекторах, использующих электромагнитные методы обнаружения, находит применение дискретно-пространственное сканирование излучающих и приемоизмерительных операций (использование многорамочных систем). В случае распределения предметов личного пользования по высоте такое построение обеспечивает анализ переизлученных полей по каждой зоне, а не по совокупному полю, переизлученному всеми объектами. Измерение и анализ индуцированного сигнала осуществляется в каждой зоне отдельно и поочередно в разные моменты времени. Переизлучают только предметы, попавшие в ту или иную зону. Совместная обработка сигналов со всех каналов в некоторых случаях позволит отстроиться даже от металлических частей ручной клади.

На рис. 1.3 показаны линии магнитной индукции, создаваемые плоской катушкой индуктивности, выполненной в виде рамки. Применение такой конструкции катушки в качестве генераторной рамки металлодетектора имеет один существенный недостаток. Пусть предмет поиска выполнен в виде тонкой пластины и проносится параллельно плоскости  $XOZ$ . Над центральной частью катушки практически отсутствуют линии индукции, которые пронизывали бы такую пластину под прямым углом, что является необходимым условием для возникновения вихревых токов в ней. Следовательно, обнаружение в таком случае будет затруднительно либо вовсе невозможно. Пластина, проносимая параллельно плоскостям  $XOY$  и  $YOZ$ , будет пронизываться линиями поля  $Z_K$  и  $X_K$  и может быть обнаружена.

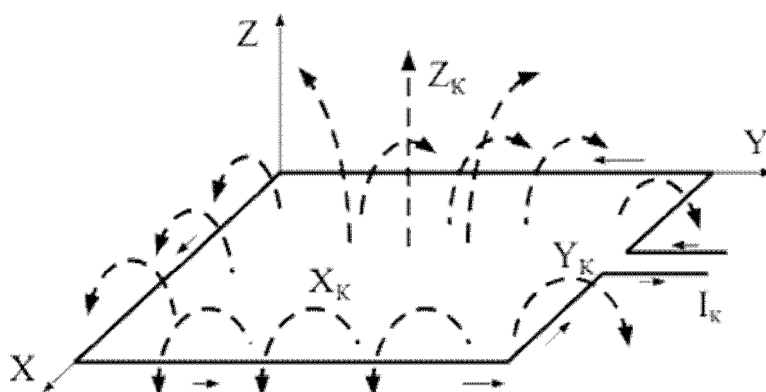


Рис. 1.3. Линии магнитной индукции катушки индуктивности с током

Чтобы обнаруживать тонкие предметы любой ориентации, следует использовать две генераторные рамки. Магнитное поле с «недостающим» вектором индукции  $Y_k$  (см. рис. 1.3) формируется при помощи генераторной рамки с перекрученной в виде «восьмерки» катушкой. Линии магнитной индукции такой рамки показаны на рис. 1.4. Следовательно, для достоверного обнаружения металлодетектор должен содержать две приемные, две генераторные рамки и два тракта обработки сигнала. В данной лабораторной работе используется только одна пара рамок и один тракт обработки сигнала, т.к. для рассмотрения принципов работы металлодетекторов этого достаточно.

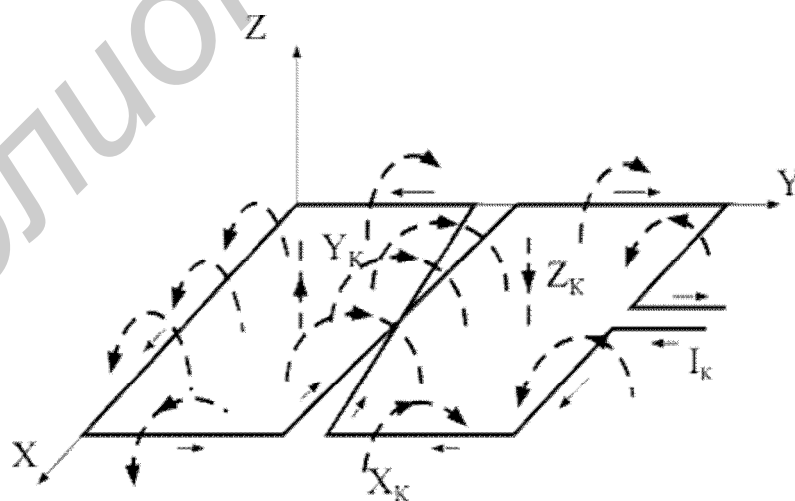


Рис. 1.4. Линии магнитной индукции катушки индуктивности с током, перекрученной в виде «восьмерки»

