УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

МГТУ им. Н.Э. БАУМАНА



# ПРИКЛАДНАЯ МЕХАНИКА И ОСНОВЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ

## Исследование параметров оптических энкодеров



BAUMANPRESS
ИЗДАТЕЛЬСТВО
МГТУ им. Н.Э. БАУМАНА

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)»

# Прикладная механика и основы конструирования

## Исследование параметров оптических энкодеров

Учебно-методическое пособие

Под редакцией В.А. Городничева

Москва
ИЗДАТЕЛЬСТВО
МГТУ им. Н.Э. Баумана
2025

УДК 681.508
ББК 34.942
П75

Издание доступно в электронном виде по адресу
https://press.bmstu.ru/catalog/item/8473/

Факультет «Радиоэлектроника и лазерная техника»
Кафедра «Элементы приборных устройств»

*Рекомендовано Научно-методическим советом*
*МГТУ им. Н.Э. Баумана в качестве учебно-методического пособия*

*Рецензент*
канд. техн. наук *Ю.Н. Жигулёвцев*

Авторы:
*А.Н. Викулов, А.Р. Кадырбаева, А.В. Кувшинов,*
*М.Б. Михайловская, А.А. Патрикеева*

П75 **Прикладная механика и основы конструирования. Исследование параметров оптических энкодеров**: учебно-методическое пособие / [А. Н. Викулов и др.]; под ред. В. А. Городничева. — Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2025. — 77, [1] с.: ил.

ISBN 978-5-7038-6569-9

Приведены методы измерения угла поворота, абсолютного положения, частоты и направления вращения вала с помощью оптических энкодеров. Отмечены различия при определении параметров между инкрементным энкодером при отсутствии и наличии нулевого канала, а также абсолютными энкодерами с двоичной кодировкой и кодировкой Грея.

Для студентов МГТУ им. Н.Э. Баумана, изучающих дисциплину «Прикладная механика и основы конструирования».

УДК 681.508
ББК 34.942

*Уважаемые читатели! Пожелания, предложения, а также сообщения о замеченных опечатках и неточностях Издательство просит направлять по электронной почте: press@bmstu.ru*

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2025
© Оформление. Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2025

ISBN 978-5-7038-6569-9

## Предисловие

Учебно-методическое пособие «Прикладная механика и основы конструирования. Исследование параметров оптических энкодеров» подготовлено в соответствии с содержанием дисциплины «Прикладная механика и основы конструирования» и содержит методические указания для проведения лабораторной работы.

**Цель** лабораторной работы — изучение основных принципов работы оптических энкодеров, а также способов измерения таких параметров, как частота и направление вращения, угол поворота и абсолютное положение вала с помощью оптических энкодеров различных типов.

**Задачи лабораторной работы**

1. Изучение особенностей конструкции дисков инкрементного и абсолютного энкодеров.

2. Освоение принципов измерения параметров вращательного движения с помощью оптических энкодеров различных типов.

3. Применение полученных навыков для экспериментального определения частоты и направления вращения, угла поворота и абсолютного положения вала с помощью инкрементного энкодера и абсолютных энкодеров с двоичным кодом и кодом Грея.

**План проведения лабораторных занятий** включает в себя:

1) освоение теоретической части;

2) предварительное изучение порядка выполнения работы;

3) непосредственное выполнение эксперимента в лаборатории на основе представленных указаний;

4) освоение и выполнение расчетов, представленных в экспериментальной и теоретической частях учебно-методического пособия;

5) графическое оформление результатов расчетов и их анализ.

Контроль полученных знаний и компетенций осуществляется посредством защиты лабораторной работы при наличии отчета, оформленного в соответствии с приведенными требованиями.

# 1. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОПТИЧЕСКИХ ЭНКОДЕРОВ

## 1.1. Общие положения

***Энкодером*** называется измерительный преобразователь параметров вращения детали, как правило, вала редуктора или электродвигателя. Измеряемые с помощью энкодера параметры: частота и направление вращения, угол поворота и абсолютное положение вала. С помощью энкодера происходит преобразование параметров в цифровой сигнал, который подается на устройство индексации. Для обозначения энкодеров также используются термины ***преобразователь угловых перемещений*** и ***датчик угла поворота*** (ДУП).

Энкодеры различают по принципу действия и по способу выдачи информации. По принципу действия энкодеры бывают оптические, магнитные, механические, индуктивные и резистивные. По способу выдачи информации — ***инкрементные*** (накапливающие; также в литературе научно-популярного характера встречается вариант перевода — ***инкрементальные***) и ***абсолютные*** (позиционные).

Из всех типов энкодеров оптические являются одними из самых распространенных и широко представленных на рынке. Это связано с высокой точностью данных устройств, разнообразием их моделей и конструктивных исполнений, а также совместимостью со многими видами промышленного оборудования. Энкодеры применяются в следующих областях: машиностроение, станкостроение, приборостроение; горнодобывающая промышленность и металлургия; промышленные измерительные приборы; ЖКХ; автомобилестроение и транспортная отрасль; компьютерная отрасль; лабораторные и полевые исследования; системы автоматического управления.

## 1.2. Принцип работы оптического энкодера

Принцип работы оптического энкодера проиллюстрирует рис. 1.1. Считывающая часть энкодера состоит из трех компонентов: групп источников *1* и приемников *3* света и тонкого оптического диска *2*. Поверхность оптического диска может состоять из прозрачных и непрозрачных участков (рис. 1.1, *а*), либо на нее могут быть нанесены отражающие и неотражающие метки (рис. 1.1, *б*).

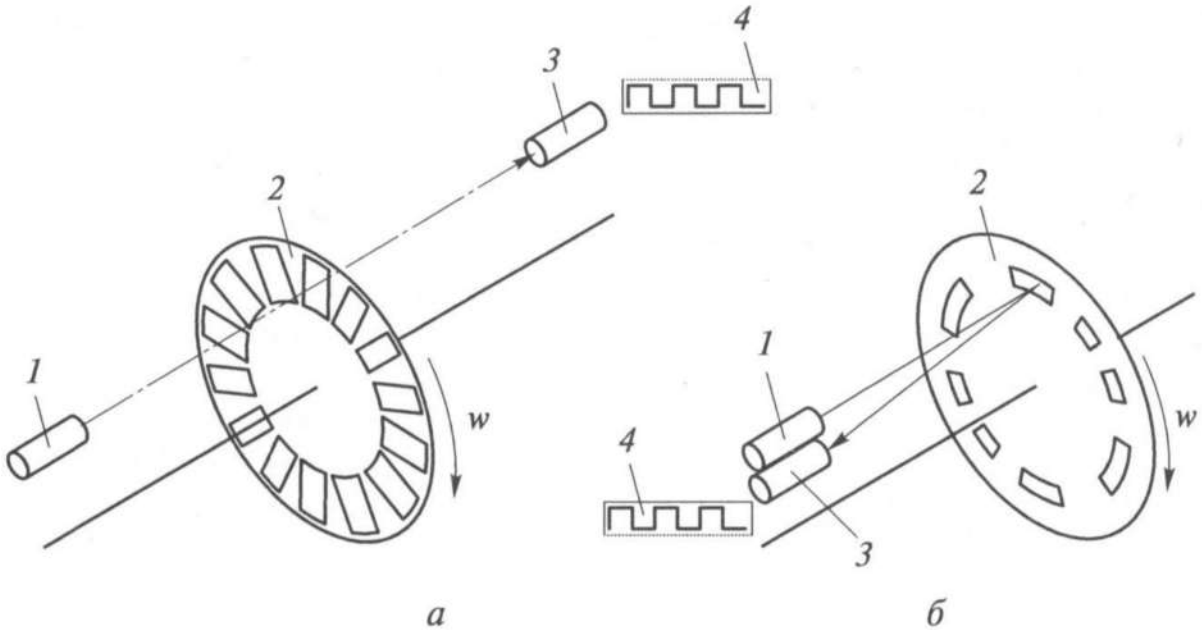



**Рис. 1.1.** Принцип работы оптического энкодера:
*а* — конструкция с прорезями; *б* — конструкция с отражающими метками; *1* — группа источников света; *2* — оптический диск; *3* — группа приемников света; *4* — выходной сигнал

В первой конструкции (см. рис. 1.1, *а*) свет, посылаемый источником, проходя через прорезь, попадает на приемник, на котором при попадании на него света появляется электрическое напряжение, наличие которого интерпретируется как логическая единица. Если же свет от источника блокируется непрозрачной поверхностью диска, то он не попадает на приемник, и напряжение на нем отсутствует, что интерпретируется как логический ноль. Таким образом, чередование прозрачных и непрозрачных участков диска при его вращении формирует на приемнике периодический выходной сигнал прямоугольной формы *4* (см. рис. 1.1).

Во второй конструкции (см. рис. 1.1, *б*) вместо преграды пути света используется принцип отражения. На оптический диск нанесены отражающие (как правило, белые) и неотражающие (как правило, черные) метки. Свет, падая на отражающую метку, отражается от нее на приемник, на котором появляется сигнал. Неотражающая метка поглощает свет, вследствие чего он не попадает на приемник, поэтому сигнал на нем будет отсутствовать. Чередование меток при вращении диска приводит к формированию аналогичного периодического сигнала прямоугольной формы на выходе (см. рис. 1.1, поз. *4*).

На поверхность диска энкодера может быть нанесено несколько полос прозрачных или отражающих элементов. Такие полосы называют ***дорожками*** или ***линиями*** диска.

В качестве источников света в энкодерах, как правило, используют светодиоды. Приемниками света могут служить фотодиоды или фототранзисторы. Электронное устройство, состоящее из свето- и фотодиода (или фототранзистора) и использующее световую энергию для передачи сигнала, называют ***оптической парой*** (сокр. ***оптопарой***) или ***оптроном***. Оптическую пару энкодера, которая генерирует выходной сигнал, называют ***каналом***. Как правило, за каждой дорожкой на диске закреплена своя оптопара, т. е. свой уникальный канал. Каналы принято обозначать заглавными латинскими буквами в алфавитном порядке: *A*, *B*, *C* и т. д. Также встречаются варианты обозначения каналов с указанием битовой разрядности: *Q*1, *Q*2, *Q*4, *Q*8 и т. д.

График сигналов на каналах, который при вращении диска представляет собой бесконечную последовательность импульсов прямоугольной формы, называется ***циклограммой***.

## 1.3. Инкрементный энкодер

Инкрементный (накапливающий) энкодер измеряет параметры диска с помощью генерации импульсного сигнала только при его вращении. Инкрементным энкодером могут быть измерены угол поворота, частота и направление вращения, но не во всех случаях точно определяется абсолютное положение вала.

Для определения частоты вращения с помощью инкрементного энкодера достаточно одной дорожки на оптическом диске и связанного с ней канала. Принцип определения частоты вращения представлен на рис. 1.2. Одна дорожка содержит $n$ отражающих меток и столько же неотражающих участков. Число меток $n$ зависит от конкретного энкодера и равно числу периодов. Время, за которое диск поворачивается на одну отражающую и одну неотражающую метку, называется периодом $T$. За полный оборот (за время $t_{об}$) диск будет проходить $n$ таких периодов. Таким образом, подсчитывая число периодов, можно определить, сколько оборотов совершил диск.

Для определения угла поворота также пользуются числом пройденных периодов (см. рис. 1.2). Угол, который диск проходит за один период, будет составлять $(360/n)°$. Умножая это значение

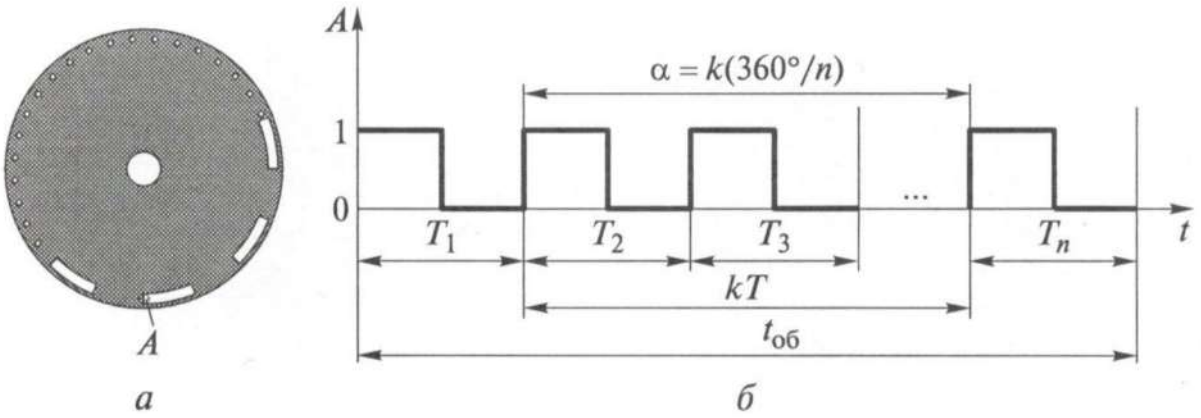



**Рис. 1.2.** К определению частоты вращения и угла поворота по циклограмме инкрементного энкодера:
*а* — оптический диск; *б* — циклограмма; *A* — расположение считывающей оптопары канала

на число подсчитанных периодов $k$, можно определить угол $\alpha$, на который повернулся диск.

Для определения направления вращения требуется наличие второго канала, сигнал которого имеет разность фаз с первым. Она может создаваться путем определенного расположения в пространстве второй оптической пары относительно первой. Однако чаще всего на диск энкодера наносят вторую дорожку со своим каналом, штрихи которой сдвинуты относительно первой.

Принцип определения направления вращения представлен на рис. 1.3. Штрихи дорожки, связанной с каналом *B*, сдвинуты относительно дорожки канала *A* так, чтобы на циклограмме сдвиг фаз между сигналами каналов составлял четверть периода $T/4$. Такой сдвиг является стандартной величиной, принятой при конструировании инкрементных энкодеров. При вращении по ходу часовой стрелки (рис. 1.3, *а*) отражающая метка вначале будет считываться каналом *A* и только затем каналом *B*. Таким образом, сигнал на канале *B* всегда будет отставать от канала *A* на четверть периода. При вращении против хода часовой стрелки (рис. 1.3, *б*) будет иметь место обратная картина. Отражающая метка раньше проходит через канал *B*, и сигнал на канале *A* всегда будет отставать от канала *B* на четверть периода.

Определение частоты вращения в двухканальном инкрементном энкодере может также осуществляться подсчетом числа импульсов за пройденное время (рис. 1.4). В этом случае подсчитывается каждый фронт (и передний, и задний) по обоим каналам *A* и *B*. Если взять величину периода $T$ для одного из каналов, то

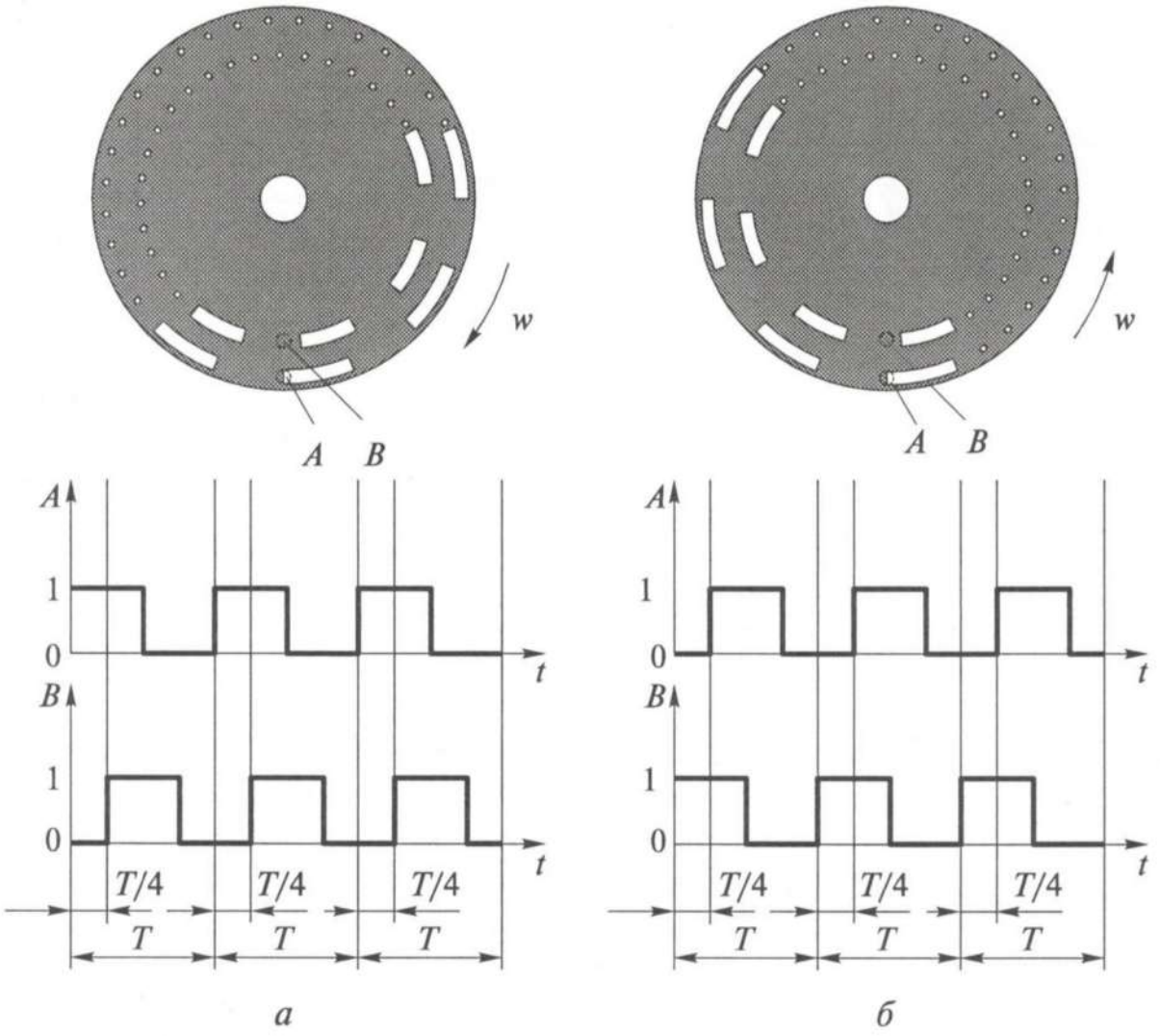



**Рис. 1.3.** К определению направления вращения по циклограмме инкрементного энкодера:

*а* — по ходу часовой стрелки; *б* — против хода часовой стрелки; *A*, *B* — расположение считывающих оптопар каналов

число импульсов за это время будет равно четырем, поэтому данный способ называют подсчетом ***с учетверением***. При числе периодов $n$ за полный оборот число импульсов за это время будет составлять $4n$.

Подсчет с учетверением также применяют для определения основного параметра энкодера — ***разрешения***. Разрешение показывает минимальное перемещение вала датчика, которое приводит к изменению сигнала, и измеряется в импульсах на один оборот. При разрешении $4n$ имп./об. ***минимальное угловое перемещение***, вызывающее изменение сигнала, будет составлять $(360/4n)°$.

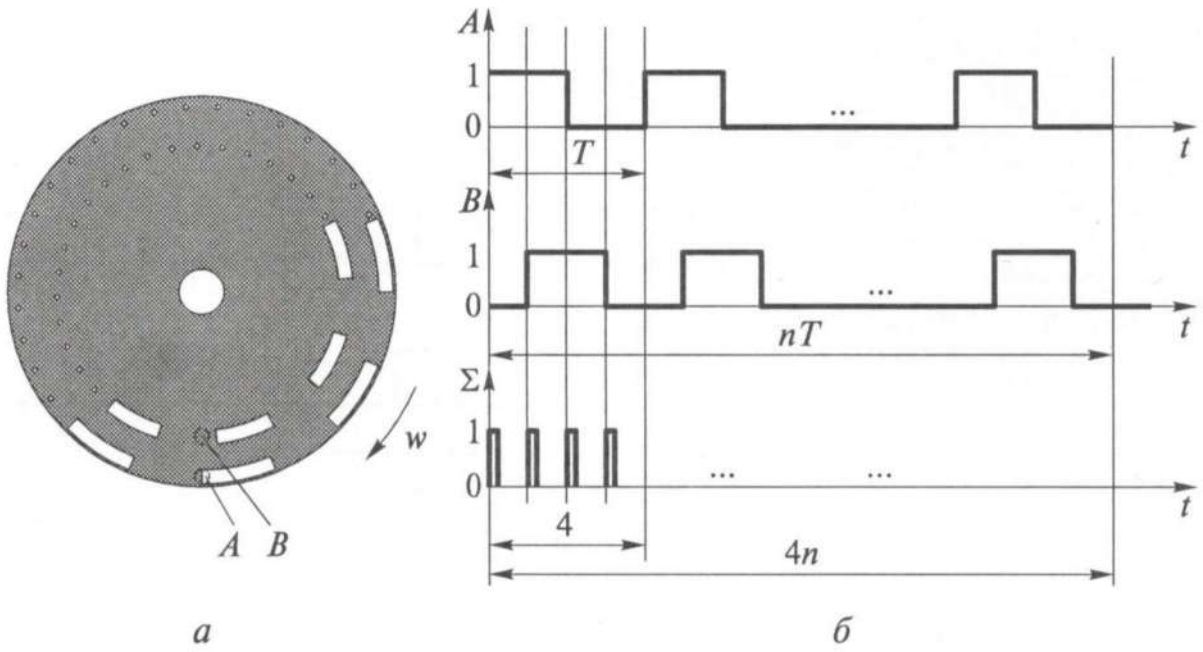



**Рис. 1.4.** К определению частоты вращения по циклограмме инкрементного энкодера путем подсчета импульсов:

*а* — диск энкодера; *б* — циклограмма; *A*, *B* — расположение считывающих оптопар каналов

Для определения абсолютного положения вала в пространстве, а также для контроля считывания сигналов используют инкрементный энкодер с ***нулевым каналом***, называемым также ***каналом референтной метки***. Этот канал содержит одну единственную отражающую метку, привязанную к нулевой позиции вала в пространстве (рис. 1.5). Данный канал имеет несколько вариантов обозначений. В большинстве случаев производители устройств указывают его как канал *Z*, реже как канал *R*. В литературе теоретического характера может встречаться обозначение канал *N*.

Диск энкодера устанавливают на вал так, чтобы начало отражающей метки нулевой дорожки совпадало с начальным положением вала и располагалось напротив оптопары канала *Z*. Сигнал на этом канале будет появляться в начале каждого оборота диска (см. рис. 1.5). Таким образом, определить число оборотов диска можно, подсчитывая только импульсы на канале *Z*.

Определить абсолютное положение вала с помощью канала *Z* можно, найдя разность между импульсом на этом канале и текущим положением диска, которое считывается каналами *A* и *B*. Однако такой способ не будет работать при малых перемещениях. Если диск начал вращение из случайного положения, в котором нет метки канала *Z*, и повернулся на небольшой угол, не дойдя до метки

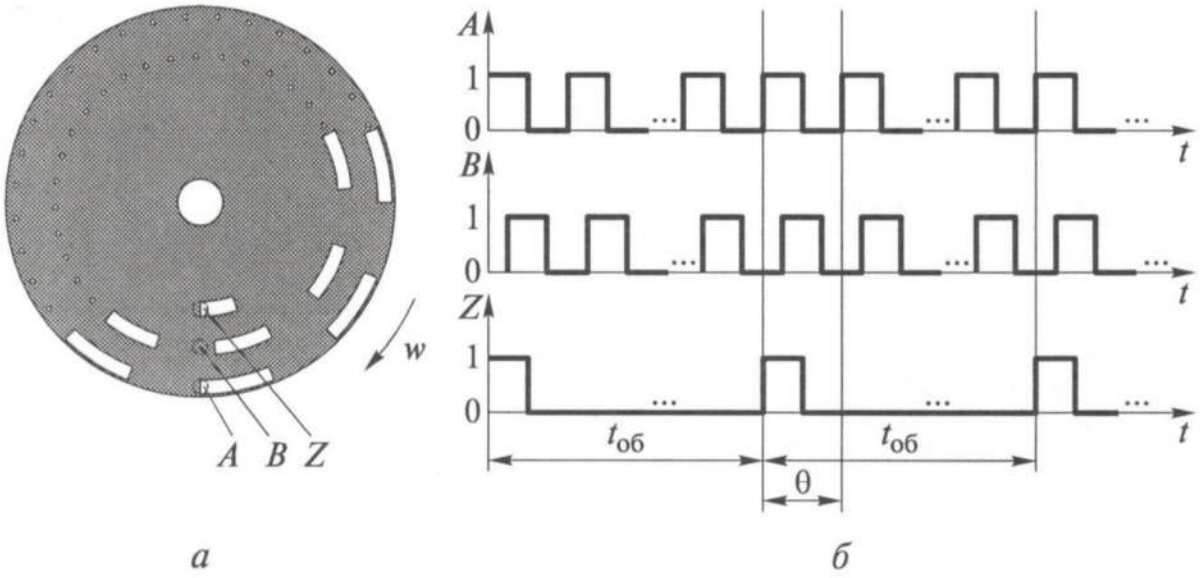



**Рис. 1.5.** К определению частоты вращения и абсолютного положения по циклограмме инкрементного энкодера с нулевым каналом:

*а* — диск энкодера; *б* — циклограмма; *A*, *B*, *Z* — расположение считывающих оптопар каналов

канала *Z*, то определить абсолютное положение по такой циклограмме будет невозможно, поэтому при необходимости постоянного контроля абсолютного положения вала используют абсолютные энкодеры.