## 2. Структурная и функциональная схемы лабораторного макета

На рис. 2.1 приведена структурная схема лабораторного макета. Управление формирователем импульсов и схемой стробирования принимаемого сигнала, а также его оцифровку и обмен данными и командами с персональным компьютером (ПК) осуществляет микроконтроллер (МК).

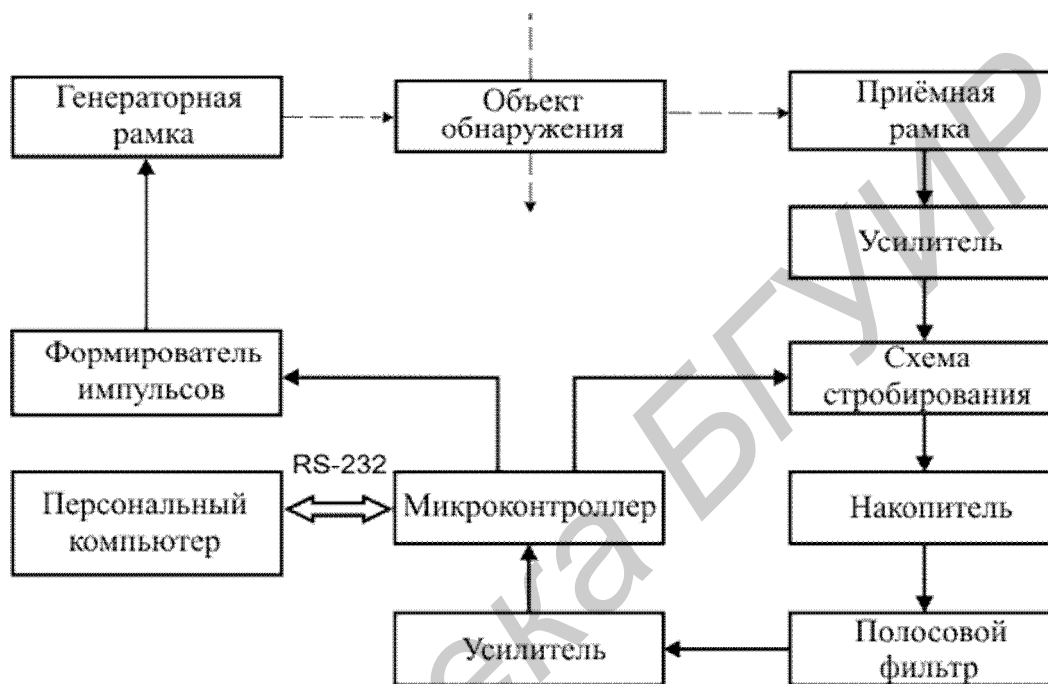


Рис. 2.1. Структурная схема лабораторного макета

На рис. 2.2. приведена функциональная схема лабораторного макета. В состав устройства входит генераторная, приемная рамка, канал формирования импульсов и канал обработки полезного сигнала. Микроконтроллер формирует импульсы, которые с выходов усилителей мощности, включенных по мостовой схеме, подаются на генераторную рамку. Сканирующее магнитное поле создает в обнаруживаемом металлическом предмете вихревые токи, порождающие переизлученное магнитное поле. Переизлученное магнитное поле наводит в приемной рамке полезный сигнал. Так как достоверно известна фаза принимаемого сигнала и его временное положение, то для повышения чувствительности устройства применяется накопление сигнала. Накопление реализовано с помощью схемы стробирования и накопителя (см. рис. 2.1). Функционально схема стро-