## 1.4. Абсолютный энкодер с двоичной кодировкой

Абсолютный энкодер отличается от инкрементного способом нанесения меток на оптический диск. Так, в абсолютном энкодере диск разбивают на некоторое число секторов, каждому из которых ставится в соответствие свой уникальный код в двоичной системе счисления. Код формируется как совокупность сигналов по каждой из дорожек в заданном секторе.

Пример нанесения меток на диск с использованием двоичной кодировки представлен на рис. 1.6, *а*. Данный диск разбит на восемь секторов с помощью трех дорожек с соответствующими им каналами *A*, *B* и *C*. Все секторы имеют десятичные номера от 0 до 7. Каждому из этих десятичных чисел ставится в соответствие код, являющийся отображением этих чисел в двоичной системе счисления. К такому способу кодирования диска применяют термин ***двоичный код*** (также, в ином варианте перевода, ***бинарный код***). Так, числу 0 при трех разрядах будет соответствовать код 000. За счет

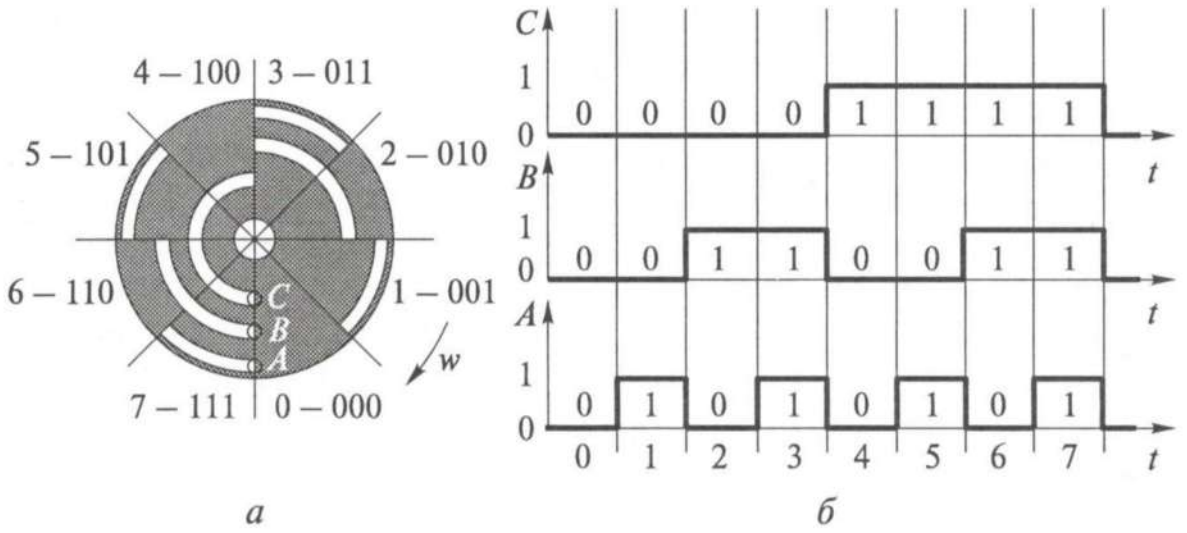



**Рис. 1.6.** К определению параметров вращения абсолютным энкодером с двоичной кодировкой:

*а* — диск энкодера; *б* — циклограмма; *A*, *B*, *C* — расположение считывающих оптопар каналов

того, что на диске в этом секторе на всех дорожках нанесены неотражающие метки, при его прохождении через каналы сигнал на каждом из них будет отсутствовать, что и будет соответствовать коду 000. При переходе к сектору 1 на дорожке канала *A* появляется отражающая метка. При считывании этого сектора на циклограмме получится сигнал 001, что является отображением единицы в двоичной системе. Аналогично происходит и со всеми остальными секторами.

При кодировании дорожка, ближайшая к краю диска, отвечает за самый младший разряд. Чем ближе дорожка к центру диска, тем более старший разряд она имеет. Циклограмма, формируемая в процессе вращения диска, представлена на рис. 1.6, *б*.

Для определения частоты вращения с помощью абсолютного энкодера используют подсчет двоичных состояний вместо подсчета периодов. Если известно, что диск разбит на $n$ секторов, следовательно, за полный оборот он пройдет $n$ двоичных состояний.

Аналогичная ситуация и с углом поворота. При $n$ секторах, угол, на который повернулся диск за один сектор, составит $(360/n)°$. Тогда, зная сколько состояний сменилось за время поворота диска, можно определить угол поворота диска.

Определение направления вращения происходит путем отслеживания того, как именно изменяются двоичные состояния. Если изменение кода происходит в сторону увеличения десятичных зна-

чений (в примере на рис. 1.6 от 0 до 7), то движение будет происходить по ходу часовой стрелки, если в сторону уменьшения — против.

Абсолютное положение вала в пространстве может быть определено в любой момент времени также за счет отслеживания уникального двоичного кода сектора. Обычно диск энкодера устанавливают так, чтобы нулевое положение вала соответствовало началу нулевого сектора в месте расположения каналов. Тогда, даже при остановленном диске, можно считать сигнал с каналов, по полученному коду определить текущий сектор и установить разность между данным сектором и нулем.

Абсолютные энкодеры, тем не менее, имеют ряд существенных недостатков. Первый из них связан с высокой точностью таких устройств. Увеличение точности определения угла поворота требует увеличения числа дорожек, что делает трудоемкими процессы нанесения меток и изготовления оптического диска и, как следствие, увеличивает его стоимость по сравнению с инкрементными энкодерами. Второй недостаток связан с самой природой двоичного кода и скоростью считывания информации с помощью оптопар каналов.

При переходе между некоторыми состояниями двоичного кода может происходить изменение сразу нескольких бит. Так, при изменении сектора с третьего (011) на четвертый (100) должны измениться биты в трех разрядах (рис. 1.7, *а*). На практике изменение сигналов на каждой из дорожек происходит не одновременно, и может возникнуть ситуация, что считывание сигнала произошло в тот момент, когда еще не все биты успели поменяться. Если предположить ситуацию, что при переходе из третьего сектора в четвертый считывание сигнала произошло, когда успел поменяться только один самый старший бит (рис. 1.7, *б*), то вместо кода 100 будет считан код 111 (который соответствует десятичному числу 7), что приведет к неверному определению параметров.

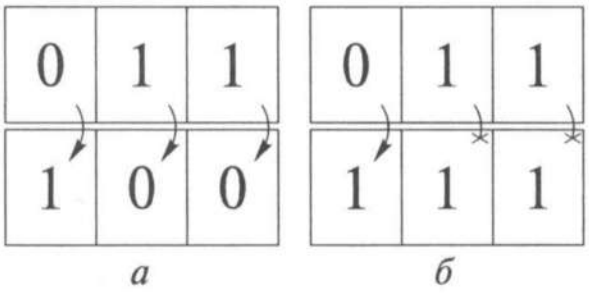



**Рис. 1.7.** Ошибка считывания сигнала в абсолютном энкодере с двоичным кодом:
*а* — вариант требуемого считывания сигнала; *б* — возможный вариант ошибочного считывания сигнала

Для избежания негативных последствий данного эффекта вместо дисков с двоичной кодировкой используют диски с кодировкой Грея.

## 1.5. Абсолютный энкодер с кодировкой Грея

***Код Грея*** — вид кодировки, в которой два любых соседних состояния всегда отличаются только одной цифрой в одном двоичном разряде. Другими словами, все соседние состояния на диске энкодера с кодом Грея будут отличаться только на один бит в одном из разрядов. Абсолютные энкодеры с кодом Грея позволяют устранить описанную выше проблему неоднозначного считывания двоичного сигнала в момент перехода между состояниями. Пример диска с кодом Грея вместе с циклограммой за его полный оборот представлены на рис. 1.8.

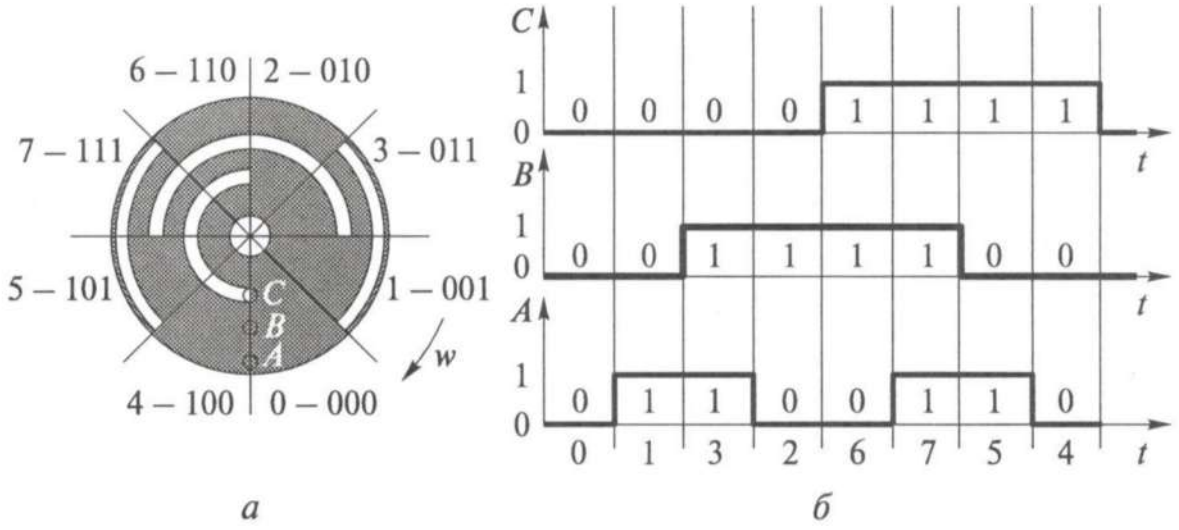



**Рис. 1.8.** К определению параметров вращения абсолютным энкодером с кодом Грея:

*а* — диск энкодера; *б* — циклограмма; *A*, *B*, *C* — расположение считывающих оптопар каналов

Код Грея формируется на основе двоичного при использовании следующего правила: старший разряд не изменяется, а каждый последующий разряд инвертируется, если предыдущий разряд исходного двоичного кода равен единице.

Определение параметров происходит так же, как и в абсолютном энкодере с двоичным кодом, за тем лишь отличием, что порядок следования десятичных номеров секторов друг за другом (и, как следствие, их двоичных кодов) имеет иной характер.

Но, поскольку данный характер распределения не несет в себе реальной числовой информации, на практике код Грея требует преобразования обратно в двоичный код для последующей

обработки. Выполняют это либо программно с помощью микроконтроллера, либо используя инверторную схему «исключающее ИЛИ» (XOR-схема). Данное требование, усложняющее использование энкодеров данного вида, может быть отнесено к его недостаткам.

# 2. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

## 2.1. Общие сведения

Лабораторный стенд для изучения параметров оптических энкодеров является комплексом, состоящим из нескольких устройств (рис. 2.1). Основные компоненты исследования расположены на лабораторной плате «Измерение угла и частоты вращения» *6*. Данная плата установлена в соединительном блоке *5*, который подключен к блоку *4* обработки и передачи сигналов. Совокупность этих частей представляет собой лабораторную установку *3*. Посредством блока *4* она соединяется с персональным компьютером *2*.

Взаимодействие пользователя с лабораторной установкой происходит с помощью виртуальной среды LabSoft *1*, которая является нативным программным обеспечением лабораторного оборудования и поставляется с ним в комплекте. Она содержит набор виртуальных приборов, в которые входят источники и приемники сигнала.

Подробное описание лабораторной установки, а также детальные инструкции по работе с виртуальной средой LabSoft приведены далее.

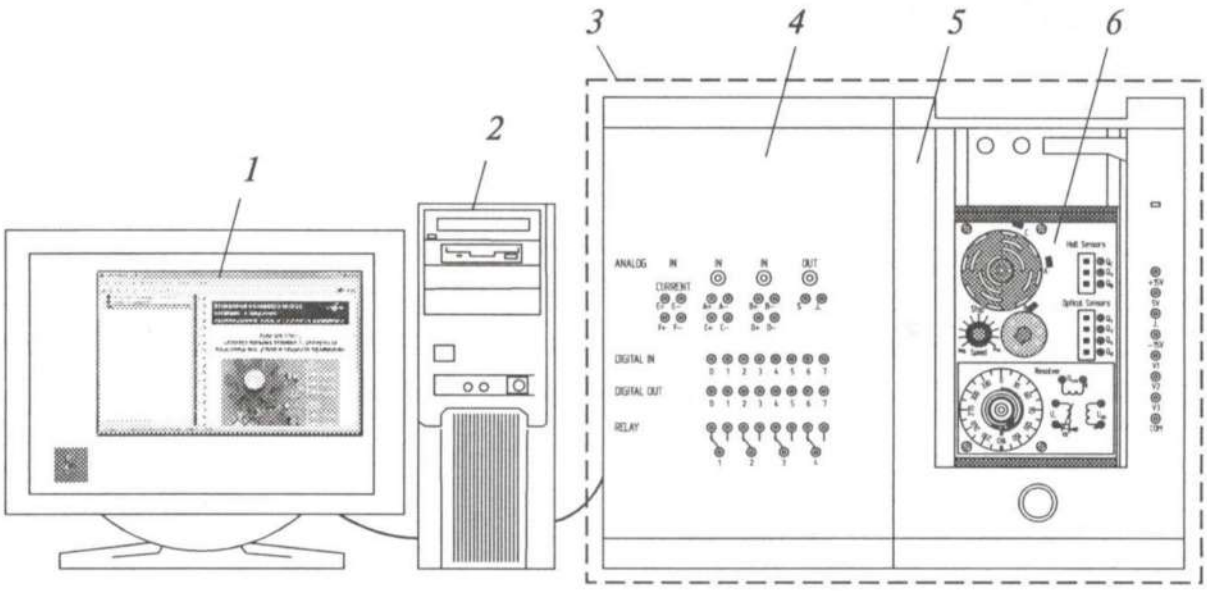



**Рис. 2.1.** Общее устройство лабораторного стенда:

*1* — виртуальная среда LabSoft; *2* — персональный компьютер; *3* — лабораторная установка; *4* — блок обработки и передачи сигналов; *5* — соединительный блок; *6* — лабораторная плата «Измерение угла и частоты вращения»

## 2.2. Конструктивная схема лабораторной установки

Лабораторная установка представляет собой соединение лабораторной платы «Измерение угла и частоты вращения» *4*, соединительного блока *3* и блока *1* обработки и передачи сигналов на компьютерный интерфейс (рис. 2.2). Лабораторная плата зафиксирована внутри соединительного блока *3*, который подсоединен к блоку обработки и передачи сигналов. На блоке *1* расположена группа цифровых входов *2*, предназначенных для соединения с лабораторной платой.

На лабораторной плате расположен вал *10* с нарезанной резьбой, на который устанавливается оптический диск энкодера *5*. Диск крепится на валу с помощью фиксатора *6*. Вал приводится во вращение электродвигателем *8*. Скорость и направление вращения вала регулируются поворотом ручки потенциометра *7*.

Сигнал с энкодера снимается с помощью расположенных под ним на плате оптических пар *9*. Сигнал от оптопар попадает на группу электрических выводов *12* каналов. Электрические выводы обозначены в соответствии с битовой разрядностью каналов: *Q*1, *Q*2, *Q*4, *Q*8. Рядом с выводами расположена группа сигнальных ламп *11* для каждого из каналов. Горящая лампа соответствует единичному сигналу на канале, не горящая — нулевому.

В комплектацию лабораторной установки также входят сменные оптические диски: инкрементный, абсолютного энкодера с двоичной кодировкой и с кодировкой Грея.

Все прочие компоненты лабораторной установки, не упомянутые и не отмеченные на рис. 2.2, не предназначены для выполнения текущей лабораторной работы. Любое несанкционированное взаимодействие с ними запрещено, так как может привести к внештатным режимам работы установки, что либо повлечет за собой выход ее из строя, либо может представлять угрозу жизни и здоровью тех, кто взаимодействует со стендом.

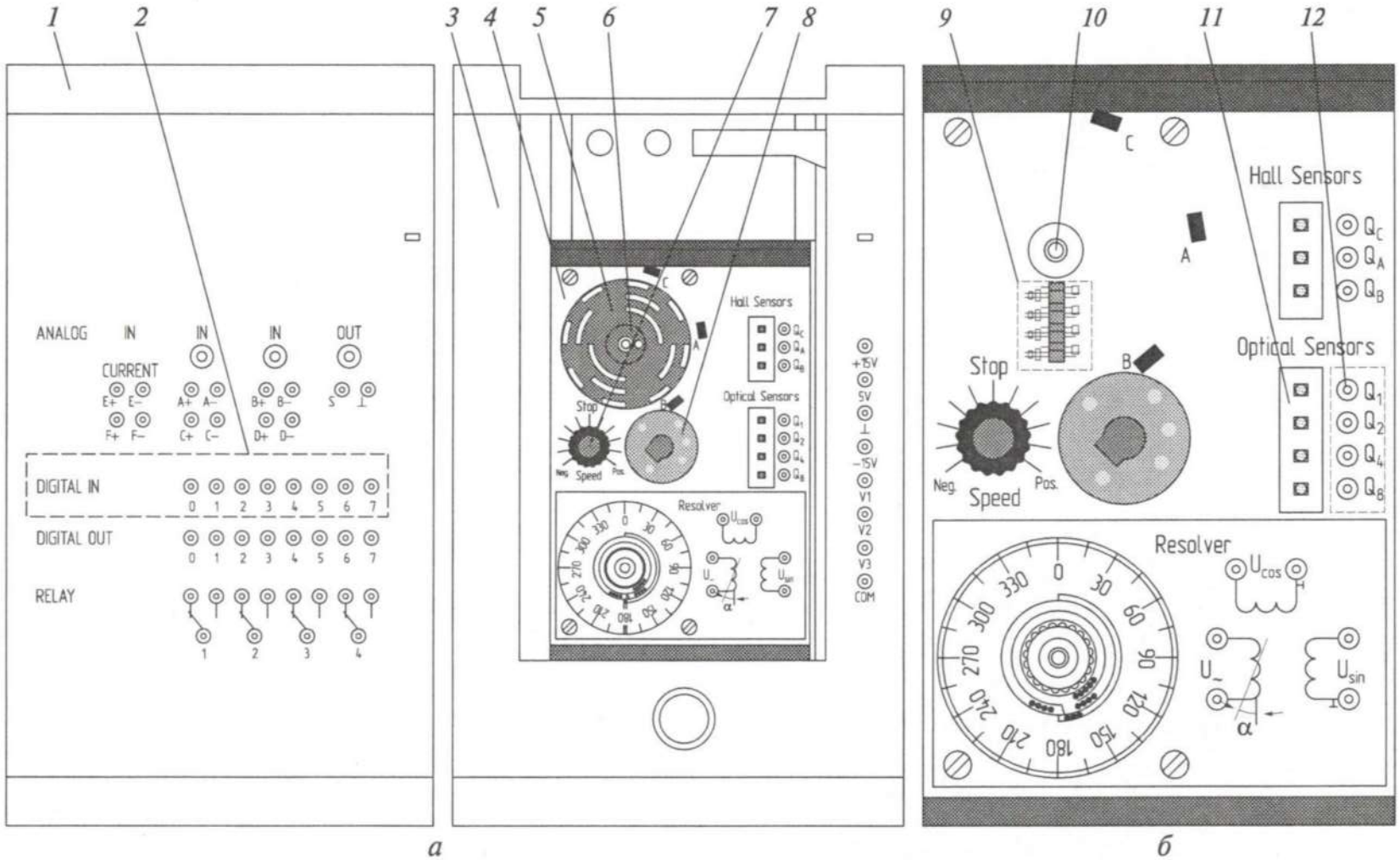



**Рис. 2.2.** Конструктивная схема лабораторной установки:

*а* — собранная установка с диском энкодера; *б* — общий вид платы «Измерение угла и частоты вращения» без установленного диска энкодера; *1* — блок обработки и передачи сигналов на компьютерный интерфейс; *2* — группа цифровых входов; *3* — соединительный блок; *4* — лабораторная плата «Измерение угла и частоты вращения»; *5* — диск энкодера; *6* — фиксатор; *7* — ручка потенциометра изменения скорости; *8* — электродвигатель; *9* — группа оптопар каналов энкодера; *10* — вал энкодера; *11* — сигнальные лампы каналов энкодера; *12* — электрические выводы каналов энкодера

## 2.3. Устройство и параметры диска инкрементного энкодера

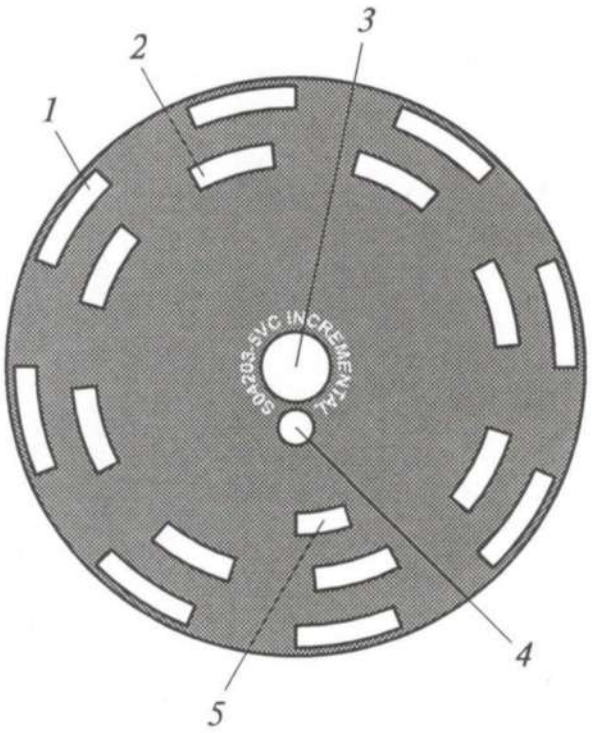


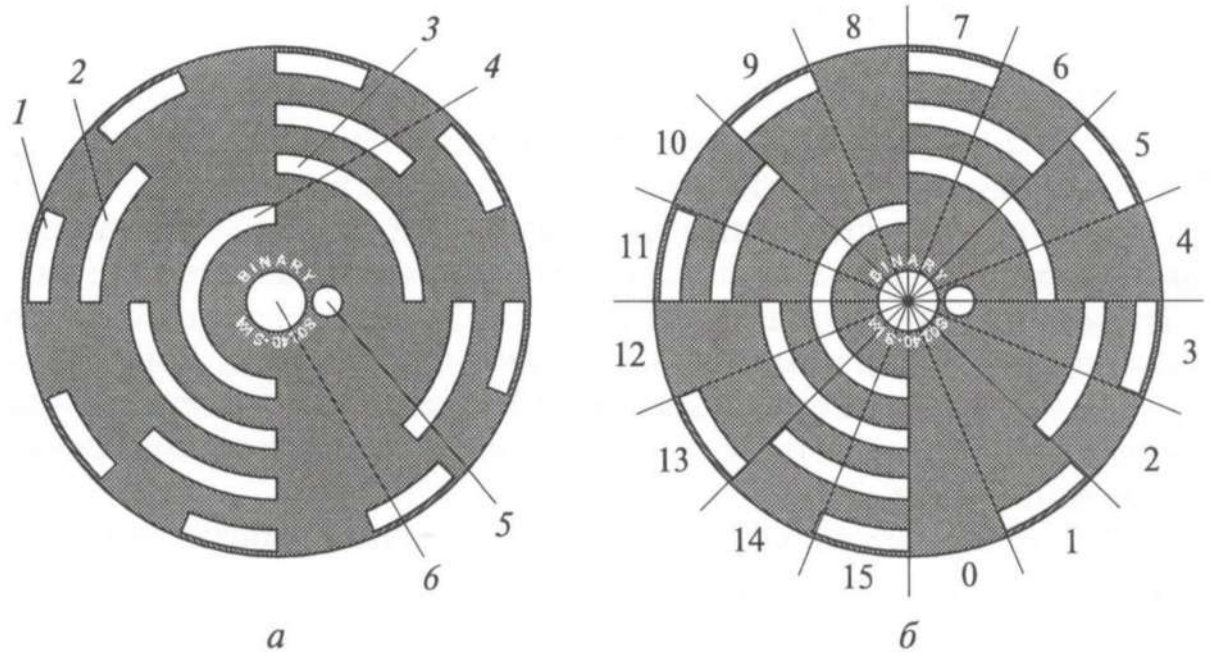

**Рис. 2.3.** Общий вид оптического диска инкрементного энкодера:

*1* — дорожка канала *A*; *2* — дорожка канала *B*; *3* — отверстие под вал; *4* — отсчетное отверстие установки нулевого положения; *5* — метка канала *Z*

Общий вид диска инкрементного энкодера представлен на рис. 2.3. Поверхность диска матовая и имеет черный неотражающий цвет. Метки дорожек глянцевые и нанесены на диск белым отражающим цветом. Всего на диск нанесены две оптические дорожки — дорожка *1* канала *A* и дорожка *2* канала *B*, — метки которых смещены относительно друг друга на четверть периода. На поверхность диска также нанесена референтная метка *5* канала *Z*. Диск устанавливается на вал с помощью отверстия *3*, для корректной установки предусмотрено отсчетное отверстие *4*. Для того чтобы диск оказался в нулевом положении, при установке на вал отсчетное отверстие должно находиться в крайнем нижнем положении, а референтная метка располагаться справа от отверстия, как показано на рис. 2.3.

## 2.4. Устройство и параметры диска абсолютного энкодера с двоичной кодировкой

Общий вид диска абсолютного энкодера с двоичной кодировкой представлен на рис. 2.4, *а*. Его поверхность, также как и в случае инкрементного диска, выполнена из матового материала и имеет черный неотражающий цвет, а метки дорожек глянцевые, белого цвета. Всего на диск нанесено четыре дорожки: дорожка *1* канала *A*, дорожка *2* канала *B*, дорожка *3* канала *C*, дорожка *4* канала *D*. Отверстие *6* предназначено для установки дис-




*а* *б*

**Рис. 2.4.** Оптический диск абсолютного энкодера с двоичной кодировкой:

*а* — внешний вид диска; *б* — разметка секторов диска; *1* — дорожка канала *A*; *2* — дорожка канала *B*; *3* — дорожка канала *C*; *4* — дорожка канала *D*; *5* — отсчетное отверстие установки нулевого положения; *6* — отверстие под вал

*Таблица 2.1*

**Двоичная кодировка диска абсолютного энкодера**

| Номер сектора / десятичный код сектора | Двоичные значения состояний в двоичной кодировке | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Канал *D* | Канал *C* | Канал *B* | Канал *A* |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 2 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 3 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 4 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 5 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 6 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 7 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 8 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 9 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 10 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 11 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| 12 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 13 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| 14 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 15 | 1 | 1 | 1 | 1 |

ка на вал, а отсчетное отверстие *5* регулирует правильность установки нулевого положения.

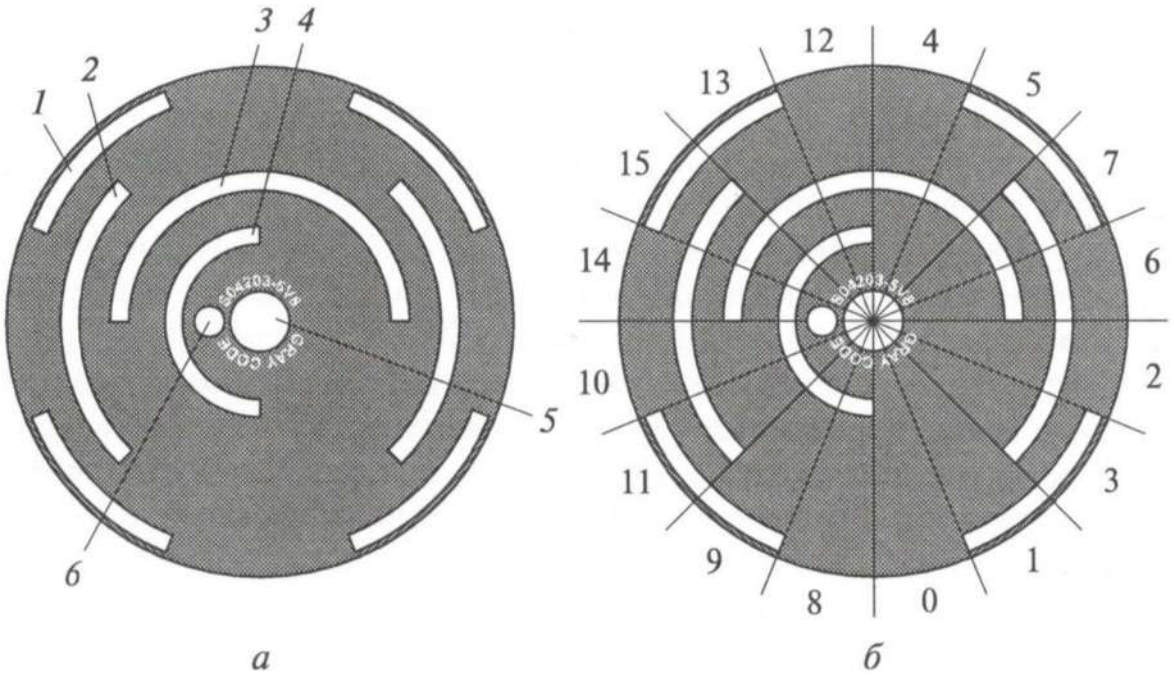
Диск разбит на 16 секторов, каждому из которых с помощью меток на дорожках *1...4* присвоен уникальный код. Расположение секторов на поверхности диска представлено на рис. 2.4, *б*. Все секторы пронумерованы числами от 0 до 15 в десятичной системе и расположены на диске от нулевого сектора в порядке возрастания против хода часовой стрелки. Уникальный код сектора представляет собой номер сектора в двоичной системе. Дорожка *1* канала *A* отвечает за самый младший бит, дорожка *4* канала *D* — за самый старший. Соответствие секторов их двоичной кодировке приведено в табл. 2.1.

При установке диска на вал для корректной работы энкодера отсчетное отверстие должно находиться в крайнем правом положении, как показано на рис. 2.4, *а*. При такой установке нулевой сектор оказывается напротив оптопар каналов в начальный момент времени. Также данное расположение диска позволяет задать принятые режимы вращения: по ходу часовой стрелки номера секторов будут считываться в порядке возрастания от 0 до 15, против хода часовой стрелки — в порядке убывания от 15 до 0 (см. рис. 2.4, *а* или табл. 2.1).

## 2.5. Устройство и параметры диска абсолютного энкодера с кодом Грея

Конструктивно оптический диск с кодировкой Грея (рис. 2.5, *а*) аналогичен диску с двоичной кодировкой. Поверхность выполнена из черного матового материала, метки глянцевые и нанесены белым цветом. Всего на поверхности диска имеются четыре дорожки *1...4* соответственно каналов *A*, *B*, *C* и *D*. В центре выполнены отверстие *5* для установки диска на вал и отсчетное отверстие *6* для регулирования правильного положения при установке.

Диск с кодом Грея также разбит на 16 секторов, каждому из которых присвоен уникальный код с помощью меток на дорожках *1...4*. Расположение секторов на поверхности диска представлено на рис. 2.5, *б*. Все секторы пронумерованы числами от 0 до 15 в десятичной системе. Уникальным кодом сектора также является его номер в двоичной системе счисления. Как и в случае диска с двоичной кодировкой, здесь дорожка *1* канала *A* отвечает за самый младший бит, а дорожка *4* канала *D* — за самый старший.




*а* *б*

**Рис. 2.5.** Оптический диск абсолютного энкодера с кодировкой Грея:

*а* — внешний вид диска; *б* — разметка секторов диска; *1* — дорожка канала *A*; *2* — дорожка канала *B*; *3* — дорожка канала *C*; *4* — дорожка канала *D*; *5* — отверстие под вал; *6* — отсчетное отверстие установки нулевого положения

*Таблица 2.2*

**Кодировка Грея диска абсолютного энкодера**

| Номер сектора / десятичный код сектора | Двоичные значения состояний в кодировке Грея | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Канал *D* | Канал *C* | Канал *B* | Канал *A* |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 3 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 2 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 6 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 7 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 5 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 4 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 12 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 13 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| 15 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 14 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 10 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 11 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| 9 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 8 | 1 | 0 | 0 | 0 |

Отличие от двоичной кодировки заключается в порядке следования секторов: при переходе из одного сектора в другой изменяется только один бит на одной из четырех дорожек. Порядок следования секторов в кодировке Грея, а также соответствие их десятичных номеров двоичной системе счисления представлены в табл. 2.2.

Во время установки для корректного расположения нулевой точки отсчетное отверстие должно быть расположено в крайнем левом положении, как показано на рис. 2.5, *а*. Это позволяет расположить нулевой сектор напротив оптопар в начальный момент времени, также данное расположение диска позволяет задать принятые режимы вращения. При вращении по ходу часовой стрелки номера секторов будут считываться в порядке кода Грея — от начального нулевого до конечного восьмого сектора; при вращении против хода часовой стрелки — от конечного восьмого до начального нулевого (см. рис. 2.5, *а* или табл. 2.2).

# 3. РАБОТА С ВИРТУАЛЬНОЙ СРЕДОЙ LABSOFT

## 3.1. Запуск виртуальной среды LabSoft

Для обработки сигналов используется установленная на персональном компьютере лабораторной установки виртуальная среда LabSoft. Для ее запуска следует дважды кликнуть на иконку на рабочем столе (рис. 3.1).

Перед запуском виртуальной среды необходимо выбрать язык в появившемся диалоговом окне (рис. 3.2). Щелчок по стрелочке открывает список доступных языков. После выбора требуемого языка следует нажать кнопку «ОК» для продолжения.




**Рис. 3.1.** Общий вид иконки запуска виртуальной среды LabSoft

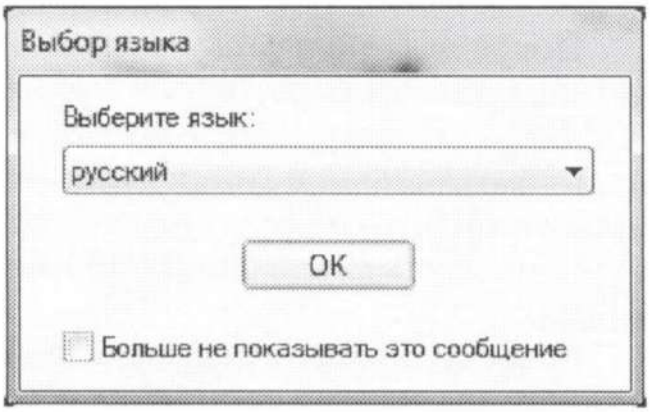
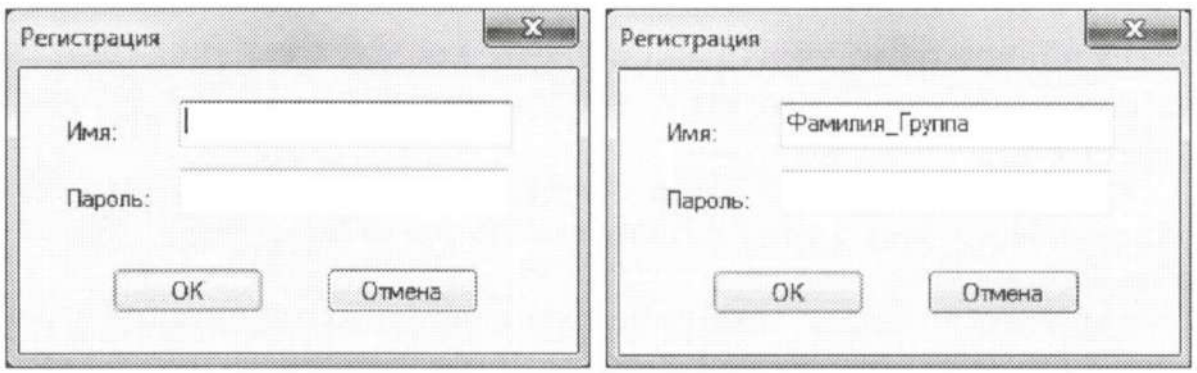



**Рис. 3.2.** Диалоговое окно выбора языка




*а* *б*

**Рис. 3.3.** Диалоговое окно регистрации пользователя в системе

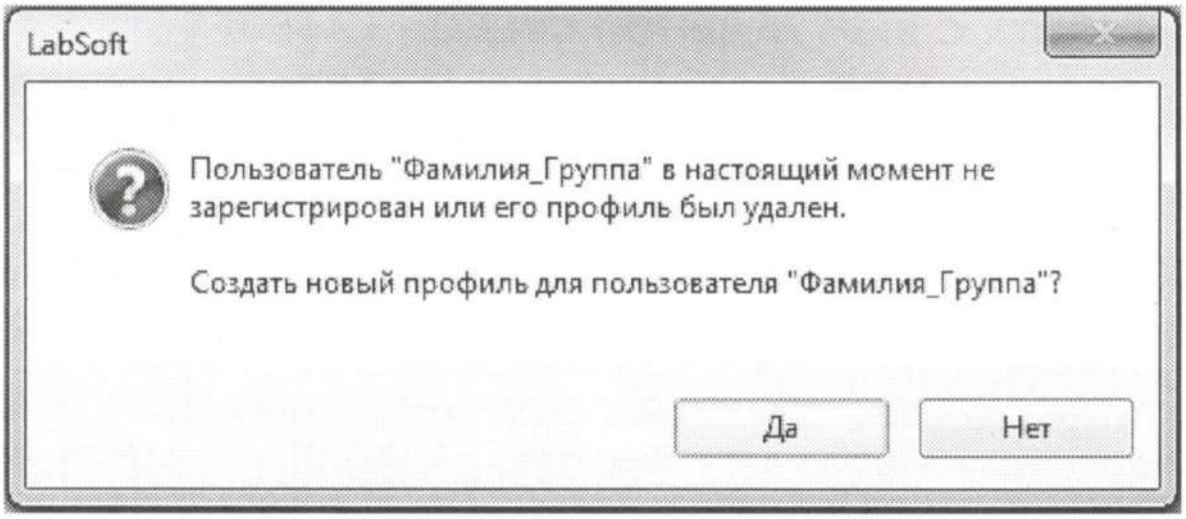



**Рис. 3.4.** Диалоговое окно подтверждения создания нового пользователя

После выбора языка происходит запуск среды LabSoft с диалоговым окном регистрации пользователя в системе (рис. 3.3, *а*). Необходимо задать имя пользователя и пароль. В качестве имени пользователя используется следующий шаблон: фамилия студента, нижнее подчеркивание, группа (рис. 3.3, *б*). Поле пароля можно оставить пустым или задать произвольный пароль при необходимости.

Если пользователь заходит в систему первый раз, возникает диалоговое окно с вопросом о создании нового пользователя (рис. 3.4). Для подтверждения выбора необходимо нажать на кнопку «Да», после чего откроется доступ к среде LabSoft.

## 3.2. Интерфейс виртуальной среды LabSoft

Основное окно виртуальной среды LabSoft (рис. 3.5) состоит из строки основного меню *1*, панели инструментов *3* и рабочей области *4*.

В строке основного меню пункт «Приборы» *2* предназначен для доступа к основному списку виртуальных приборов и источников сигнала.

Справа на панели инструментов расположены иконки переключения режимов рабочей области. В режиме справочника *5* среда предоставляет паспортную документацию лабораторной платы. В режиме графопостроителя *6* в рабочей области появляется зона для построения зависимостей измеряемых или расчетных параме-




**Рис. 3.5.** Интерфейс программной среды LabSoft:
*1* — основное меню; *2* — пункт «Приборы»; *3* — панель инструментов; *4* — рабочая область; *5* — режим справочника; *6* — режим графопостроителя; *7* — режим графического анализатора

тров. В режиме графического анализатора *7* рабочая область принимает вид зоны для вывода сигналов с цифровых каналов платы.

## 3.3. Виртуальные приборы: графический анализатор

Основным прибором для обработки цифровых сигналов с платы лабораторной установки служит графический анализатор. Для доступа к нему необходимо нажать на крайнюю правую иконку в правом верхнем углу панели инструментов левой кнопкой мыши (рис. 3.5, поз. *7* и рис. 3.6).

При щелчке на иконку приложение перейдет в режим графического анализатора (рис. 3.7).



**Рис. 3.6.** Общий вид иконки виртуального графического анализатора

В этом режиме в основном поле программы появляется рабочая область графического анализатора *7*, представляющая собой графическую область, где по оси абсцисс задается время развертки, а по оси ординат — каналы, сигналы с которых будут выводиться. На панель инструментов выводятся значки для взаимодействия

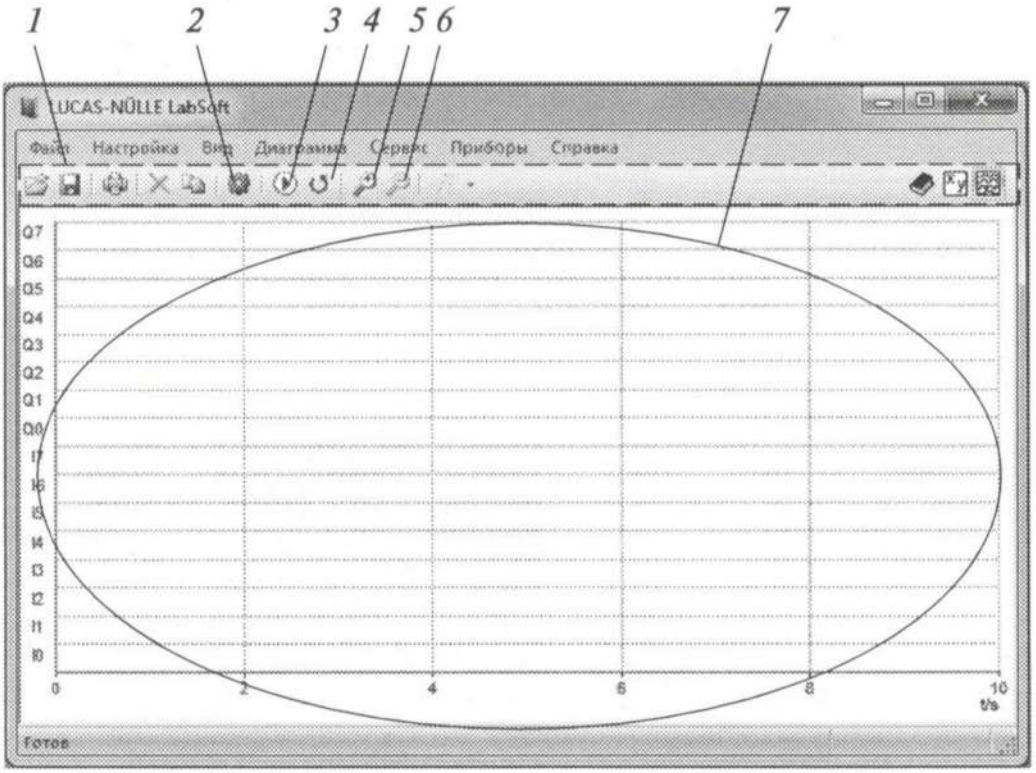



**Рис. 3.7.** Общий вид графического анализатора:
*1* — панель инструментов; *2* — вызов окна свойств графического анализатора; *3* — кнопка считывания сигнала; *4* — вызов режима непрерывной развертки; *5* — инструмент «Увеличить»; *6* — инструмент «Уменьшить»; *7* — рабочая область графического анализатора

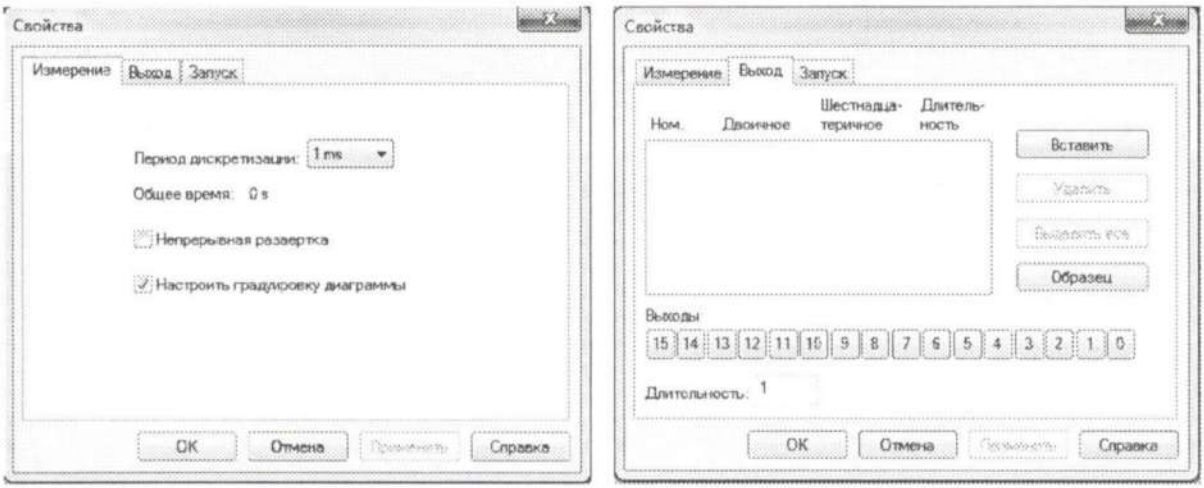
с графическим анализатором. При этом основная строка меню программы остается без изменений.

Основное взаимодействие с графическим анализатором происходит с помощью панели инструментов *1* (рис. 3.7). Кнопкой *3* осуществляется считывание сигнала, и он выводится в рабочую область. Период, за который происходит считывание, зависит от предельного значения времени по оси абсцисс. Кнопка *4* предназначена для вызова режима непрерывной развертки. В этом случае графический анализатор будет выводить сигнал в режиме реального времени. С помощью кнопки *2* можно вызвать окно свойств графического анализатора.

Также на панели расположены кнопки инструментов «Увеличить» *5* и «Уменьшить» *6*. При щелчке по первому будет предложено с помощью мыши выделить определенную часть рабочей области графического анализатора, после чего произойдет приближение данной области. Это позволяет более точно определить параметры выведенных сигналов. Инструмент «Уменьшить» воз-

вращает рабочую область в исходное состояние, которое было до увеличения.

При нажатии на кнопку *2* открывается дополнительное диалоговое окно свойств графического анализатора с тремя вкладками, две из которых содержат управляемые параметры (рис. 3.8).




*а* *б*

**Рис. 3.8.** Настройки графического анализатора

Во вкладке «Измерение» (рис. 3.8, *а*) можно изменить период дискретизации, открыв список выбора доступных вариантов щелчком по стрелочке графического элемента. Под периодом дискретизации показано общее время по оси абсцисс при текущем считывании сигнала. С помощью галочек можно установить режим непрерывной развертки и настройку градуировки диаграммы.