бирования представляет собой два аналоговых ключа, а накопитель – интегрирующую RC-цепочку (см. рис. 2.2). Управление ключами и формирование временных задержек между импульсами тока в генераторной рамке и стробами принимаемого полезного сигнала осуществляет микроконтроллер. В генераторной рамке формируются разнополярные импульсы тока для исключения остаточной намагниченности объектов обнаружения, пропущенных через рабочую зону металлодетектора. Напряжение на накопителе стремится к уровню обнаруживаемого сигнала на интервале строба. Постоянная времени интегрирующей RC-цепи определяет количество накапливаемых импульсов. После усиления и фильтрации отклик от канала обработки сигнала подается на МК для оцифровки и передачи его в ПК. Непосредственно МК нельзя соединить с ПК через интерфейс RS-232, так как уровни логических сигналов у МК 5 В – лог. «1», 0 В – лог. «0», а у интерфейса RS-232 –12 В – лог. «1», +12 В – лог. «0». Для согласования ставится интерфейсный преобразователь, выполненный на микросхеме AD232 фирмы Analog Devices.

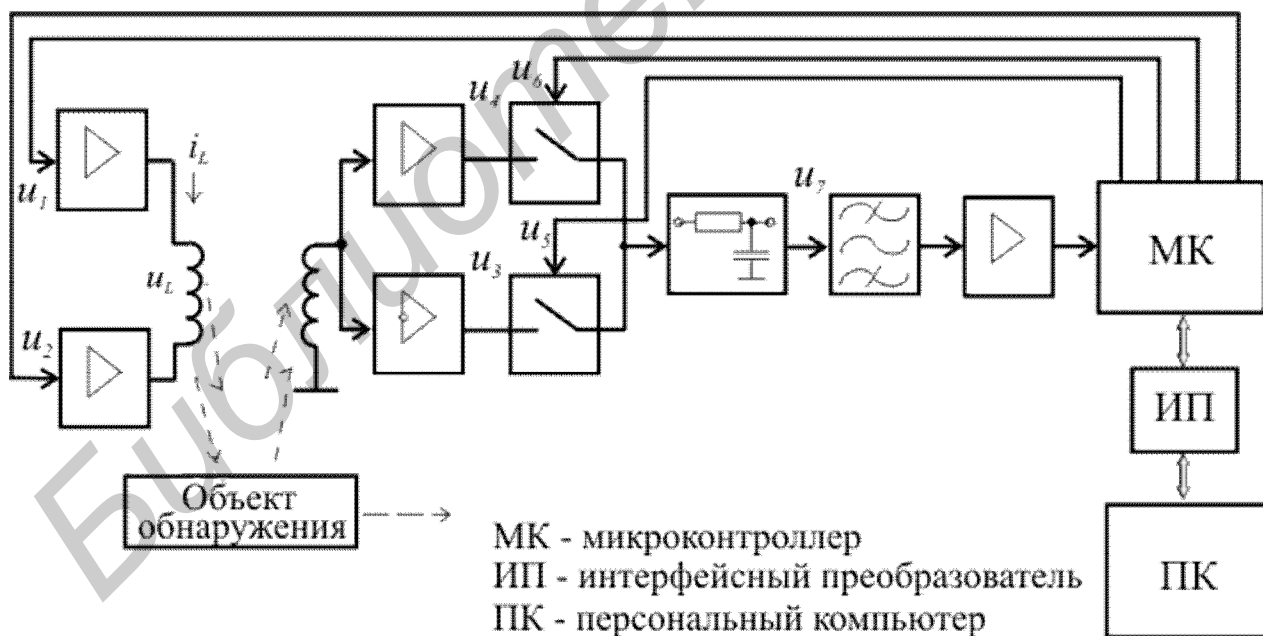


Рис. 2.2. Функциональная схема лабораторного макета металлодетектора

На рис. 2.3 представлены временные диаграммы в контрольных точках функциональной схемы лабораторного макета металлодетектора.