Вкладка «Выход» (рис. 3.8, *б*) предназначена для настройки сигналов, которые будут выводиться в рабочую область. Нажатием на кнопку «Вставить» добавляется единичный сигнал, на кнопку «Образец» — выбирается один из трех предоставляемых средой готовых шаблонов для вывода: «Константа», «Счетчик» или «Импульсный сигнал».

Настройка отображения сигналов в графической области осуществляется в диалоговом окне свойств рабочей области графического анализатора. Для доступа к этому окну необходимо щелчком правой кнопки мыши в любом месте рабочей области вызвать ниспадающее меню и выбрать в нем пункт «Свойства» щелчком левой кнопки мыши (рис. 3.9).

Данное диалоговое окно имеет четыре вкладки, две из которых содержат изменяемые параметры (рис. 3.10). Во вкладке «Сигналы»

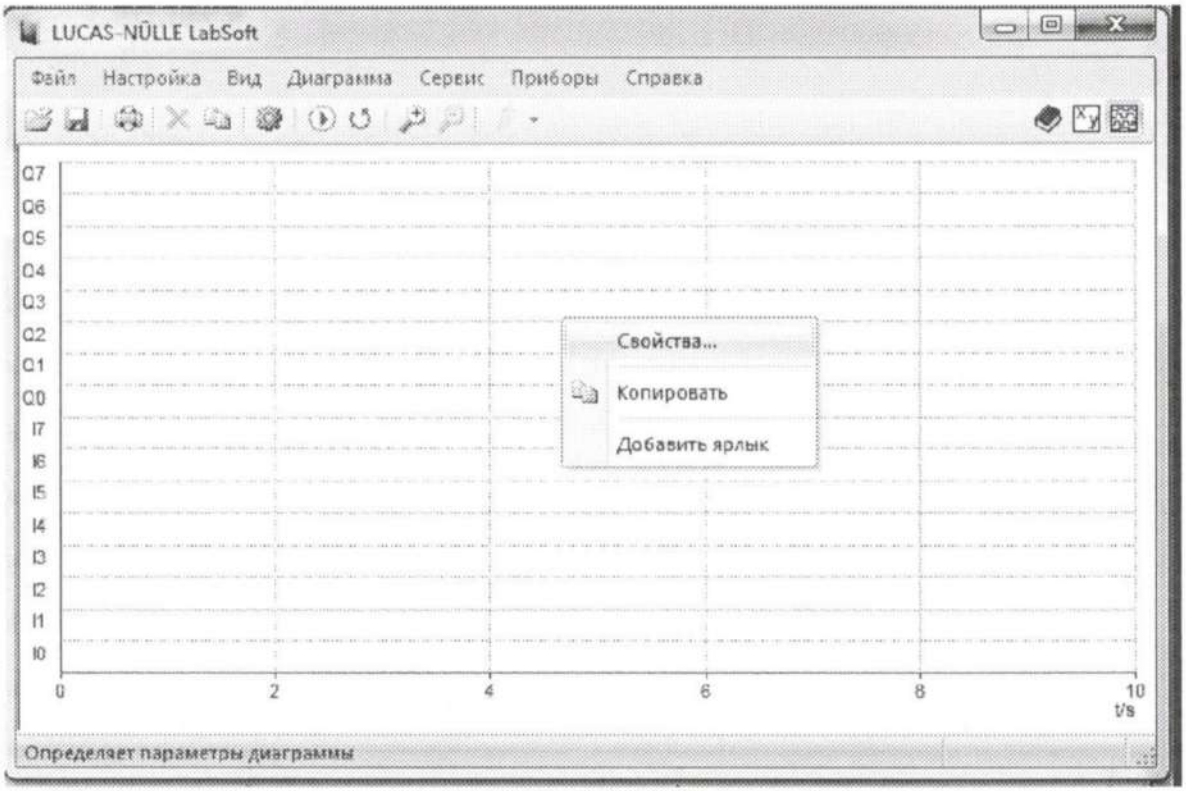
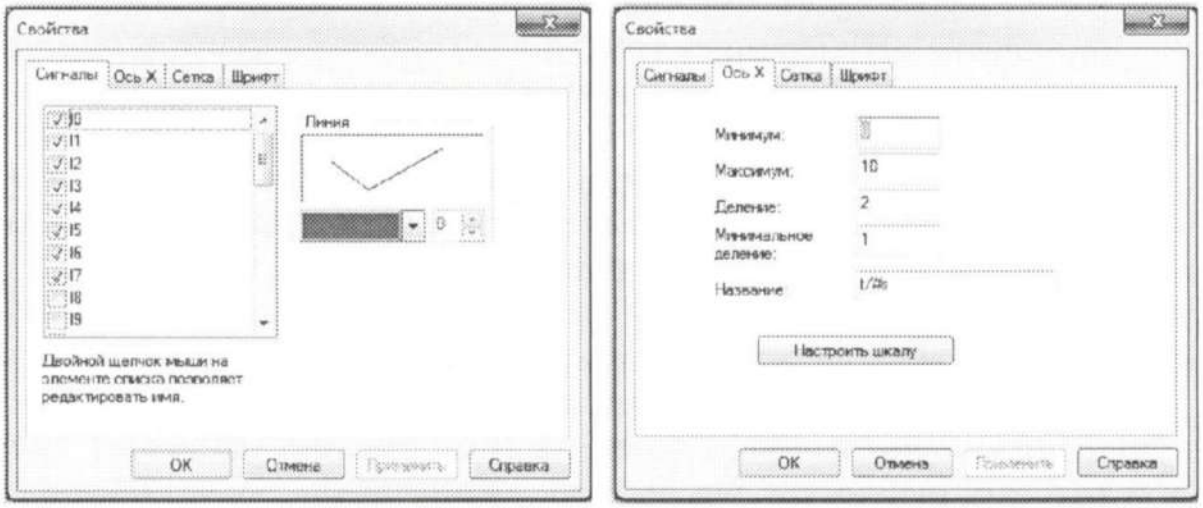



**Рис. 3.9.** Вызов меню свойств рабочей области графического анализатора




*а* *б*

**Рис. 3.10.** Настройки рабочего поля графического анализатора

(рис. 3.10, *а*) в виде списка слева содержится информация обо всех сигналах, которые доступны к выводу в рабочую область. Имена сигналов по умолчанию соответствуют наименованиям выводов на блоке обработки и передачи сигналов лабораторной установки (см. рис. 2.2, поз. *2*). Двойной щелчок левой кнопкой

мыши по названию сигнала открывает доступ к редактированию его имени. Для вывода сигнала в рабочую область графического анализатора необходимо отметить его флажком слева от названия. В правой части вкладки расположены инструменты для настройки визуализации сигнала: можно задавать толщину и цвет линии. Для изменения этих параметров необходимо предварительно выбрать требуемый сигнал, один раз щелкнув по его названию левой кнопкой мыши.

Вкладка «Ось X» (рис. 3.10, *б*) позволяет изменять параметры оси времени с помощью указания значений в соответствующих текстовых полях. Поля «Минимум» и «Максимум» отвечают за минимальное и максимальное значение шкалы. Параметр «Деление» позволяет задавать величину основных делений шкалы, а параметр «Минимальное деление» — промежуточных. С помощью параметра «Название» можно изменить подпись оси. В исключительных случаях для более тонкой настройки можно использовать кнопку «Настроить шкалу».

# 4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

## 4.1. Подготовка и техника безопасности при работе с лабораторным оборудованием

**Перед началом работы** необходимо установить:

1) соответствие внешнего вида стенда и установки описанию, приведенному в п. 2;

2) исправность оборудования, отсутствие видимых дефектов на платах;

3) отсутствие электрических подключений собранных схем или торчащих из лабораторной установки проводов. В противном случае следует обесточить установку, после чего отключить все имеющиеся на ней проводники.

**Подготовка лабораторного стенда** к проведению экспериментов.

1. Включить персональный компьютер стенда (см. рис. 2.1, поз. *2*) и подождать, пока загрузится операционная система.

2. Запустить программную среду LabSoft щелчком по иконке на рабочем столе (см. рис. 3.1) и последовательно выполнить все приведенные в п. 3.1 инструкции по запуску.

3. Перевести среду LabSoft в режим графического анализатора (см. рис. 3.6 и рис. 3.5, поз. *7*).

**Во время работы** необходимо выполнять следующие требования.

1. Собирать схемы электрических соединений при выключенных виртуальных источниках сигнала среды LabSoft.

2. Перед выполнением эксперимента показывать преподавателю схему электрических соединений для проверки.

3. При обнаружении неисправностей установки немедленно обратиться к учебному мастеру или преподавателю.

## 4.2. Использование инкрементного энкодера для определения угла поворота и частоты вращения вала

**Подготовка к эксперименту**

1. Сформировать табл. 4.1 и 4.2 для внесения в них экспериментальных данных.

2. Приготовить диск инкрементного энкодера (см. рис. 2.3).

3. Определить число периодов $N_T$ за полный оборот, посчитав количество отражающих меток на внешней или внутренней дорожках диска энкодера. Внести значение в табл. 4.1 и 4.2.

4. Установить диск энкодера на вал, как показано на рис. 4.1. Для корректной установки нулевого положения отсчетное отверстие диска должно находиться в крайнем нижнем положении, а референтная метка канала *Z* располагаться справа от установочного отверстия (см. также рис. 2.3).

5. После установки убедиться, что все сигнальные лампы каналов (см. рис. 2.2, поз. *11*) не горят. В противном случае слегка сместить диск в направлении против хода часовой стрелки, пока не погаснут все лампы.

6. Собрать схему электрических соединений эксперимента (см. рис. 4.1).

7. В среде LabSoft перейти в «Свойства графического анализатора» (см. рис. 3.7, поз. *2*).

8. Во вкладке «Измерение» (см. рис. 3.8, *а*) в качестве ~~частоты~~ периода дискретизации установить значение 1 мс и галочку напротив пункта «Настроить градуировку диаграммы».

9. Перейти во вкладку «Выход» (см. рис. 3.8, *б*). Если в поле не добавлено ни одного сигнала, нажать на кнопку «Образец» и выбрать выход «Счетчик» для его добавления. Если в поле уже добавлены сигналы «Счетчика», оставить все без изменений. Если в поле добавлены сигналы другого типа, удалить все существующие сигналы и добавить выход «Счетчик».

10. Перейти в «Свойства рабочего поля графического анализатора» (см. рис. 3.9).

11. Во вкладке «Сигналы» (см. рис. 3.10, *а*) оставить для вывода в рабочее поле графического анализатора только сигналы *I*0 и *I*1, отметив их галочками и убрав галочки у всех остальных сигналов в списке.

12. Во вкладке «Ось X» (см. рис. 3.10, *б*) установить значение параметра «Деление» на 0,005 с.

*Таблица 4.1*

**Определение угла поворота и частоты вращения вала по каждому из каналов инкрементного энкодера**

| Параметр | Расчетный канал | Число периодов за полный оборот | Время начала периода | Время конца периода | Значение периода | Угол, пройденный за период | Угол, пройденный за единицу времени | Время по циклограмме | Угол, пройденный по циклограмме | Время полного оборота | Частота вращения |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Обозначение | – | $N_T$ | $t_н$ | $t_к$ | $T$ | $\gamma$ | $\Delta\gamma$ | $t$ | $\alpha$ | $t_{об}$ | $n$ |
| Единица измерения | – | – | | | | | | | | | |
| По ходу часовой стрелки | $I0$ | | | | | | | | | | |
| Против хода часовой стрелки | $I1$ | | | | | | | | | | |

*Таблица 4.2*

**Определение частоты вращения и угла поворота вала путем подсчета импульсов по обоим каналам инкрементного энкодера**

| Параметр | Число периодов за полный оборот | Число импульсов за полный оборот | Время начала оборота | Время конца оборота | Время полного оборота | Угол, пройденный за один импульс | Время по циклограмме | Число импульсов по циклограмме | Угол, пройденный по циклограмме | Частота вращения | Абсолютная методическая погрешность | Относительная методическая погрешность |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Обозначение | $N_T$ | $k_{об}$ | $t_н$ | $t_к$ | $t_{об}$ | $\Delta\gamma_k$ | $t$ | $k_\alpha$ | $\alpha$ | $n$ | $\Delta$ | $\delta$ |
| Единица измерения | – | – | | | | | | – | | | | |
| По ходу часовой стрелки | | | | | | | | | | | | |

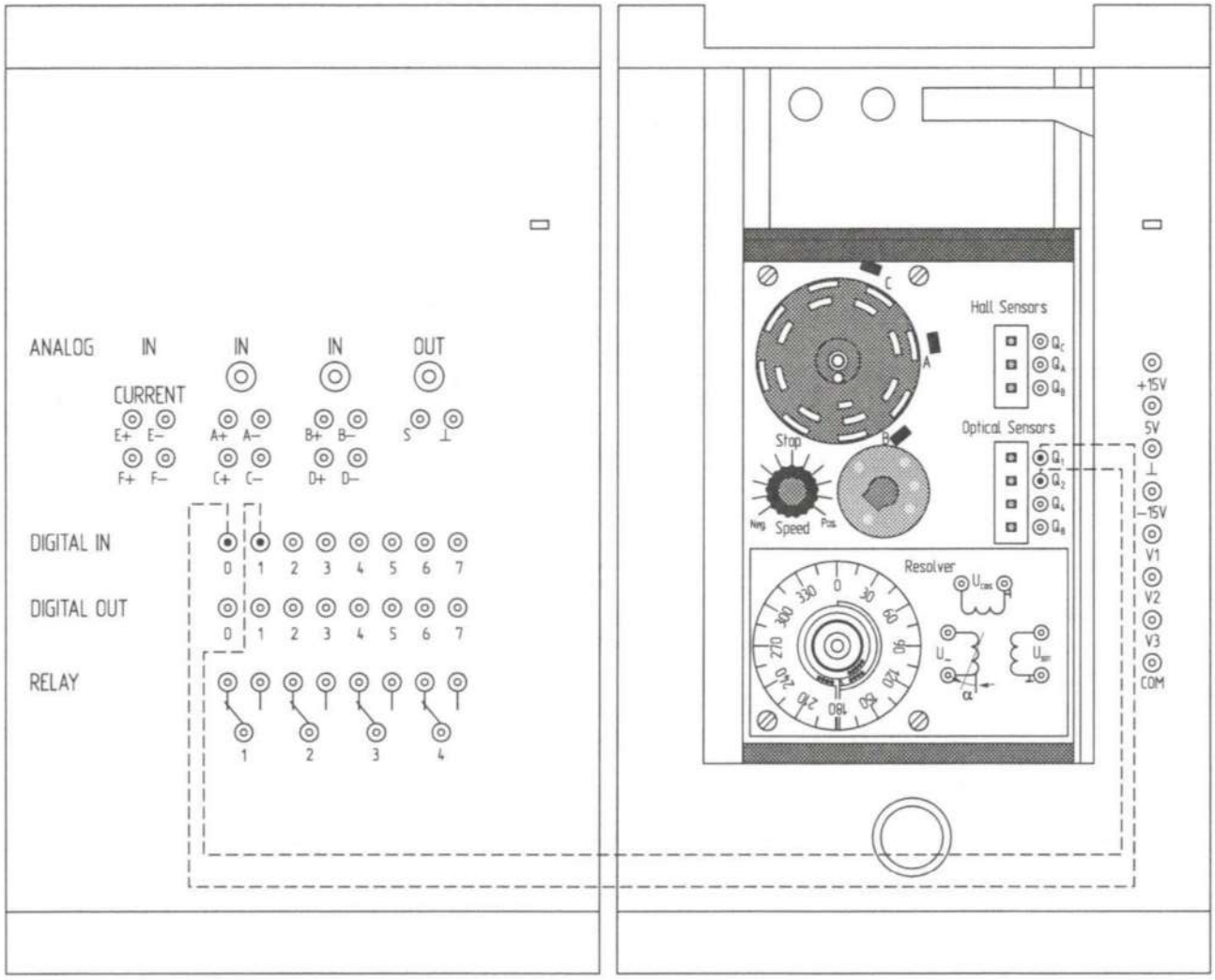



**Рис. 4.1.** Схема электрических соединений лабораторной установки для эксперимента с инкрементным энкодером без нулевого канала:

— — — — электрические проводники; ● — место подключения проводников к контактам

**Эксперимент состоит из четырех частей:**

1) определение угла поворота и частоты вращения по каналу *I*0 по ходу часовой стрелки;

2) определение угла поворота и частоты вращения по каналу *I*1 против хода часовой стрелки;

3) построение циклограммы при вращении против хода часовой стрелки;

4) определение угла поворота и частоты вращения по ходу часовой стрелки, используя подсчет импульсов.

**Порядок выполнения части 1 эксперимента**

1. Задать режим вращения диска энкодера с максимальной частотой по ходу часовой стрелки. Для этого повернуть ручку потенциометра (см. рис. 2.2, поз. *7*) по ходу часовой стрелки до упора.

2. Нажатием кнопки считывания сигнала (см. рис. 3.7, поз. *3*) вывести циклограмму в рабочую область графического анализатора.

3. Остановить вращение вала диска, установив ручку потенциометра на нулевую отметку.

4. Выбрать на циклограмме канала *I*0 первый от нуля полный период, который начинается с единичного сигнала.

5. С помощью инструмента «Увеличить» (см. рис. 3.7, поз. *5*) максимально увеличить момент начала периода и точно определить время начала периода по циклограмме $t_н$. Внести полученное значение в табл. 4.1, указать соответствующие единицы измерения.

6. С помощью инструмента «Уменьшить» (см. рис. 3.7, поз. *6*) вернуть исходное состояние циклограммы.

7. С помощью инструмента «Увеличить» максимально увеличить момент конца периода и точно определить время конца периода по циклограмме $t_к$. Внести полученное значение в табл. 4.1, указать соответствующие единицы измерения.

8. С помощью кнопки «Уменьшить» вернуть циклограмму к исходному виду.

9. По формуле

$$T = t_к - t_н \tag{4.1}$$

определить значение периода $T$ как разность конечного и начального времени. Внести полученное значение в табл. 4.1, указать соответствующие единицы измерения.

10. По формуле

$$\gamma = \frac{360°}{N_T} \tag{4.2}$$

определить угол γ, на который поворачивается диск энкодера за один период. Результат внести в табл. 4.1, указать соответствующие единицы измерения.

11. По формуле

$$\Delta\gamma = \frac{\gamma}{T} \tag{4.3}$$

определить угол Δγ, на который диск энкодера поворачивается за единицу времени. Результат внести в табл. 4.1, указать соответствующие единицы измерения.

12. Перейти в «Свойства графического анализатора» (см. рис. 3.7, поз. *2*) и на вкладке «Измерение» (см. рис. 3.8, *а*) определить значение *t* параметра «Общее время», за которое происходит считывание сигнала и его вывод в рабочее поле графического анализатора. Внести это значение в табл. 4.1, указать соответствующие единицы измерения.

13. По формуле

$$\alpha = t\Delta\gamma \tag{4.4}$$

определить угол α, на который диск повернулся за общее время считывания сигнала. Результат внести в табл. 4.1, указать соответствующие единицы измерения.

14. По формуле

$$t_{об} = TN_T \tag{4.5}$$

определить время $t_{об}$, за которое диск энкодера пройдет полный оборот. Результат внести в табл. 4.1, указать соответствующие единицы измерения.

15. По формуле

$$n = \frac{1\text{ об }1\text{ мин}}{t_{об}} \tag{4.6}$$

определить частоту вращения вала *n* в оборотах в минуту. Результат внести в табл. 4.1, указать обороты в минуту в графе единиц измерения.

**Порядок выполнения части 2 эксперимента**

1. Далее провести эксперимент при вращении диска против хода часовой стрелки. Для этого вначале задать режим вращения диска с максимальной частотой против хода часовой стрелки, повернув ручку потенциометра против хода часовой стрелки до упора (см. рис. 2.2, поз. *7*).

2. Затем повторить п. 2...15 первой части эксперимента, используя в этот раз канал *I*1 вместо *I*0. Определить требуемые параметры и внести результаты в соответствующие графы табл. 4.1.

**Порядок выполнения части 3 эксперимента**

1. Для второй части эксперимента (при вращении энкодера против хода часовой стрелки) зарисовать полученную циклограмму по обоим каналам *I*1 и *I*0. Оси ординат обозначить как названия каналов *A* (для *I*0) и *B* (для *I*1), ось абсцисс — как время *t* с указанием соответствующих единиц измерения (примеры обозначения и оформления см. на рис. 1.3).

2. На зарисованной циклограмме отметить (примеры обозначения и оформления см. на рис. 1.2 и 1.3):

– величину любого периода *T* по каналу *I*1 с указанием рассчитанного числового значения (см. табл. 4.1);

– величину пройденного за период угла $\gamma$ по каналу *I*1 с указанием рассчитанного числового значения (см. табл. 4.1);

– величину пройденного по циклограмме угла $\alpha$ с указанием рассчитанного числового значения (см. табл. 4.1);

– величину любого сдвига фаз *T*/4 между каналами *I*0 и *I*1. Рассчитать фактическую величину сдвига, указать его числовое значение, проверить, соответствует ли сдвиг четверти периода.

**Порядок выполнения части 4 эксперимента**

1. В среде LabSoft перейти в «Свойства графического анализатора» (см. рис. 3.7, поз. *2*) и во вкладке «Измерение» (см. рис. 3.8, *а*) изменить значение частоты дискретизации на 2 мс.

2. Снова задать режим вращения диска энкодера с максимальной частотой по ходу часовой стрелки. Нажатием кнопки считывания сигнала (см. рис. 3.7, поз. *3*) вывести циклограмму в рабочую область графического анализатора, после чего остановить вращение вала диска, установив ручку потенциометра на нулевую отметку.

3. По формуле

$$k_{об} = 4N_T \tag{4.7}$$

определить число импульсов за один оборот $k_{об}$ по каналам *I*0 и *I*1, исходя из того, что подсчитывается каждый фронт изменения сигнала (см. рис. 1.4). Результат внести в табл. 4.2.

4. Найти на циклограмме канала *I*0 первый единичный сигнал первого полного периода.

5. С помощью инструмента «Увеличить» (см. рис. 3.7, поз. *5*) максимально увеличить этот фронт и точно определить время начала оборота диска по циклограмме $t_н$. Внести полученное значение в табл. 4.2, указать соответствующие единицы измерения.

6. С помощью инструмента «Уменьшить» (см. рис. 3.7, поз. *6*) вернуть исходное состояние циклограммы.

7. Отсчитать от данного фронта (включая его) $k_{об} + 1$ фронтов по каналам *I*0 и *I*1 и определить местоположение $(k_{об} + 1)$-го фронта на циклограмме.

8. С помощью инструмента «Увеличить» (см. рис. 3.7, поз. *5*) максимально приблизить фронт и точно определите время конца оборота диска по циклограмме $t_к$. Внести полученное значение в табл. 4.2, указать соответствующие единицы измерения.

9. По формуле

$$t_{об} = t_к - t_н \tag{4.8}$$

определить время полного оборота $t_{об}$ диска. Внести полученное значение в табл. 4.2, указать соответствующие единицы измерения.

10. По формуле

$$\Delta\gamma_k = \frac{360°}{k_{об}} \tag{4.9}$$

определить угол $\Delta\gamma_k$, на который диск поворачивается за один импульс. Внести полученное значение в табл. 4.2, указать соответствующие единицы измерения.

11. Перейти в «Свойства графического анализатора» (см. рис. 3.7, поз. *2*) и во вкладке «Измерение» (см. рис. 3.8, *а*) определить новое значение *t* параметра «Общее время», за которое происходит считывание сигнала и его вывод в рабочее поле графического анализатора. Внести это значение в табл. 4.2, указать соответствующие единицы измерения.

12. По формуле

$$k_\alpha = \frac{t k_{об}}{t_{об}} \tag{4.10}$$

определить число импульсов $k_\alpha$, которые энкодер считает за время *t*. Внести результат в табл. 4.2.

13. По формуле

$$\alpha = k_\alpha \Delta\gamma_k \tag{4.11}$$

определить угол $\alpha$, на который диск повернулся за общее время считывания сигнала. Результат внести в табл. 4.2, указать соответствующие единицы измерения.

14. По формуле (4.6) определить частоту вращения вала $n$ в оборотах в минуту. Результат внести в табл. 4.2, указать обороты в минуту в графе единиц измерения.

15. По формуле

$$\Delta = |n' - n|, \tag{4.12}$$

где $n'$ — вычисленное ранее значение частоты вращения диска по ходу часовой стрелки по каналу *I*0 (см. табл. 4.1), определить абсолютную методическую погрешность. Результат внести в табл. 4.2, указать соответствующие единицы измерения.

16. По формуле

$$\delta = \frac{\Delta}{n'}, \tag{4.13}$$

где $n'$ — вычисленное ранее значение частоты вращения диска по ходу часовой стрелки по каналу *I*0 (см. табл. 4.1), определить относительную методическую погрешность. Результат внести в табл. 4.2, указать проценты в графе единиц измерения.

17. На построенной в 3 части циклограмме отметить:

– число импульсов $k_T$ за период на отмеченном ранее периоде (см. табл. 4.1) с указанием рассчитанного значения;

– число импульсов $k'_\alpha$ за отмеченный ранее угол $\alpha$ (см. табл. 4.1), подсчитать это значение по циклограмме.

## 4.3. Использование инкрементного энкодера с нулевым каналом для определения частоты вращения и абсолютного положения вала

**Подготовка к эксперименту**

1. Сформировать табл. 4.3 и 4.4 для внесения в них экспериментальных данных.

2. Приготовить оптический диск инкрементного энкодера с нулевым каналом (см. рис. 2.3).

3. Установить диск энкодера на вал, как показано на рис. 4.2. Для корректной установки нулевого положения отсчетное отверстие диска должно находиться в крайнем нижнем положении, а референтная метка канала *Z* располагаться справа от установочного отверстия (см. также рис. 2.3).

4. После установки убедиться, что все сигнальные лампы каналов (см. рис. 2.2, поз. *11*) не горят. В противном случае слегка сместить диск в направлении против хода часовой стрелки, пока не погаснут все лампы.

5. Собрать схему электрических соединений эксперимента (рис. 4.2).

6. В среде LabSoft перейти в «Свойства графического анализатора» (см. рис. 3.7, поз. *2*).

7. Во вкладке «Измерение» (см. рис. 3.8, *а*) в качестве ~~частоты~~ периода дискретизации установить значение 5 мс и галочку напротив пункта «Настроить градуировку диаграммы».

8. Перейти во вкладку «Выход» (см. рис. 3.8, *б*). Если в поле не добавлено ни одного сигнала, нажать на кнопку «Образец» и выбрать выход «Счетчик» для его добавления. Если в поле уже добавлены сигналы «Счетчика», оставить все без изменений. Если в поле добавлены сигналы другого типа, удалить все существующие сигналы и добавить выход «Счетчик».

9. Перейти в «Свойства рабочего поля графического анализатора» (см. рис. 3.9).

10. Во вкладке «Сигналы» (см. рис. 3.10, *а*) оставить для вывода в рабочее поле графического анализатора только сигналы *I*0, *I*1 и *I*2, отметив их галочками и убрав галочки со всех остальных сигналов в списке.

11. Во вкладке «Ось X» (см. рис. 3.10, *б*) установить значение параметра «Деление» на 0,005 с.

*Таблица 4.3*

**Определение частоты вращения вала с помощью нулевого канала инкрементного энкодера**

| Параметр | Расчетный канал | Время начала оборота | Время конца оборота | Время полного оборота | Время по циклограмме | Частота вращения | Абсолютная методическая погрешность | Относительная методическая погрешность |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Обозначение | – | $t_н$ | $t_к$ | $t_{об}$ | $t$ | $n$ | $\Delta$ | $\delta$ |
| Единица измерения | – | | | | | | | |
| По ходу часовой стрелки | *I*2 | | | | | | | |

*Таблица 4.4*

**Определение абсолютного положения вала с помощью нулевого канала инкрементного энкодера**

| Параметр | Расчетный канал | Угол, пройденный за единицу времени | Время нулевого положения | Время конечного положения | Время от начального положения до конечного | Абсолютное положение |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Обозначение | – | $\Delta\gamma$ | $t_0$ | $t_к$ | $t_\theta$ | $\theta$ |
| Единица измерения | – | | | | | |
| По ходу часовой стрелки | *I*2 | | | | | |

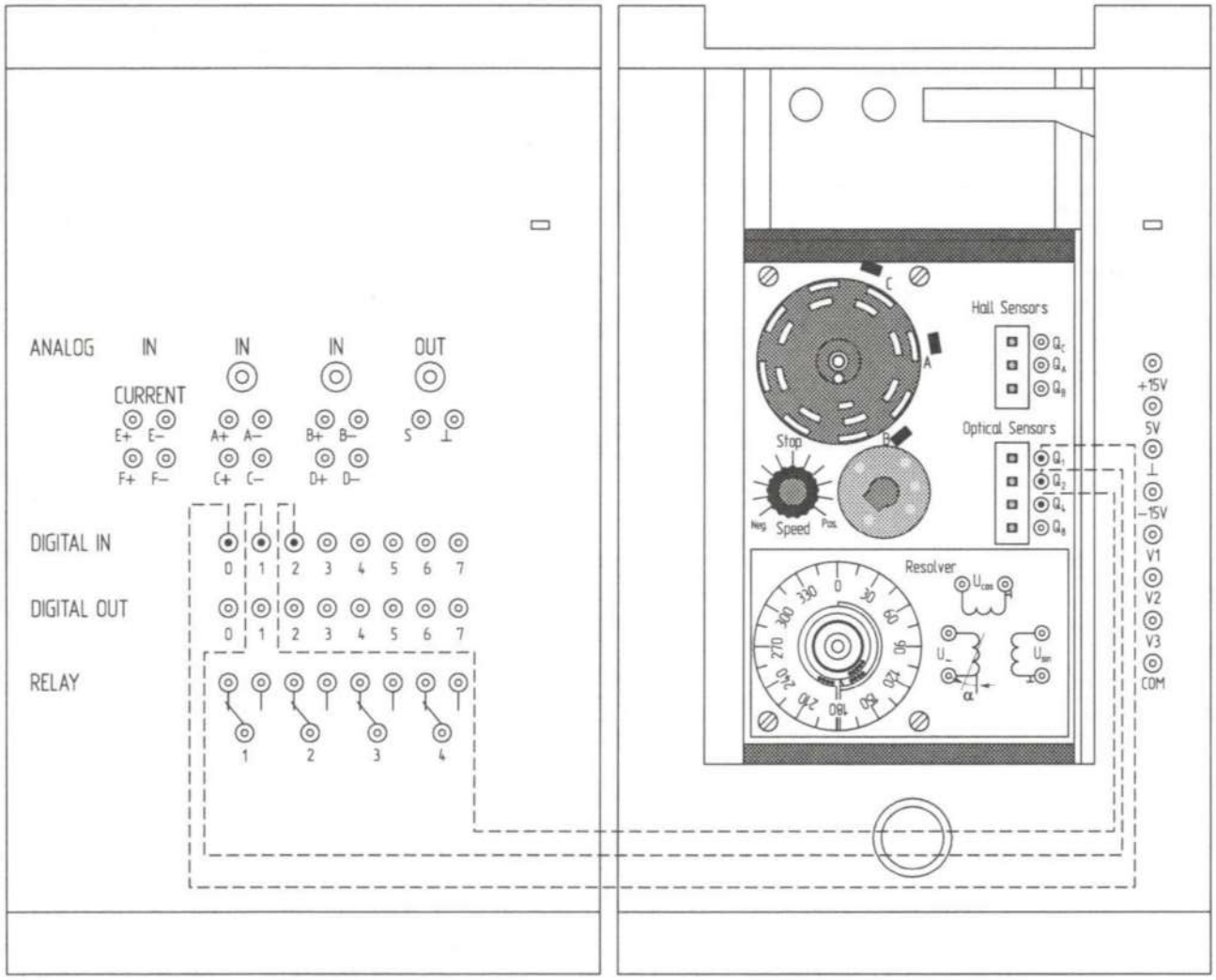



**Рис. 4.2.** Схема электрических соединений лабораторной установки для эксперимента с инкрементным энкодером с нулевым каналом:

––– — электрические проводники; ● — место подключения проводников к контактам

**Эксперимент состоит из трех частей:**

1) определение частоты вращения по каналу *Z* (канал *I*2) при вращении по ходу часовой стрелки;

2) определение угла поворота и абсолютного положения с помощью канала *Z* (канал *I*2) при вращении по ходу часовой стрелки;

3) построение циклограммы при вращении диска по ходу часовой стрелки.

**Порядок выполнения части 1 эксперимента**

1. Задать режим вращения диска энкодера с максимальной частотой по ходу часовой стрелки. Для этого повернуть ручку потенциометра (см. рис. 2.2, поз. *7*) по ходу часовой стрелки до упора.

2. Нажатием кнопки считывания сигнала (см. рис. 3.7, поз. *3*) вывести циклограмму в рабочую область графического анализатора.

3. Остановить вращение вала диска, установив ручку потенциометра на нулевую отметку.

4. Найти на циклограмме канала *I*2 первый единичный сигнал.

5. С помощью инструмента «Увеличить» (см. рис. 3.7, поз. *5*) максимально увеличить первый фронт данного единичного сигнала и точно определить время начала оборота диска по циклограмме $t_н$. Внести полученное значение в табл. 4.3, указать соответствующие единицы измерения.

6. С помощью инструмента «Уменьшить» (см. рис. 3.7, поз. *6*) вернуть исходное состояние циклограммы.

7. Найти на циклограмме канала *I*2 второй единичный сигнал.

8. С помощью инструмента «Увеличить» максимально увеличить первый фронт данного единичного сигнала и точно определить время конца оборота диска по циклограмме $t_к$. Внести полученное значение в табл. 4.3, указать соответствующие единицы измерения.

9. С помощью кнопки «Уменьшить» вернуть циклограмму к исходному виду.

10. По формуле (4.8) определить время полного оборота $t_{об}$ диска. Внести полученное значение в табл. 4.3, указать соответствующие единицы измерения.

11. Перейти в «Свойства графического анализатора» (см. рис. 3.7, поз. *2*) и во вкладке «Измерение» (см. рис. 3.8, *а*) определить значение *t* параметра «Общее время», за которое происходит считывание сигнала и его вывод в рабочее поле графического анализатора. Внести это значение в табл. 4.3, указать соответствующие единицы измерения.

12. По формуле (4.6) определить частоту вращения вала $n$ в оборотах в минуту. Результат внести в табл. 4.3, указать обороты в минуту в графе единиц измерения.

13. По формуле (4.12), где $n'$ — определенное ранее значение частоты вращения по ходу часовой стрелки по каналу *I*0 (см. табл. 4.1), определить абсолютную методическую погрешность. Результат внести в табл. 4.3, указать соответствующие единицы измерения.

14. По формуле (4.13), где $n'$ — определенное ранее значение частоты вращения по ходу часовой стрелки по каналу *I*0 (см. табл. 4.1), определить относительную методическую погрешность. Результат внести в табл. 4.3, указать проценты в графе единиц измерения.

**Порядок выполнения части 2 эксперимента**

1. По формуле

$$\Delta\gamma = \frac{360^\circ}{t_{об}} \tag{4.14}$$

определить угол $\Delta\gamma$, на который диск энкодера поворачивается за единицу времени. Результат внести в табл. 4.4, указать соответствующие единицы измерения.

2. Найти на циклограмме канала *I*2 последний единичный сигнал.

3. С помощью инструмента «Увеличить» (см. рис. 3.7, поз. *5*) максимально увеличить первый фронт данного единичного сигнала и точно определить время нулевого положения незавершенного оборота $t_0$. Внести полученное значение в табл. 4.4, указать соответствующие единицы измерения.

4. С помощью кнопки «Уменьшить» (см. рис. 3.7, поз. *6*) вернуть циклограмму к исходному виду.

5. Абсолютное положение вала диска энкодера рассчитать в конечный момент считывания сигнала. Внести значение общего времени $t$, определенное ранее в п. 11, в качестве значения $t_к$ в табл. 4.4, указать соответствующие единицы измерения.

6. По формуле

$$t_\theta = t_к - t_0 \tag{4.15}$$

определить время $t_\theta$, которое прошло от нулевого положения диска до конечного. Внести полученное значение в табл. 4.4, указать соответствующие единицы измерения.

7. По формуле

$$\theta = t_\theta \Delta\gamma \tag{4.16}$$

определить абсолютное положение вала θ. Внести полученное значение в табл. 4.4, указать соответствующие единицы измерения.

**Порядок выполнения части 3 эксперимента**

1. Зарисовать циклограмму по каналам *I*0, *I*1 и *I*2 от момента времени $t_0$ до конца считывания сигнала. Оси ординат обозначить как названия каналов *A* (для *I*0), *B* (для *I*1) и *Z* (для *I*2); ось абсцисс — как время *t* с указанием соответствующих единиц измерения (примеры обозначения и оформления см. на рис. 1.5).

2. На зарисованной циклограмме обозначить (примеры обозначения и оформления см. на рис. 1.2 и 1.5) величину угла абсолютного положения θ с указанием рассчитанного значения (см. табл. 4.4).

## 4.4. Использование абсолютного энкодера с двоичной кодировкой для определения угла поворота, частоты вращения и абсолютного положения вала

**Подготовка к эксперименту**

1. Сформировать табл. 4.5 и 4.6 для внесения в них экспериментальных данных.

2. Приготовить оптический диск абсолютного энкодера с двоичной кодировкой (см. рис. 2.4, *а*).

3. Подсчитать число дорожек диска $L$ и внести результат в табл. 4.5.

4. Установить диск энкодера на вал, как показано на рис. 4.3. Для корректной установки нулевого положения отсчетное отверстие диска должно находиться в крайнем правом положении (см. также рис. 2.4, *а*).

5. После установки убедиться, что все сигнальные лампы каналов (см. рис. 2.2, поз. *11*) не горят. В противном случае слегка сместить диск в направлении против хода часовой стрелки, пока не погаснут все лампы.

6. Собрать схему электрических соединений эксперимента (см. рис. 4.3).

7. В среде LabSoft перейти в «Свойства графического анализатора» (см. рис. 3.7, поз. *2*).

8. Во вкладке «Измерение» (см. рис. 3.8, *а*) в качестве ~~частоты~~ периода дискретизации установить значение 1 мс и галочку напротив пункта «Настроить градуировку диаграммы».

9. Перейти во вкладку «Выход» (см. рис. 3.8, *б*). Если в поле не добавлено ни одного сигнала, нажать на кнопку «Образец» и выбрать выход «Счетчик» для его добавления. Если в поле уже добавлены сигналы «Счетчика», оставить все без изменений. Если в поле добавлены сигналы другого типа, удалить все существующие сигналы и добавить выход «Счетчик».

10. Перейти в «Свойства рабочего поля графического анализатора» (см. рис. 3.9).

11. Во вкладке «Сигналы» (см. рис. 3.10, *а*) оставить для вывода в рабочее поле графического анализатора только сигналы $I0$, $I1$, $I2$ и $I3$, отметив их галочками и убрав галочки со всех остальных сигналов в списке.

12. Во вкладке «Ось X» (см. рис. 3.10, *б*) установить значение параметра «Деление» на 0,005 с.

*Таблица 4.5*

**Определение угла поворота и абсолютного положения вала с помощью абсолютного энкодера с двоичной кодировкой**

| Параметр | Число дорожек диска | Число состояний за полный оборот | Минимальное угловое перемещение | Двоичный код начального состояния | Десятичный номер начального состояния | Двоичный код конечного состояния | Десятичный номер конечного состояния | Число состояний по циклограмме | Угол, пройденный по циклограмме | Число состояний от нулевого положения | Абсолютное положение |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Обозначение | $L$ | $N$ | $\gamma$ | $b_2^{\text{н}}$ | $b_{10}^{\text{н}}$ | $b_2^{\text{к}}$ | $b_{10}^{\text{к}}$ | $N_\alpha$ | $\alpha$ | $N_\theta$ | $\theta$ |
| Единица измерения | – | – | | – | – | – | – | – | | – | |
| По ходу часовой стрелки | | | | | | | | | | | |
| Против хода часовой стрелки | | | | | | | | | | | |

*Таблица 4.6*

**Определение частоты вращения вала с помощью абсолютного энкодера с двоичной кодировкой**

| Параметр | Время по циклограмме | Число состояний, пройденное по циклограмме | Время полного оборота | Частота вращения | Абсолютная методическая погрешность | Относительная методическая погрешность |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Обозначение | $t$ | $N_t$ | $t_{об}$ | $n$ | $\Delta$ | $\delta$ |
| Единица измерения | | – | | | | |
| По ходу часовой стрелки | | | | | | |
| Против хода часовой стрелки | | | | | | |

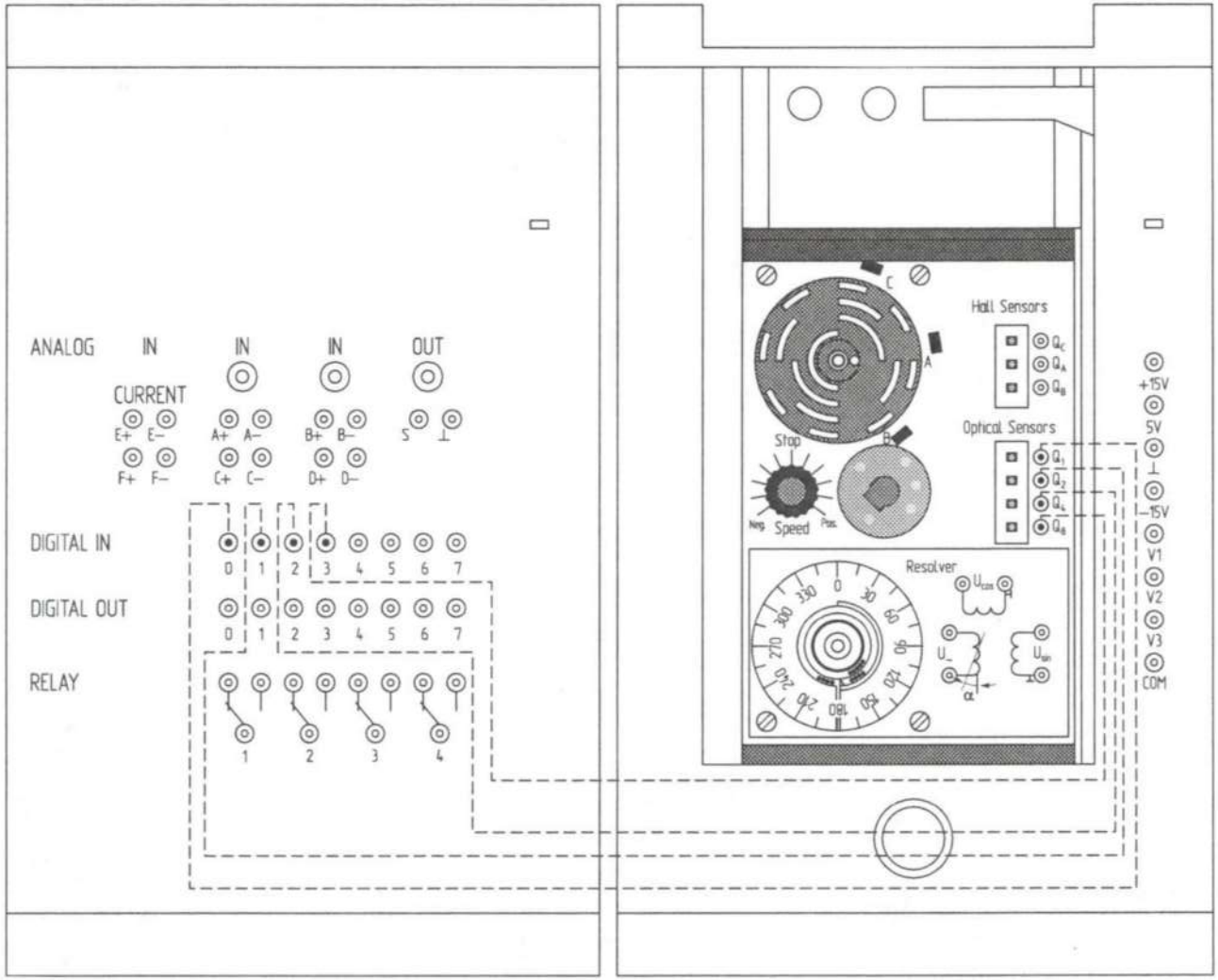



**Рис. 4.3.** Схема электрических соединений лабораторной установки с абсолютным энкодером с двоичной кодировкой:
— — — — электрические проводники; ● — место подключения проводников к контактам

**Эксперимент состоит из трех частей:**

1) определение угла поворота, частоты вращения и абсолютного положения вала при вращении по ходу часовой стрелки;

2) определение угла поворота, частоты вращения и абсолютного положения вала при вращении против хода часовой стрелки;

3) построение циклограммы при вращении против хода часовой стрелки.

**Порядок выполнения части 1 эксперимента**

1. По формуле

$$N = 2^L \tag{4.17}$$

определить число уникальных двоичных состояний $N$ оптического диска энкодера. Внести результат в табл. 4.5.

2. По формуле

$$\gamma = \frac{360^\circ}{N} \tag{4.18}$$

определить минимальное угловое перемещение диска $\gamma$, вызывающее изменение сигнала. Внести результат в табл. 4.5, указать соответствующие единицы измерения.

3. Задать режим вращения диска энкодера с максимальной частотой по ходу часовой стрелки. Для этого повернуть ручку потенциометра (см. рис. 2.2, поз. *7*) по ходу часовой стрелки до упора.

4. Нажатием кнопки считывания сигнала (см. рис. 3.7, поз. *3*) вывести циклограмму в рабочую область графического анализатора.

5. Остановить вращение вала, установив ручку потенциометра на нулевую отметку.

6. По сигналам каналов *I*0...*I*3 определить двоичный код сектора $b_2^{\text{н}}$ в начальный момент времени на циклограмме. Внести результат в табл. 4.5.

7. По табл. 2.1 (или рис. 2.4, *б*) определить десятичный номер сектора диска энкодера в начальном положении $b_{10}^{\text{н}}$, соответствующий его двоичному коду. Внести результат в табл. 4.5.

8. По сигналам каналов *I*0...*I*3 определить двоичный код сектора $b_2^{\text{к}}$ в конечный момент времени на циклограмме. Внести результат в табл. 4.5.

9. По табл. 2.1 (или рис. 2.4, *б*) определить десятичный номер сектора диска энкодера в конечном положении $b_{10}^{\text{к}}$, соответствующий его двоичному коду. Внести результат в табл. 4.5.

10. По табл. 2.1 (или рис. 2.4, *б*) посчитать количество двоичных состояний $N_\alpha$, которое диск прошел от состояния $b_2^{\text{н}}$ до состояния $b_2^{\text{к}}$ с учетом вращения по ходу часовой стрелки. Внести результат в табл. 4.5.

11. По формуле

$$\alpha = \gamma N_\alpha \tag{4.19}$$

определить угол $\alpha$, на который диск повернулся за общее время считывания сигнала. Внести результат в табл. 4.5, указать соответствующие единицы измерения.

12. По табл. 2.1 (или рис. 2.4, *б*) посчитать количество двоичных состояний $N_\theta$, которое диск прошел от нулевого положения до состояния $b_2^{\text{к}}$. Внести результат в табл. 4.5.

13. По формуле

$$\theta = \gamma N_\theta \tag{4.20}$$

определить абсолютное положение $\theta$ вала в момент окончания считывания сигнала. Внести результат в табл. 4.5, указать соответствующие единицы измерения.

14. Перейти в «Свойства графического анализатора» (см. рис. 3.7, поз. *2*) и на вкладке «Измерение» (см. рис. 3.8, *а*) определить значение $t$ параметра «Общее время», за которое происходит считывание сигнала и его вывод в рабочее поле графического анализатора. Внести это значение в табл. 4.6, указать соответствующие единицы измерения.