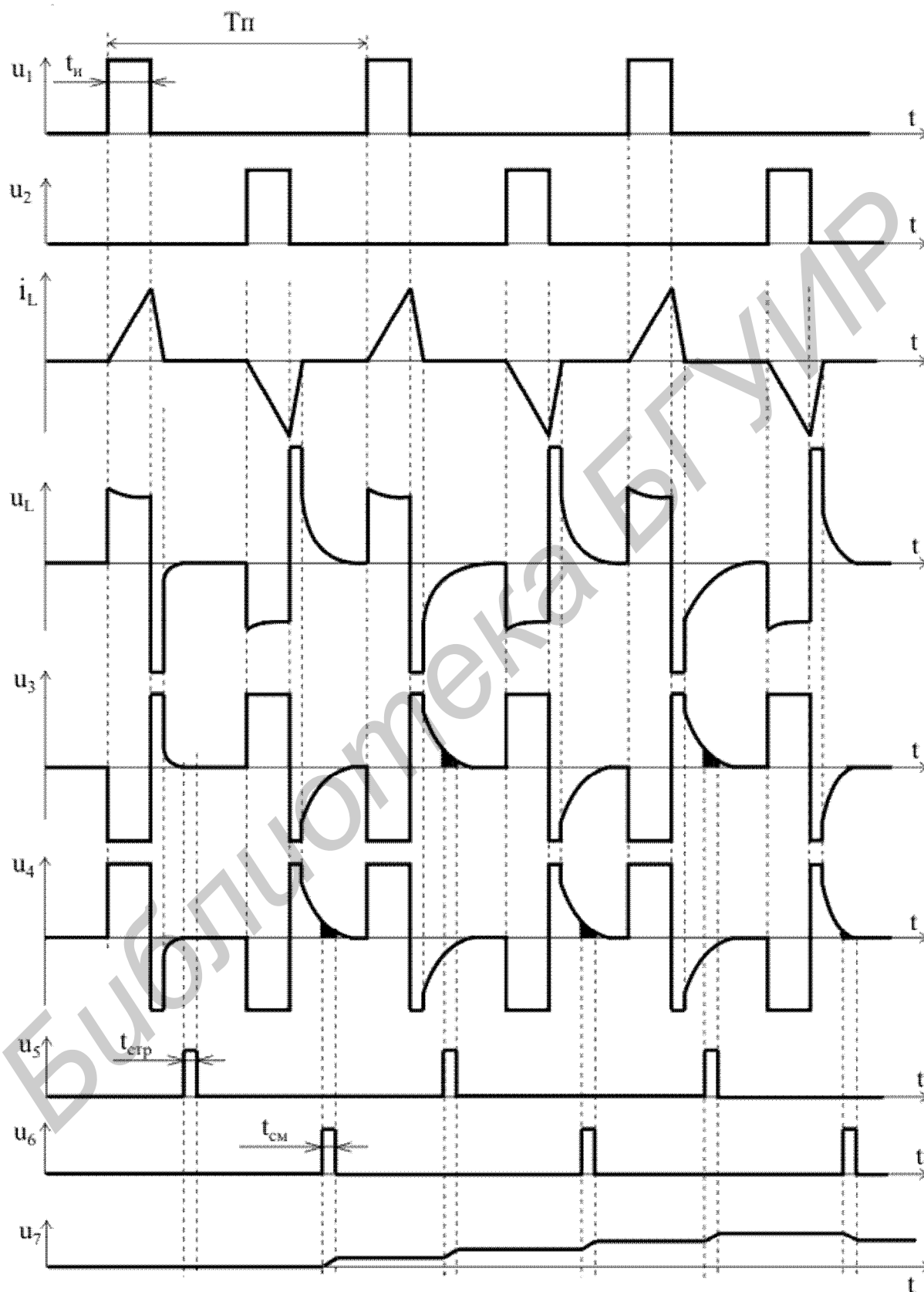


Рис. 2.3. Временные диаграммы работы макета металлодетектора

### 3. Принципиальная электрическая схема лабораторного макета

Принципиальная электрическая схема лабораторного макета приведена на рис. 3.1. Рассмотрим её подробнее. Центральное место в схеме занимает микроконтроллер DD1 Atmega16 фирмы Atmel [3]. Он работает на частоте 16 МГц, имеет производительность 16 миллионов операций в секунду и выполняет инструкцию за один такт. В его состав также входит 10-битный аналого-цифровой преобразователь. Для связи с персональным компьютером используется микросхема DD2 (ADM232) [4]. Она служит для преобразования уровней TTL-сигналов в уровни RS-232 и наоборот. Усилители мощности собраны на элементах: DA2, DA5, VD1, VD2, R9, R10, VT1-VT4, R17, R18, C1, C9. Основной усилитель мощности собран по мостовой схеме на мощных КМОП-транзисторах VT1-VT4, которые работают в ключевом режиме. Использование мостовой схемы позволяет формировать в излучающей катушке импульсы переменной (положительной и отрицательной) полярности. Резисторы в цепи затворов необходимы для ограничения динамических токов затворов и предотвращения выхода из строя транзисторов. На микросхемах DA2, DA5 (IR2101) [5] собраны драйверы выходных транзисторов. Особенность драйверов в том, что они имеют малые выходные сопротивления. Это позволяет быстро перезаряжать входные емкости управляемых транзисторов и обеспечивать их быстрые переходы между открытыми и закрытыми состояниями. Далее сигнал, принятый приемной рамкой, поступает на два усилителя, собранных на микросхеме DA1 (NE5532). На DA1.1 собран неинвертирующий усилитель, коэффициент передачи которого определяется выражением

$$K = 1 + \frac{R_6}{R_3}. \quad (3.1)$$

На DA1.2 собран инвертирующий усилитель, коэффициент передачи которого определяется выражением