15. Число состояний, пройденное по циклограмме $N_t$, соответствует определенному ранее $N_\alpha$. Внести данное значение в табл. 4.6.

16. По формуле

$$t_{\text{об}} = \frac{Nt}{N_t} \tag{4.21}$$

определить время одного оборота $t_{\text{об}}$. Внести это значение в табл. 4.6, указать соответствующие единицы измерения.

17. По формуле (4.6) определить частоту вращения $n$ вала в оборотах в минуту. Результат внести в табл. 4.6, указать обороты в минуту в графе единиц измерения.

18. По формулам (4.12) и (4.13), где $n'$ — определенное ранее значение скорости вращения вала по ходу часовой стрелки по каналу *I*0 (см. табл. 4.1), определить значение абсолютной методической погрешности $\Delta$ и относительной методической погрешности $\delta$. Результаты внести в табл. 4.6, указать соответствующие единицы измерения.

**Порядок выполнения части 2 эксперимента**

1. Далее провести эксперимент при вращении диска против хода часовой стрелки. Для этого вначале задать режим вращения диска энкодера с максимальной частотой против хода часовой стрелки, повернув ручку потенциометра против хода часовой стрелки до упора (см. рис. 2.2, поз. *7*).

2. Затем повторить п. 4–18 первой части. В п. 10 учитывать вращение против хода часовой стрелки при подсчете состояний. В п. 18 принять $n'$ как определенное ранее значение частоты вращения против хода часовой стрелки по каналу *I*1 (см. табл. 4.1). Определить требуемые параметры и внести результаты в табл. 4.5 и 4.6.

**Порядок выполнения части 3 эксперимента**

1. Зарисовать циклограмму по каналам *I*0...*I*3. Оси ординат обозначить как названия каналов *A*, *B*, *C*, *D* либо *Q*1, *Q*2, *Q*4, *Q*8 для каналов *I*0...*I*3 соответственно. Ось абсцисс обозначить как время *t* с указанием соответствующих единиц измерения (примеры обозначения и оформления см. на рис. 1.6).

2. Разбить построенную циклограмму на состояния (пример обозначения и оформления см. рис. 1.6) и выделить отдельно места, в которых нарушается одновременность перехода из одного состояния в другое.

## 4.5. Использование абсолютного энкодера с кодировкой Грея для определения угла поворота, частоты вращения и абсолютного положения вала

**Порядок подготовки к эксперименту**

1. Сформировать табл. 4.7 и 4.8 для внесения в них экспериментальных данных.

2. Приготовить оптический диск абсолютного энкодера с кодировкой Грея (см. рис. 2.5, *а*).

3. Подсчитать число *L* дорожек диска и внести результат в табл. 4.7.

4. Установить диск энкодера на вал, как показано на рис. 4.4. Для корректной установки нулевого положения отсчетное отверстие диска должно находиться в крайнем левом положении (см. также рис. 2.5, *а*).

5. После установки убедиться, что все сигнальные лампы каналов (см. рис. 2.2, поз. *11*) не горят. В противном случае слегка сместить диск в направлении против хода часовой стрелки, пока не погаснут все лампы.

6. Собрать схему электрических соединений эксперимента (см. рис. 4.4).

7. В среде LabSoft перейти в «Свойства графического анализатора» (см. рис. 3.7, поз. *2*).

8. Во вкладке «Измерение» (см. рис. 3.8, *а*) в качестве ~~частоты~~ периода дискретизации установить значение 1 мс и галочку напротив пункта «Настроить градуировку диаграммы».

9. Перейти во вкладку «Выход» (см. рис. 3.8, *б*). Если в поле не добавлено ни одного сигнала, нажать на кнопку «Образец» и выбрать выход «Счетчик» для его добавления. Если в поле уже добавлены сигналы «Счетчика», оставить все без изменений. Если в поле добавлены сигналы другого типа, удалить все существующие сигналы и добавить выход «Счетчик».

10. Перейти в «Свойства рабочего поля графического анализатора» (см. рис. 3.9).

11. Во вкладке «Сигналы» (см. рис. 3.10, *а*) оставить для вывода в рабочее поле графического анализатора только сигналы *I*0, *I*1, *I*2 и *I*3, отметив их галочками и убрав галочки со всех остальных сигналов в списке.

12. Во вкладке «Ось X» (см. рис. 3.10, *б*) установить значение параметра «Деление» на 0,005 с.

*Таблица 4.7*

**Определение угла поворота и абсолютного положения вала с помощью абсолютного энкодера с кодировкой Грея**

| Параметр | Число дорожек диска | Число состояний за полный оборот | Минимальное угловое перемещение | Код Грея начального состояния | Десятичный номер начального состояния | Код Грея конечного состояния | Десятичный номер конечного состояния | Число состояний по циклограмме | Угол, пройденный по циклограмме | Число состояний от нулевого положения | Абсолютное положение |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Обозначение | $L$ | $N$ | $\gamma$ | $b_{G2}^{н}$ | $b_{10}^{н}$ | $b_{G2}^{к}$ | $b_{10}^{к}$ | $N_\alpha$ | $\alpha$ | $N_\theta$ | $\theta$ |
| Единица измерения | – | – | | – | – | – | – | – | | – | |
| По ходу часовой стрелки | | | | | | | | | | | |
| Против хода часовой стрелки | | | | | | | | | | | |

*Таблица 4.8*

**Определение частоты вращения вала с помощью абсолютного энкодера с кодировкой Грея**

| Параметр | Общее время по циклограмме | Число состояний по циклограмме | Время полного оборота | Частота вращения | Абсолютная методическая погрешность | Относительная методическая погрешность |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Обозначение | $t$ | $N_t$ | $t_{об}$ | $n$ | $\Delta$ | $\delta$ |
| Единица измерения | | – | | | | |
| По ходу часовой стрелки | | | | | | |
| Против хода часовой стрелки | | | | | | |

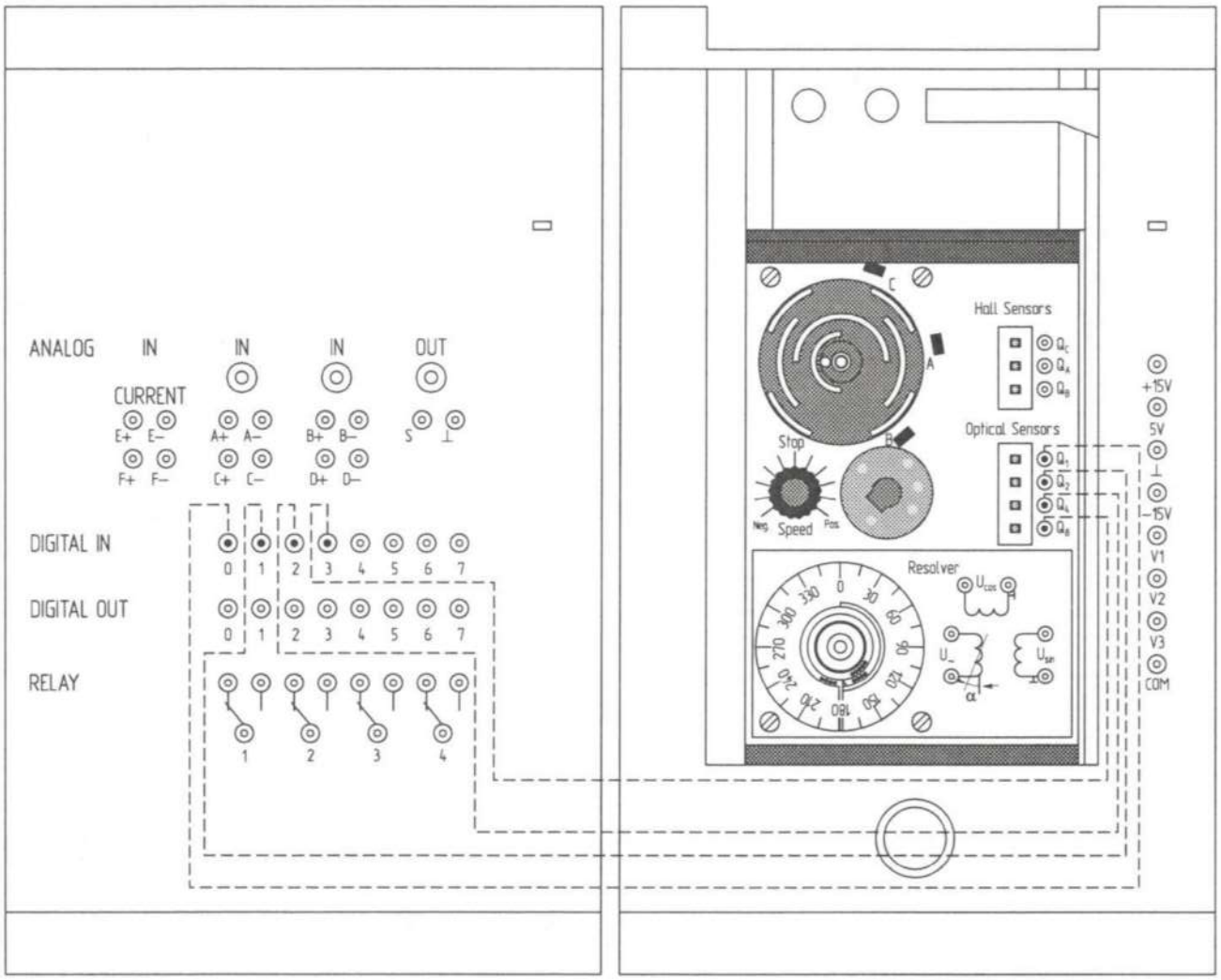



**Рис. 4.4.** Схема электрических соединений лабораторной установки с абсолютным энкодером с кодировкой Грея: ––– — электрические проводники; ● — место подключения проводников к контактам

**Эксперимент состоит из трех частей:**

1) определение угла поворота, частоты вращения и абсолютного положения вала при вращении против хода часовой стрелки;

2) определение угла поворота, частоты вращения и абсолютного положения вала при вращении по ходу часовой стрелки;

3) построение циклограммы при вращении по ходу часовой стрелки.

**Порядок выполнения части 1 эксперимента**

1. По формуле (4.17) определить число уникальных двоичных состояний $N$ оптического диска энкодера. Внести результат в табл. 4.7.

2. По формуле (4.18) определить минимальное угловое перемещение диска $\gamma$, вызывающее изменение сигнала. Внести результат в табл. 4.7, указать соответствующие единицы измерения.

3. Задать режим вращения диска энкодера с максимальной частотой против хода часовой стрелки. Для этого повернуть ручку потенциометра (см. рис. 2.2, поз. *7*) против хода часовой стрелки до упора.

4. Нажатием кнопки считывания сигнала (см. рис. 3.7, поз. *3*) вывести циклограмму в рабочую область графического анализатора.

5. Остановить вращение вала, установив ручку потенциометра на нулевую отметку.

6. По сигналам каналов *I*0...*I*3 определить двоичное значение в кодировке Грея $b_{G2}^{н}$ в начальный момент времени на циклограмме, внести результат в табл. 4.7.

7. По табл. 2.2 (или рис. 2.5, *б*) определить десятичный номер сектора диска энкодера в начальном положении $b_{10}^{н}$, соответствующий его двоичному значению в кодировке Грея. Внести результат в табл. 4.7.

8. По сигналам каналов *I*0...*I*3 определить двоичное значение в кодировке Грея $b_{G2}^{к}$ в конечный момент времени на циклограмме. Внести результат в табл. 4.7.

9. По табл. 2.2 (или рис. 2.5, *б*) определить десятичный номер сектора диска энкодера в конечном положении $b_{10}^{к}$, соответствующий его двоичному значению в кодировке Грея. Внести результат в табл. 4.7.

10. По табл. 2.2 (или рис. 2.5, *б*) посчитать количество двоичных состояний $N_\alpha$ при движении диска против хода часовой стрелки от состояния $b_{G2}^{н}$ до состояния $b_{G2}^{к}$. Внести результат в табл. 4.7.

11. По формуле (4.19) найти угол $\alpha$, на который диск повернулся за общее время считывания сигнала. Внести результат в табл. 4.7, указать соответствующие единицы измерения.

12. По табл. 2.2 (или рис. 2.5, *б*) посчитать количество двоичных состояний $N_\theta$, которое диск прошел от нулевого положения до состояния $b_{G2}^{к}$. Внести результат в табл. 4.7.

13. По формуле (4.20) определить абсолютное положение диска $\theta$ в момент окончания считывания сигнала. Внести результат в табл. 4.7, указать соответствующие единицы измерения.

14. Перейти в «Свойства графического анализатора» (см. рис. 3.7, поз. *2*) и во вкладке «Измерение» (см. рис. 3.8, *а*) определить значение *t* параметра «Общее время», за которое происходит считывание сигнала и его вывод в рабочее поле графического анализатора. Внести это значение в табл. 4.8, указать соответствующие единицы измерения.

15. Число состояний, пройденное по циклограмме $N_t$, соответствует определенному ранее $N_\alpha$. Внести данное значение в табл. 4.8.

16. По формуле (4.21) определить время одного оборота $t_{об}$. Внести это значение в табл. 4.8, указать соответствующие единицы измерения.

17. По формуле (4.6) определить частоту вращения вала *n* в оборотах в минуту. Результат внести в табл. 4.8, указать обороты в минуту в графе единиц измерения.

18. По формулам (4.12) и (4.13), где $n'$ — определенное ранее значение частоты вращения диска против хода часовой стрелки по каналу *I*1 (см. табл. 4.1), найти абсолютную методическую погрешность $\Delta$ и относительную методическую погрешность $\delta$. Результаты внести в табл. 4.8, указать соответствующие единицы измерения.

**Порядок выполнения части 2 эксперимента**

1. Далее провести эксперимент при вращении диска по ходу часовой стрелки. Для этого вначале задать режим вращения диска энкодера с максимальной частотой по ходу часовой стрелки, повернув ручку потенциометра по ходу часовой стрелки до упора (см. рис. 2.2, поз. *7*).

2. После этого повторить п. 4–18 первой части эксперимента. В п. 10 необходимо учитывать вращение по ходу часовой стрелки при подсчете состояний. В п. 18 принять $n'$ как определенное ранее значение частоты вращения диска по ходу часовой стрелки по каналу *I*0 (см. табл. 4.1). Определить требуемые параметры и внести результаты в табл. 4.7 и 4.8.

**Порядок выполнения части 3 эксперимента**

1. Зарисовать циклограмму по каналам *I*0...*I*3. Оси ординат обозначить как названия каналов *A*, *B*, *C*, *D* либо *Q*1, *Q*2, *Q*4, *Q*8 для каналов *I*0...*I*3 соответственно. Ось абсцисс обозначить как время *t* с указанием единиц измерения (примеры обозначения и оформления см. на рис. 1.8).

2. Разбить построенную циклограмму на состояния (пример обозначения и оформления см. на рис. 1.8).

## СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Титульный лист с указанными фамилией, именем, отчеством студента, номером группы и наименованием работы.

2. Цель работы.

3. Краткое изложение теории по материалам гл. 1.

4. Формулы (4.1)–(4.21) из гл. 4, по которым проводились расчеты.

5. Результаты определения угла поворота и частоты вращения вала по каждому из каналов инкрементного энкодера и путем подсчета импульсов обоих каналов (табл. 4.1 и 4.2).

6. Построенная циклограмма по двум каналам для диска инкрементного энкодера при вращении против хода часовой стрелки с обозначенными показателями (п. 1, 2 части 3 эксперимента и п. 16 части 4 эксперимента подразд. 4.2).

7. Результаты определения частоты вращения и абсолютного положения вала по нулевому каналу инкрементного энкодера (табл. 4.3 и 4.4).

8. Построенная циклограмма для всех каналов инкрементного энкодера с референтной меткой при вращении по ходу часовой стрелки с обозначенными показателями (п. 1, 2 части 3 эксперимента подразд. 4.3).

9. Результаты определения угла поворота, абсолютного положения и частоты вращения вала с помощью абсолютного энкодера с двоичной кодировкой (табл. 4.5 и 4.6).

10. Построенная циклограмма для всех каналов абсолютного энкодера с двоичной кодировкой при вращении против хода часовой стрелки с соответствующими обозначениями (п. 1–2 части 3 эксперимента подразд. 4.4).

11. Результаты определения угла поворота, частоты вращения и абсолютного положения вала с помощью абсолютного энкодера с кодировкой Грея (табл. 4.7 и 4.8).

12. Построенная циклограмма для всех каналов абсолютного энкодера с двоичной кодировкой при вращении по ходу часовой стрелки с соответствующими обозначениями (п. 1, 2 части 3 эксперимента подразд. 4.5).

13. Выводы по результатам выполненной работы.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Что такое энкодер?
2. Какие параметры измеряют с помощью энкодера?
3. Какими бывают энкодеры по принципу действия?
4. Какими бывают энкодеры по способу выдачи информации?
5. Перечислите основные компоненты оптического энкодера.
6. Какие существуют варианты конструкции диска энкодера?
7. Опишите принцип работы оптического энкодера.
8. Какие приборы используются в качестве источников света?
9. Какие приборы используются в качестве приемников света?
10. Что такое оптрон?
11. Что называют каналом энкодера? Как принято обозначать каналы?
12. Что такое циклограмма?
13. Какие энкодеры относятся к инкрементным? Какие параметры можно измерить с помощью инкрементного энкодера?
14. В чем заключается принцип определения угла поворота вала на основе показаний инкрементного энкодера? Сколько каналов для этого необходимо?
15. В чем заключается принцип определения частоты вращения вала на основе показаний инкрементного энкодера? Сколько каналов для этого необходимо?
16. В чем заключается принцип определения направления вращения вала на основе показаний инкрементного энкодера? Сколько каналов для этого необходимо?
17. Что такое подсчет с учетверением? Как определить частоту вращения при подсчете с учетверением?
18. Что такое разрешение энкодера? Как определить разрешение энкодера? В чем оно измеряется?
19. Что такое нулевой канал инкрементного энкодера? Как обозначают нулевой канал? Для чего он предназначен?
20. В чем заключается принцип определения частоты вращения вала с использованием нулевого канала?
21. В чем заключается принцип определения абсолютного положения вала с использованием нулевого канала?
22. В чем заключается основной недостаток использования нулевого канала?
23. Какие энкодеры относят к абсолютным? Какие параметры могут быть измерены с помощью абсолютного энкодера?

24. Как устроен диск абсолютного энкодера? Какие виды кодировки диска являются самыми распространенными?

25. Как устроены диски абсолютного энкодера с двоичной кодировкой и с кодировкой Грея? Как формируются коды секторов для каждого из дисков? В какой последовательности секторы сменяют друг друга в каждом из случаев?

26. В чем заключается принцип определения частоты вращения вала на основе показаний абсолютного энкодера? Каковы различия при определении частоты вращения для двоичной кодировки и кодировки Грея?

27. В чем заключается принцип определения направления вращения вала на основе показаний абсолютного энкодера? Каковы различия при определении направления вращения для двоичной кодировки и кодировки Грея?

28. В чем заключается принцип определения угла поворота вала на основе показаний абсолютного энкодера? Каковы различия при определении угла для двоичной кодировки и кодировки Грея?

29. В чем заключается принцип определения абсолютного положения вала на основе показаний абсолютного энкодера? Каковы различия при определении абсолютного положения для двоичной кодировки и кодировки Грея?

30. Что является основным недостатком использования двоичной кодировки? Каковы основные недостатки использования кодировки Грея?

31. Где на лабораторной установке расположен вал, параметры которого измеряются энкодером?

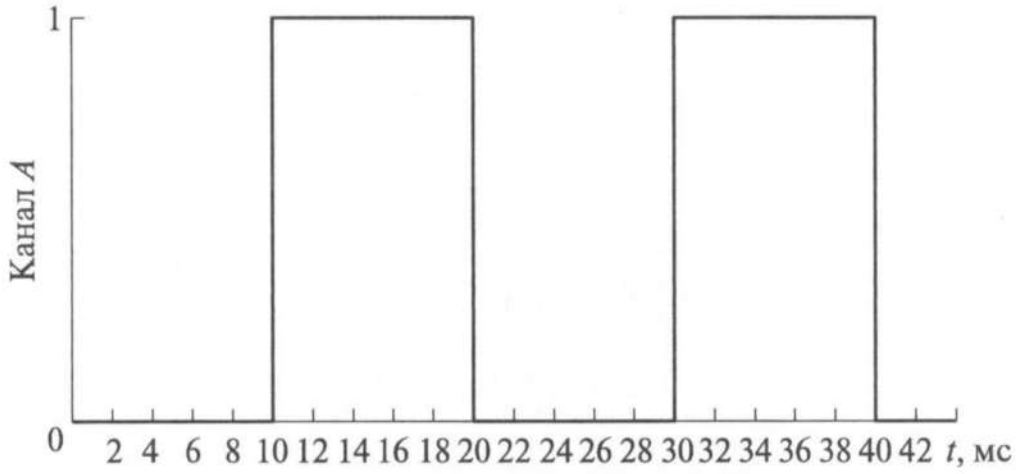
32. Где на лабораторной установке расположены оптические пары? Сколько их?

33. Как правильно установить нулевое положение диска инкрементного энкодера?

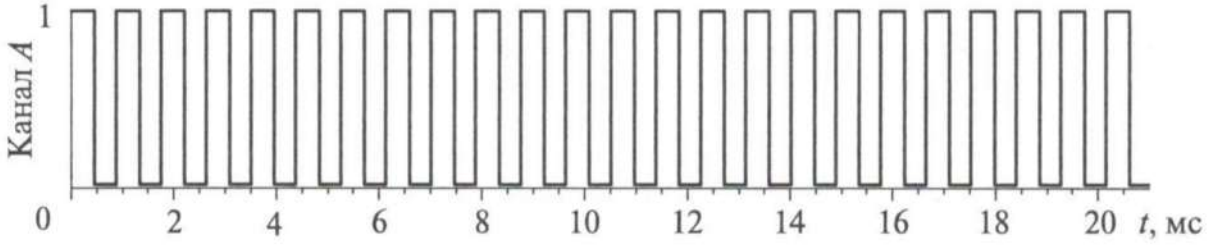
34. Как правильно установить нулевое положения диска абсолютного энкодера с двоичной кодировкой?

35. Как правильно установить нулевое положения диска абсолютного энкодера с кодировкой Грея?

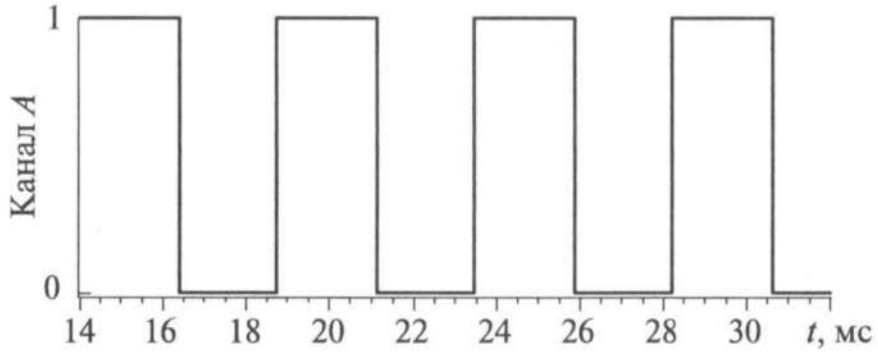
*Задание 1.* На диске инкрементного энкодера имеется одна дорожка, которая содержит 36 отражающих меток. При вращении диска энкодера с постоянной частотой была считана циклограмма, представленная на рисунке. Определите угол $\alpha$, на который повернулся диск из начального положения $t_н = 0$ мс до конечного положения $t_к = 40$ мс.




*Задание 2.* Для диска инкрементного энкодера, вращающегося с постоянной частотой, на рисунке представлена циклограмма за один оборот. Определите частоту вращения вала $n_{об}$ в оборотах в минуту.

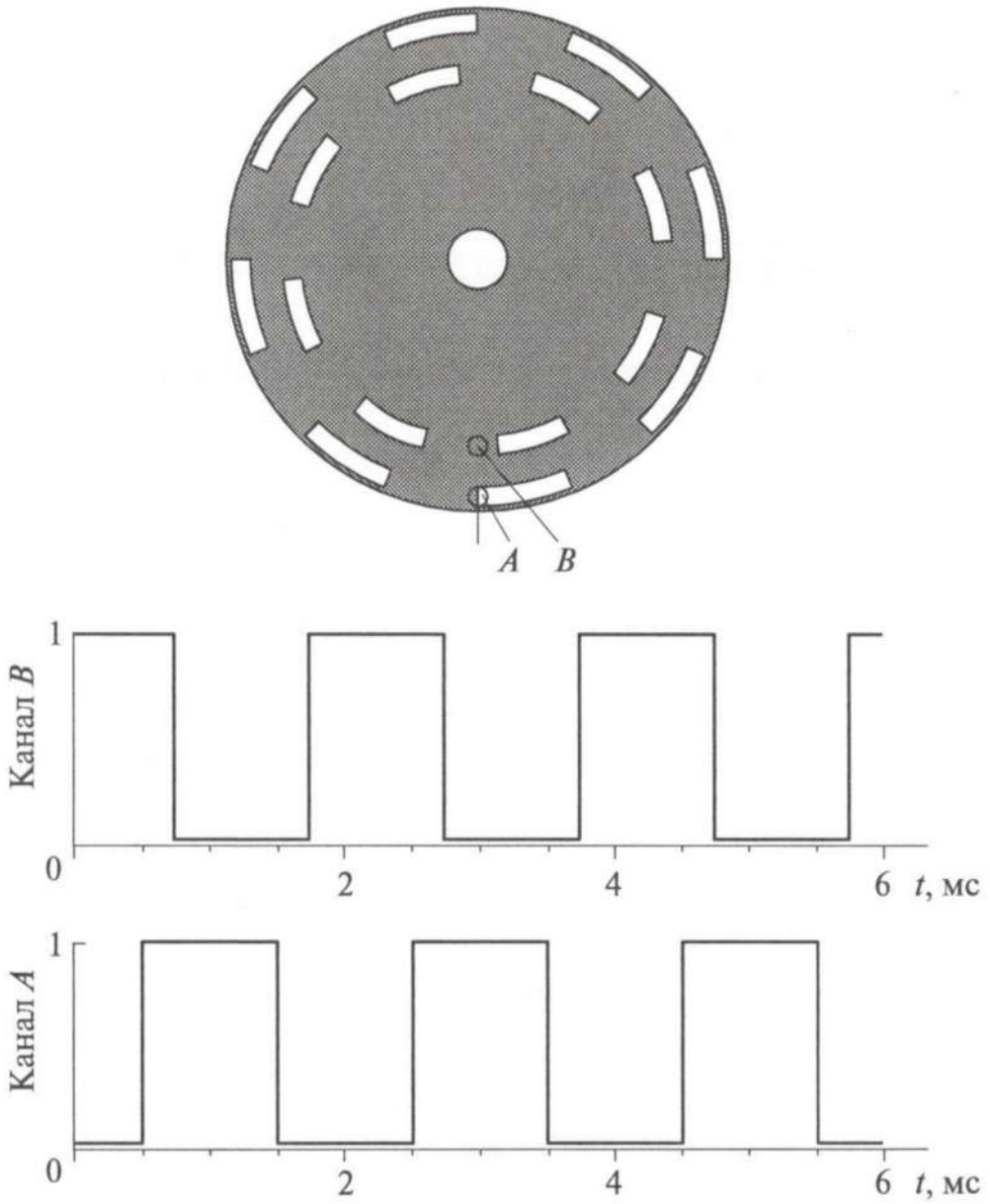



*Задание 3.* Вал вращается с постоянной частотой, и для ее измерения на нем установлен диск инкрементного энкодера с одной дорожкой, на которой нанесено 128 отражающих меток. На рисунке представлен фрагмент циклограммы энкодера. Определите частоту вращения вала $n_{об}$ в оборотах в минуту.




*Задание 4.* На рисунке представлен общий вид диска инкрементного энкодера с двумя дорожками. Места расположения ка-

налов обозначены *A* и *B*. Представлен фрагмент циклограммы по обоим каналам, полученный при вращении вала с постоянной частотой. Определите направление вращения вала.




*Задание 5.* Диск инкрементного энкодера имеет две дорожки и два канала *A* и *B*. На каждой из дорожек нанесено по 64 отражающих метки с разницей в четверть периода. От начала момента вращения вала, на котором установлен диск, прошло время $t = 525$ мс. Известно, что по одному из каналов за это время было пройдено 46 периодов. Показания энкодера обрабатываются счетчиком импульсов, который настроен на подсчет каждого фронта изменения сигнала по каждому из каналов. Определите показание

счетчика импульсов $k_{имп}$ в момент времени $t$ и рассчитайте частоту вращения вала, если известно, что в процессе вращения его частота не изменяется.

*Задание 6.* На валу, который вращается с постоянной частотой, установлен диск инкрементного энкодера, имеющий две дорожки. На каждую из дорожек диска нанесено 128 отражающих меток. Сигнал обрабатывается счетчиком импульсов, который учитывает каждый фронт изменения сигнала на каждой из дорожек. Текущее показание счетчика $k_{имп} = 442$ импульса от момента начала вращения, с которого прошло время $t = 244$ мс. Определите частоту вращения вала в оборотах в минуту.

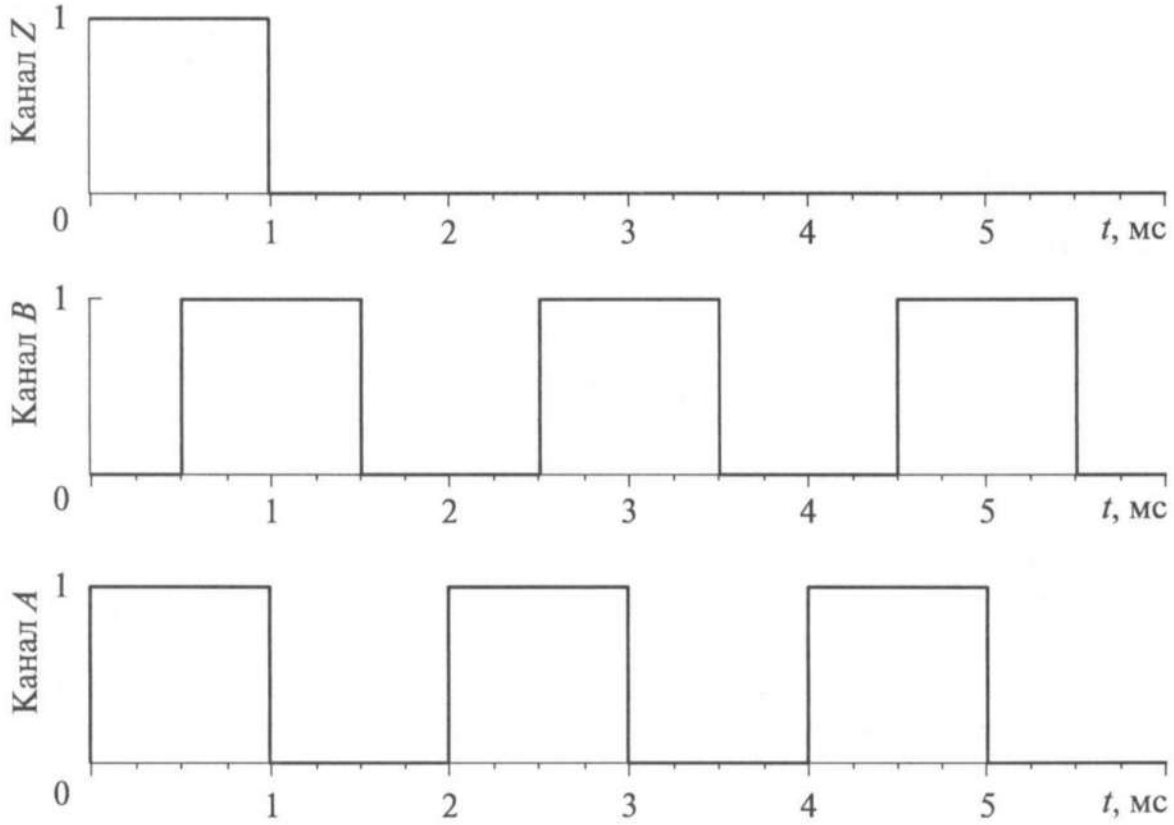
*Задание 7.* Диск инкрементного энкодера имеет одну дорожку, на которую нанесено 96 отражающих меток. Счетчик импульсов настроен так, что реагирует только на сигнал от появления отражающей метки. Определите разрешение $S$ данного энкодера, а также минимальное угловое перемещение $\gamma$, которое может быть зафиксировано с его помощью.

*Задание 8.* Диск инкрементного энкодера имеет одну дорожку, на которую нанесено 96 отражающих меток. Счетчик импульсов настроен так, что реагирует на каждый фронт изменения сигнала. Определите разрешение $S$ данного энкодера, а также минимальное угловое перемещение $\gamma$, которое может быть зафиксировано с его помощью.

*Задание 9.* Диск инкрементного энкодера имеет две дорожки. На каждой из них нанесено по 96 отражающих меток, при этом метки одной дорожки относительно другой смещены на четверть периода. Счетчик импульсов настроен так, что реагирует на каждый фронт изменения сигнала. Определите разрешение $S$ данного энкодера, а также минимальное угловое перемещение $\gamma$, которое может быть зафиксировано с его помощью.

*Задание 10.* На вал, вращающийся с постоянной частотой, установлен диск инкрементного энкодера, имеющий две дорожки и референтную метку канала $Z$. От начала вращения прошло время $t = 49$ с. По показаниям, считанным с канала $Z$, за это время диск сделал 192 оборота. Также, счетчик импульсов показал значение $k_{имп} = 74\,016$. Счетчик учитывает каждый фронт изменения сигнала на каждой из дорожек. Метки дорожек на диске смещены относительно друг друга на четверть периода. Определите частоту вращения $n_Z$ по показаниям канала $Z$ и фактическую частоту вращения $n_{факт}$ по показаниям счетчика импульсов. Вычислите значения абсолютной и относительной погрешности.

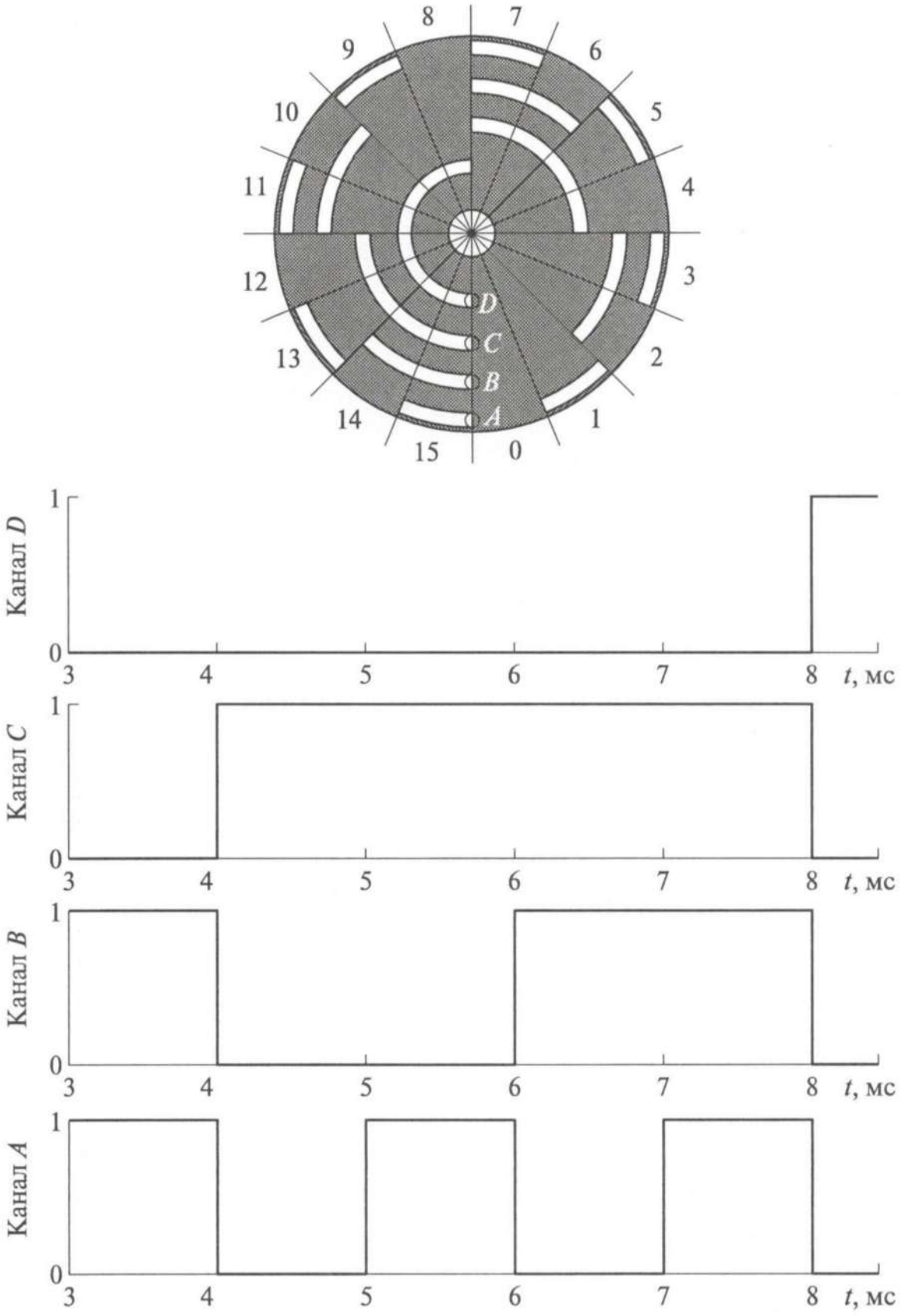
*Задание 11.* На рисунке представлен фрагмент циклограммы, считанный с диска инкрементного энкодера при вращении вала с постоянной частотой. Известно, что на дорожках каналов *A* и *B* нанесено по 96 отражающих меток. Определите абсолютное положение θ вала в момент его остановки при времени $t = 5$ мс.



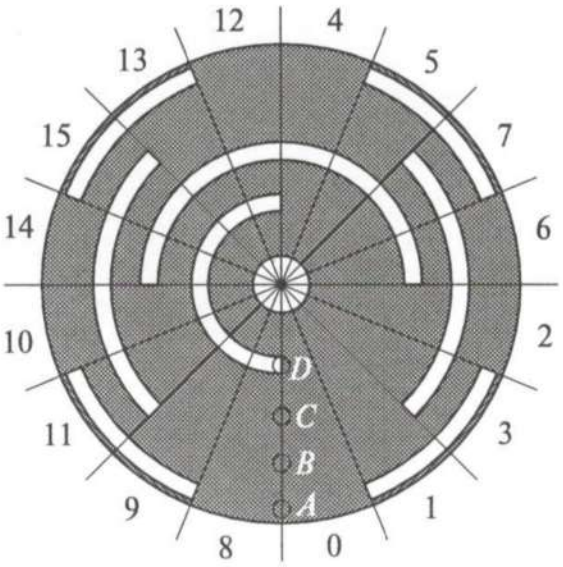

*Задание 12.* Вращающийся с постоянной частотой вал остановился. На валу находится диск инкрементного энкодера с референтной меткой канала *Z* и двумя дорожками с 96 отражающими метками на каждой. В момент остановки показания по каналу *Z* составили $m = 34$ оборота, показания счетчика импульсов $k = 13\,296$ импульсов. Известно, что счетчик реагирует на каждый фронт изменения сигнала по каждой из дорожек. Метки дорожек на диске смещены относительно друг друга на четверть периода. Определите абсолютное положение θ вала в момент его остановки.

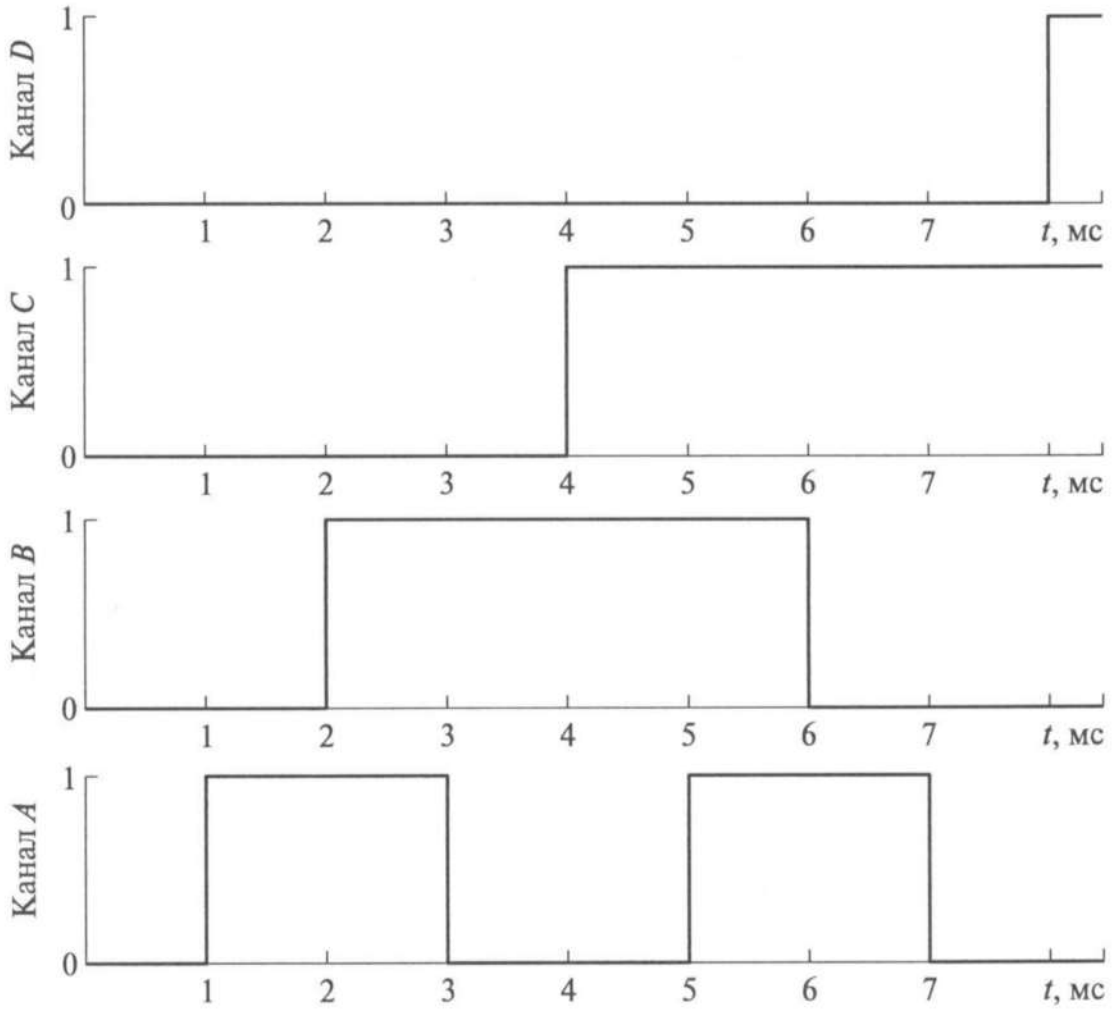
*Задание 13.* На диск абсолютного энкодера планируется нанести 12 дорожек. Определите, на какое число уникальных секторов может быть разбит диск.

*Задание 14.* На рисунке представлены общий вид диска энкодера с двоичной кодировкой, его разбиение на секторы, места расположения каналов *A*, *B*, *C* и *D*, а также фрагмент циклограммы, полученной при вращении вала. Определите угол α, на который повернулся вал от момента времени $t_1 = 3$ мс до момента времени $t_2 = 8$ мс.

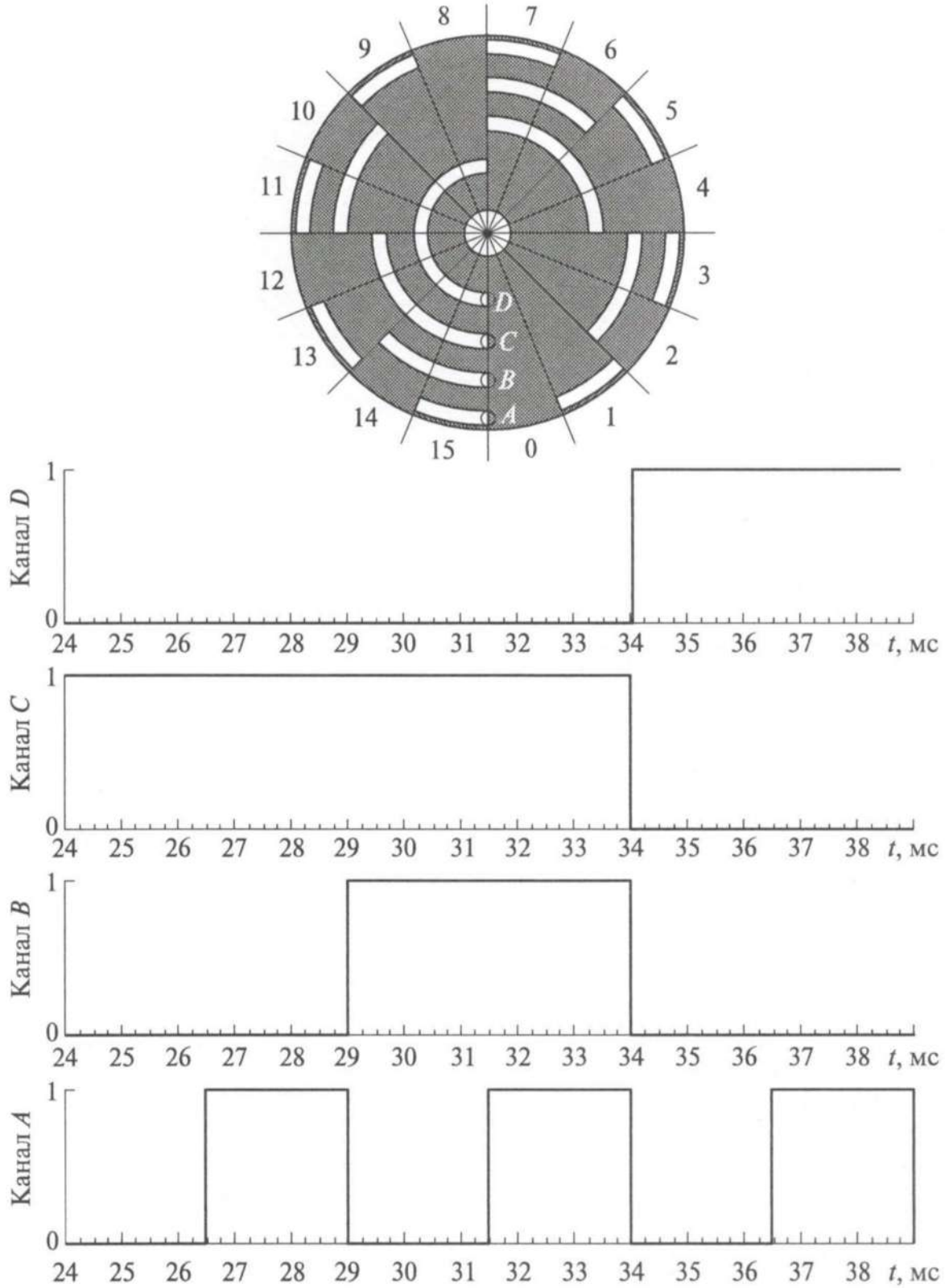

8
7
9
6
10
5
11
4
12
3
13
2
14
1
15
0
D
C
B
A
Канал D
Канал C
Канал B
Канал A
1
0
3
4
5
6
7
8
t, мс

*Задание 15.* На рисунке представлены общий вид диска энкодера с кодировкой Грея, его разбиение на секторы, места расположения каналов *A*, *B*, *C* и *D*, а также фрагмент циклограммы, полученной при вращении вала. Определите угол $\alpha$, на который повернулся вал от момента времени $t_1 = 2$ мс до момента времени $t_2 = 7$ мс.