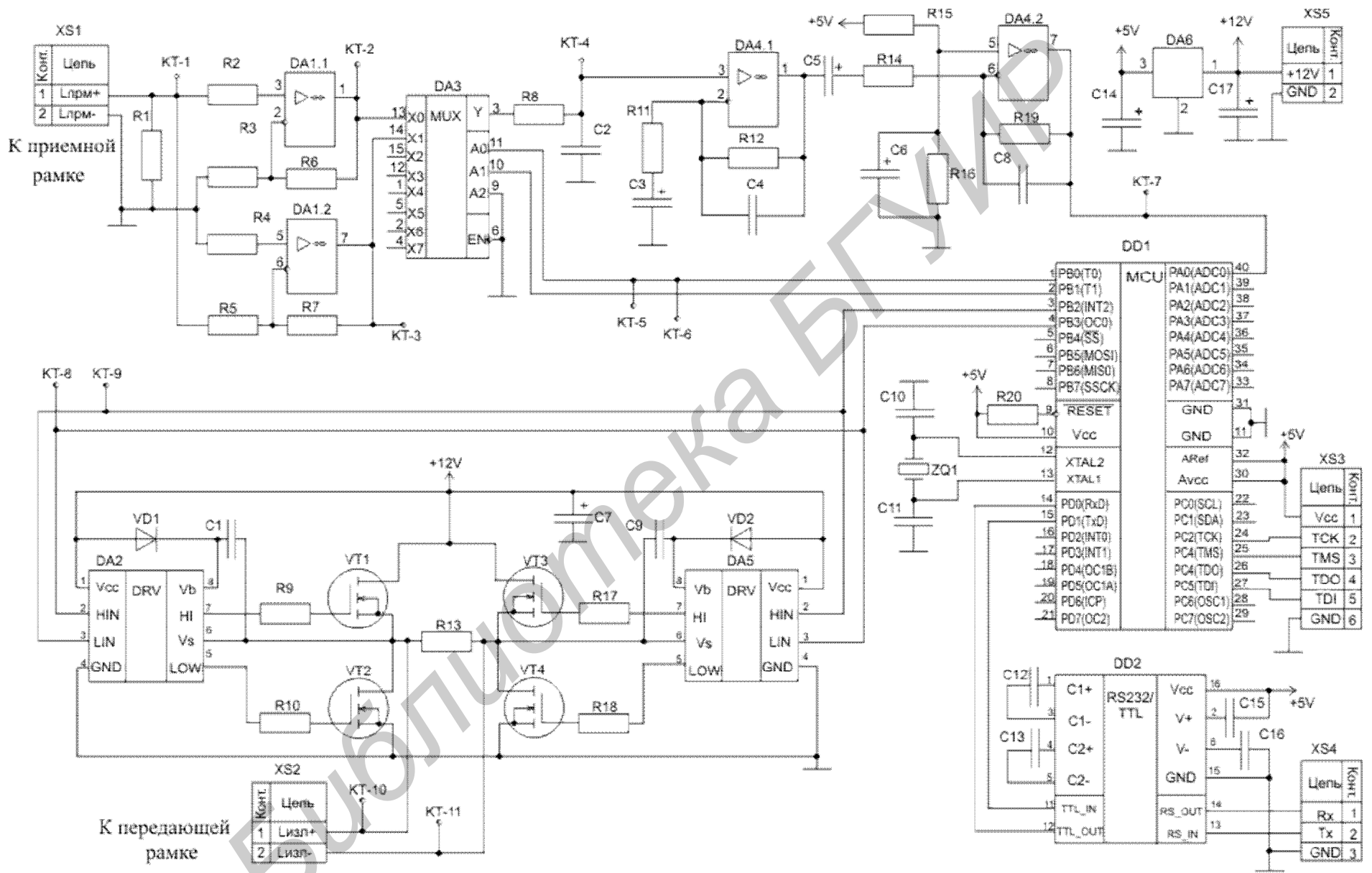


Рис. 3.1. Принципиальная электрическая схема лабораторного макета

$$K = -\frac{R7}{R5}. \quad (3.2)$$

В схеме обеспечено равенство коэффициентов усиления обоих каскадов.

Резисторы R2 и R4 служат для предотвращения «разбалансировки» входов операционных усилителей. Резистор R1 необходим для снижения добротности приемной рамки и подавления возникающих колебательных переходных процессов.

Далее сигнал с выходов этих усилителей поступает на схему стробирования, функцию которого выполняет мультиплексор на микросхеме DA3 (C4051) [6] под управлением микроконтроллера. По командам с микроконтроллера она подключает соответствующие выходы операционных усилителей к накопителю, который собран на элементах R8, C2 и представляет собой интегрирующую RC-цепочку.

Постоянная времени  $\tau$  интегрирующей цепи R8, C2, на которой происходит накопление полезного сигнала, должна быть согласована с длительностью импульса сигнала, который равен ширине окна измерения  $t_w$ , и количеством накапливаемых импульсов N.

$$\phi = R8 \cdot C2 = t_w \cdot N. \quad (3.3)$$

Так как металлодетектор должен реагировать только на движущиеся объекты и не замечать «фон» от постоянно присутствующих в поле обнаружения металлических предметов, постоянная составляющая полезного сигнала не должна усиливаться приемным трактом. В этих целях последовательно R11 и R15 включены конденсаторы соответственно C3 и C5. Постоянные времени цепей R11 C3 и R15 C5 определяют нижнюю границу полосы пропускания усилителя и, следовательно, минимальную скорость движения  $u_{\min}$  объекта контроля через рабочую зону металлодетектора, при которой еще происходит его обнаружение. Постоянную времени  $\tau$  этих цепей можно оценить по формуле (3.4).



$$\tau = 3t_{\text{пр}} = 3 \frac{a_{\text{пр}}}{v_{\text{min}}}, \quad (3.4)$$

где  $a_{\text{пр}}$  – ширина рабочей зоны металлодетектора,  $t_{\text{пр}}$  – длительность импульса, формируемого на выходе накопителя, при проносе через рабочую зону металлодетектора обнаруживаемого предмета с минимальной скоростью.

Для предотвращения возбуждения на высоких частотах усилительных каскадов на DA4.1 и DA4.2 параллельно резисторам R12 и R19 включены конденсаторы C4 и C8. Далее усиленный отклик подается на вход микроконтроллера для его оцифровки и передачи на ПК.

#### 4. Интерфейс управляющей программы

После загрузки управляющей программы на экран монитора компьютера выводится панель управления, внешний вид которой показан на рис. 4.1.

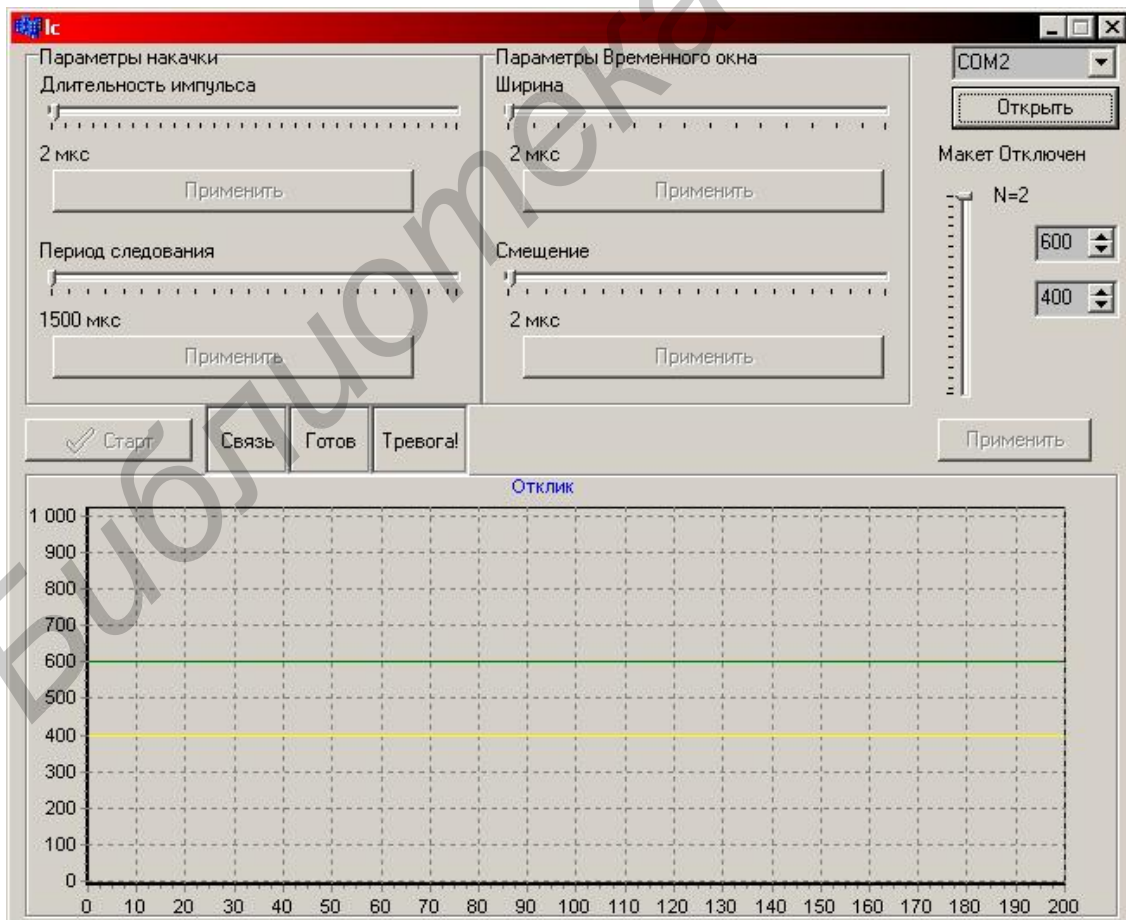


Рис. 4.1. Внешний вид панели управления программы

Перед началом работы произвести подключение макета к СОМ-порту компьютера и включить его питание.

Далее надо выбрать номер порта, к которому подключен макет, и нажать кнопку «Открыть». Если макет подключен и исправен, то появится сообщение «Макет подключен» и разблокируются остальные органы управления. Ниже, под кнопкой «Открыть» находятся окна для ввода верхнего и нижнего порога обнаружения, которые отображаются зеленой и желтой линией соответственно. Чтобы изменить параметры импульсов, необходимо сначала изменить положение соответствующего регулятора, а затем нажать кнопку «Применить». После этого должен мигнуть индикатор «Связь» – это означает, что макет принял команду.

Для визуализации сигнала необходимо нажать кнопку «Старт», оцифрованный сигнал будет отображаться в виде графика. Повторно нажав кнопку «Старт», можно остановить процесс и детально изучить отклик.

Индикатор «Готов» загорается красным цветом, когда макет готов к обнаружению предметов. После изменения параметров работы макета требуется некоторое время на установление переходных процессов в схеме.

При обнаружении выхода отклика за пределы порогов обнаружения загорается индикатор «Тревога» и издается звуковой сигнал.

## **5. Лабораторное задание**

1. Изучить принципы построения работы импульсного металлодетектора.
2. Подготовить цифровой осциллограф «BORDO» к съему осциллограмм в контрольных точках.
3. Установить длительность импульса накачки 100 мкс, период следования импульсов 2000 мкс, ширину временного окна 10 мкс, смещение временного окна 10 мкс и число накапливаемых импульсов  $N=10$ . Произвести съём осциллограмм в контрольных точках при наличии металлической пластины в зоне обнаружения и без неё.

4. Исследовать зависимость величины отклика на выходе схемы обнаружения от ориентации предмета относительно рамок. Для этого пронести металлическую пластину сначала параллельно рамкам, а потом перпендикулярно рамкам. Зафиксировать эпюры напряжений.

5. Исследовать зависимость величины отклика на выходе схемы обнаружения от скорости перемещения предмета.

6. Исследовать влияние ширины временного окна на чувствительность прибора. Для этого провести эксперименты при значениях от 10 мкс до 150 мкс. Найти значение ширины окна, при котором металлодетектор перестает обнаруживать предмет.

7. Исследовать влияние задержки строба анализа на уровень выходного сигнала в схеме обнаружения. Для этого провести эксперименты при длительности строба 10 мкс для значений задержки строба от 1 мкс до 100 мкс. Найти значение, при котором металлодетектор перестает обнаруживать предмет.

8. Подготовить отчет по работе, который должен содержать: титульный лист, функциональную схему макета, осциллограммы в контрольных точках, отклики при различных параметрах измерений и выводы.

## **6. Контрольные вопросы**

1. Назначение и сферы применения металлодетекторов.

2. Поясните принцип работы металлодетектора с импульсным намагничиванием.

3. Почему необходимы две пары приемных и передающих рамок и как они должны располагаться?

4. Почему исследуемый металлодетектор не реагирует на неподвижные металлические предметы?

## Литература

1. Щедрин, А. И. Металлоискатели для поиска кладов и реликвий / А. И. Щедрин, И. Н. Осипов. – М. : Радио и связь; Горячая линия – Телеком, 2000. – 192 с.
2. Щедрин, А. И. Новые металлоискатели для поиска кладов и реликвий / А. И. Щедрин. – М. : Горячая линия – Телеком, 2003. – 176 с.
3. 8-bit Microcontroller with 16K Bytes In-System Programmable Flash ATmega16 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.atmel.ru>.
4. High-Speed, 5 V, CMOS RS-232 Drivers/Receivers [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.analog.com>.
5. Data Sheet No. PD-6.043C, IR2101 High And Low Side Driver [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.irf.com>.
6. Single 8-Channel Analog Multiplexer/Demultiplexer CD4051 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.fairchildsemi.com>.

Учебное издание

**Левкович** Василий Николаевич  
**Комков** Максим Александрович

**ОБНАРУЖЕНИЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПРЕДМЕТОВ  
ЧЕРЕЗ ОХРАНЯЕМЫЙ РУБЕЖ**

Методическое пособие  
к лабораторной работе по курсу  
«Защита информации в социотехнических системах»  
для студентов специальности  
I-39 01 04 «Радиоэлектронная защита информации»  
всех форм обучения

Редактор Т. Н. Крюкова  
Корректор М. В. Тезина

---

Подписано в печать 19.02.2008.  
Гарнитура «Таймс».  
Уч.-изд. л. 0,8.

Формат 60×84 1/16.  
Печать ризографическая.  
Тираж 100 экз.

Бумага офсетная.  
Усл. печ. л. 1,4.  
Заказ 658.

---

Издатель и полиграфическое исполнение: Учреждение образования  
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»  
ЛИ №02330/0056964 от 01.04.2004. ЛП №02330/0131666 от 30.04.2004.  
220013, Минск, П. Бровки, 6