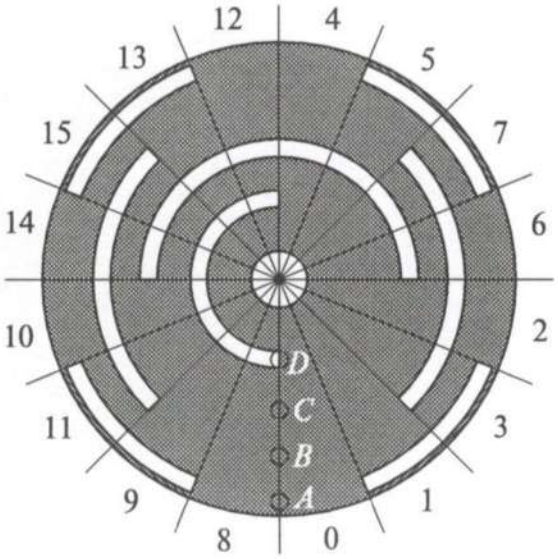


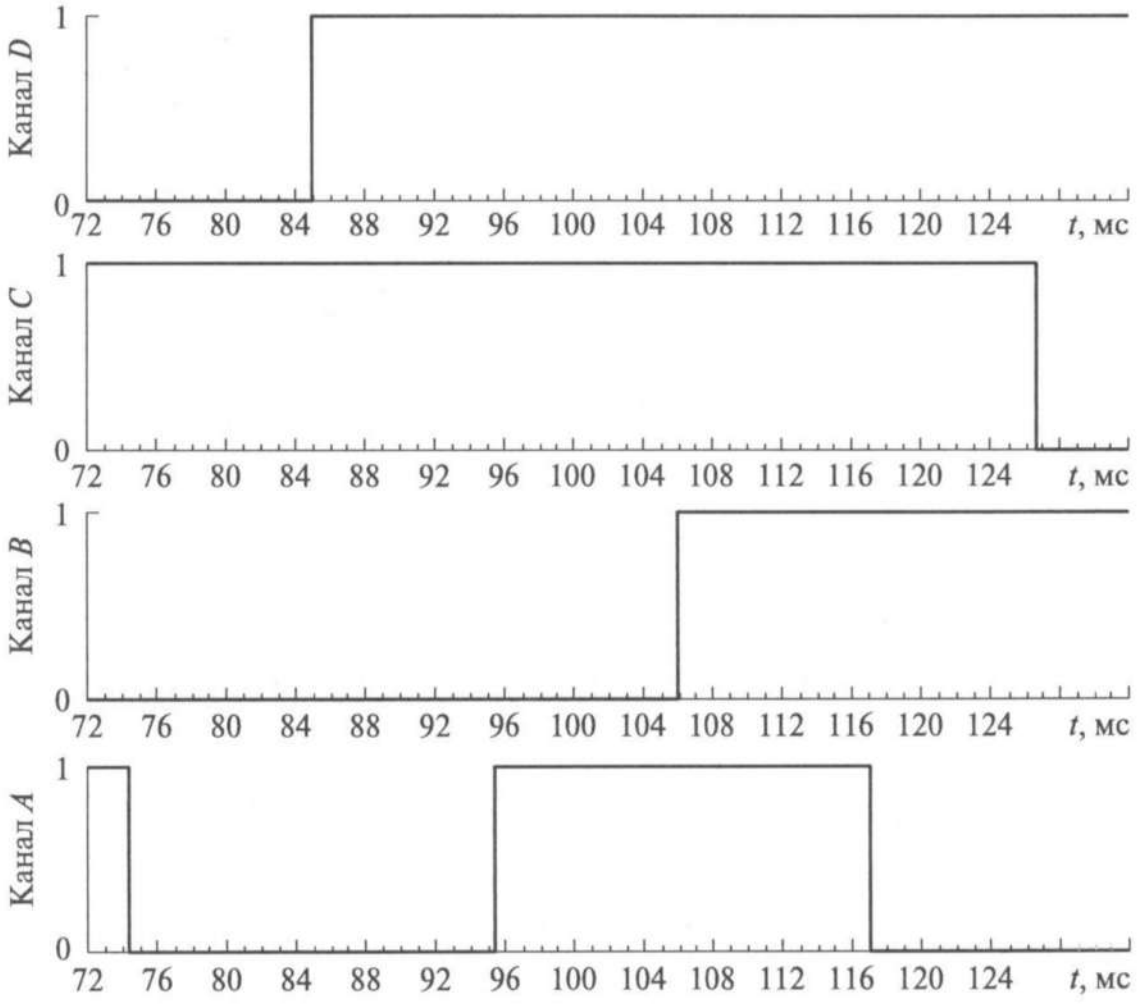



*Задание 16.* На рисунке представлены общий вид диска энкодера с двоичной кодировкой, его разбиение на секторы, места расположения каналов *A*, *B*, *C* и *D*, а также фрагмент циклограммы, полученной при вращении вала. Определите частоту вращения вала в оборотах в минуту.

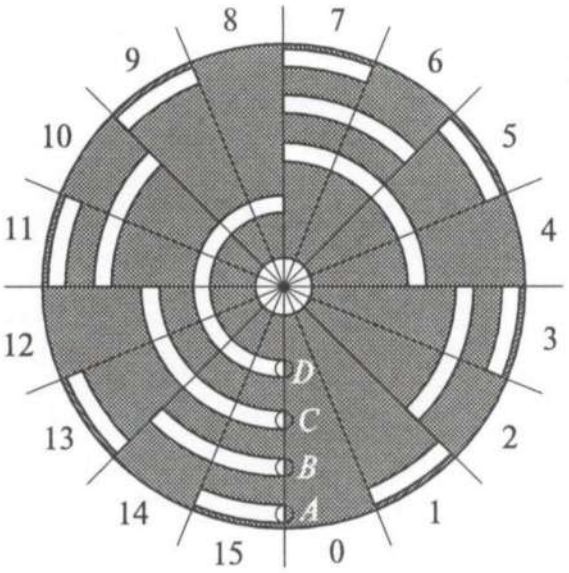


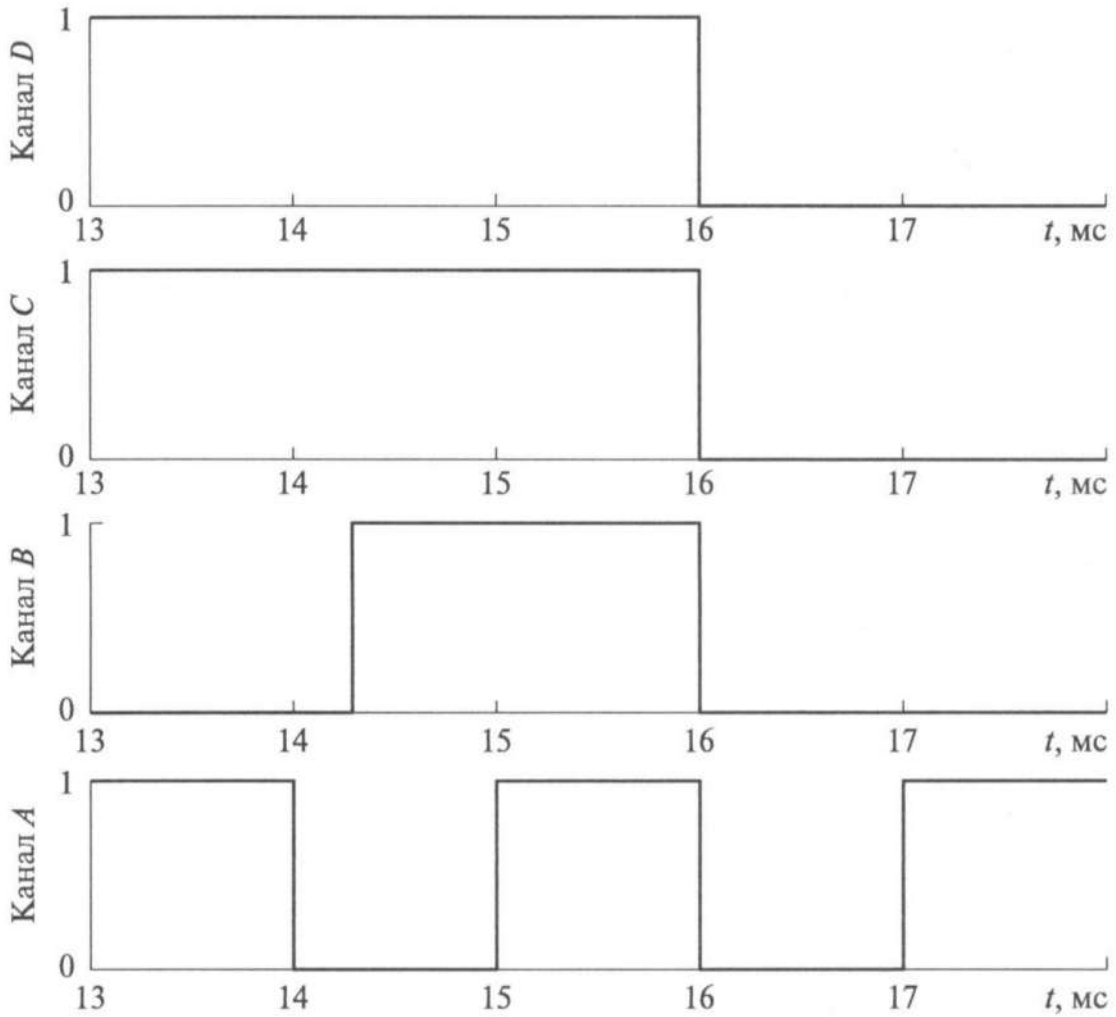
*Задание 17.* На рисунке представлены общий вид диска энкодера с кодировкой Грея, его разбиение на секторы, места расположения каналов *A*, *B*, *C* и *D*, а также фрагмент циклограммы, полученной при вращении вала. Определите частоту вращения вала в оборотах в минуту.



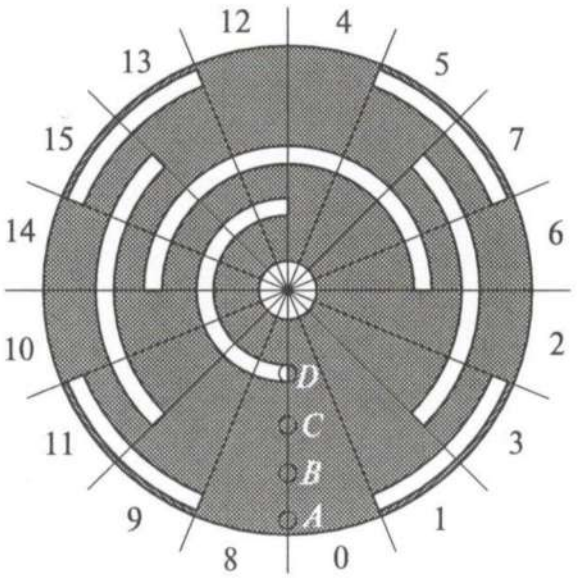



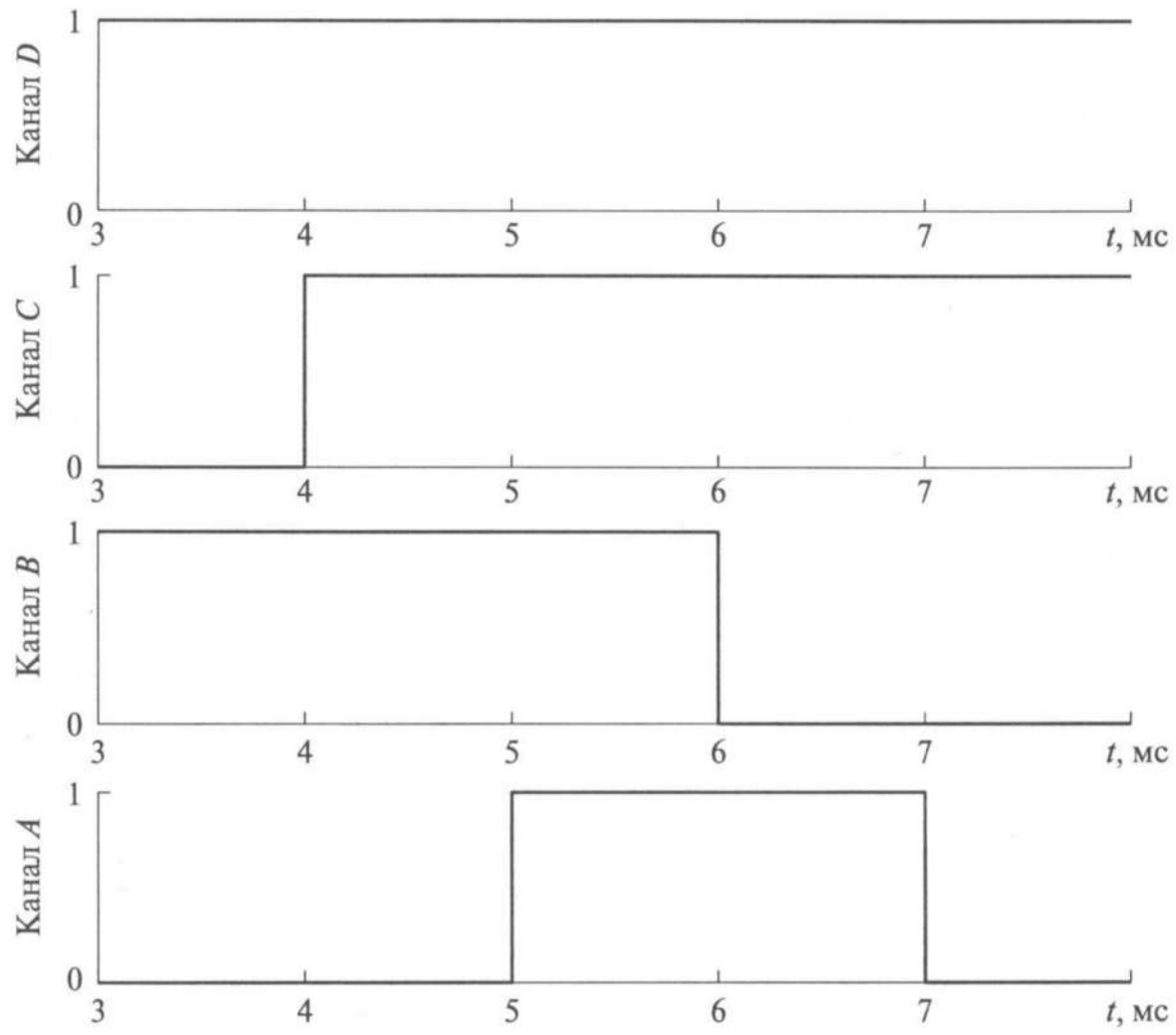
*Задание 18.* На рисунке представлен общий вид диска энкодера с двоичной кодировкой, его разбиение на секторы, места расположения каналов *A*, *B*, *C* и *D*, а также фрагмент циклограммы, полученной при вращении вала. Определите направление вращения.



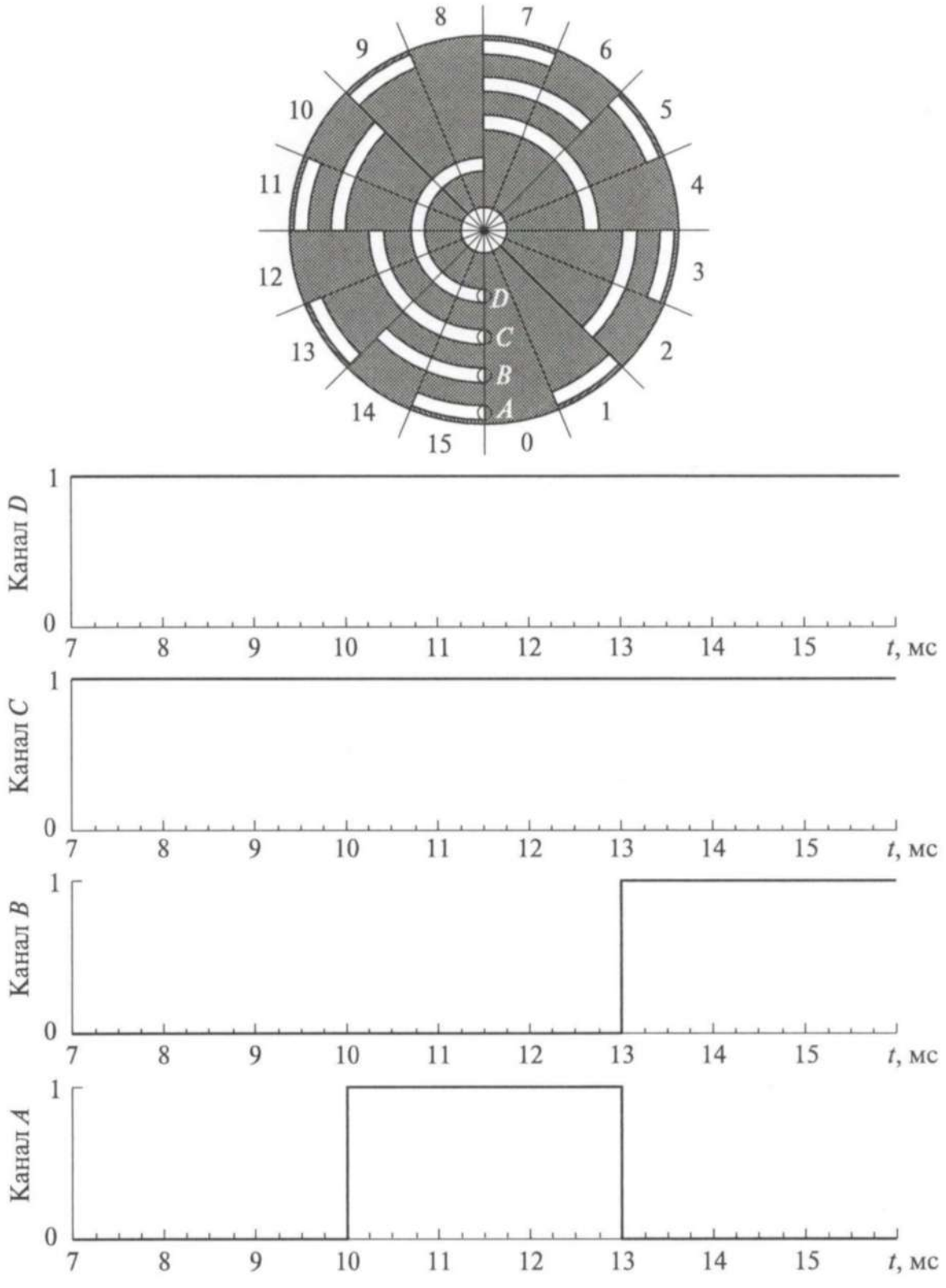



*Задание 19.* На рисунке представлены общий вид диска энкодера с кодировкой Грея, его разбиение на секторы, места расположения каналов *A*, *B*, *C* и *D*, а также фрагмент циклограммы, полученной при вращении вала. Определите направление вращения.

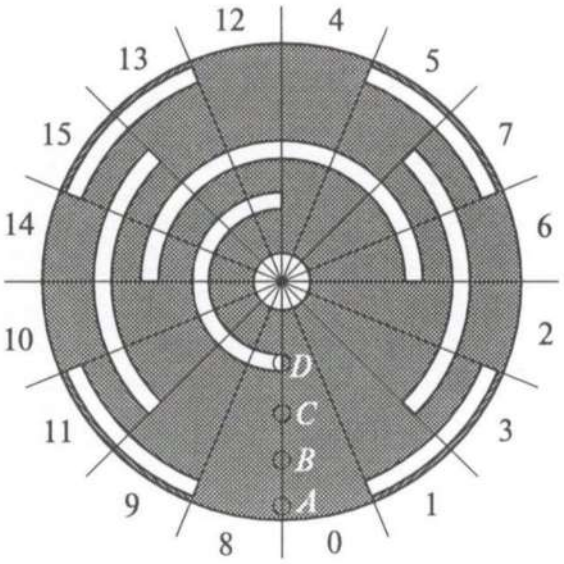


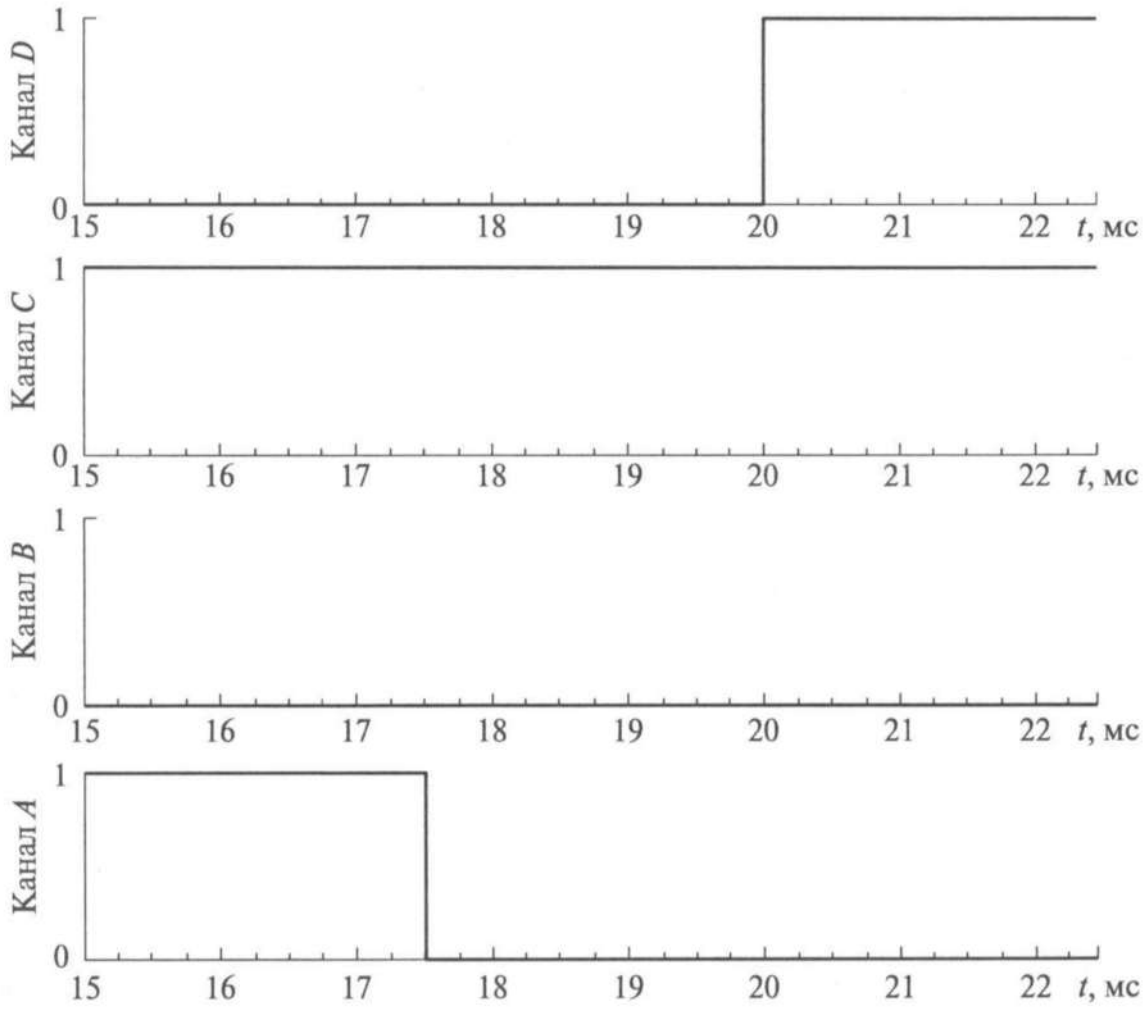



*Задание 20.* На рисунке представлены общий вид диска энкодера с двоичной кодировкой, его разбиение на секторы, места расположения каналов $A$, $B$, $C$ и $D$, а также фрагмент циклограммы, полученной при вращении вала. Определите абсолютное положение $\theta$ вала в момент времени $t = 11,43$ мс.



*Задание 21.* На рисунке представлены общий вид диска энкодера с кодировкой Грея, его разбиение на секторы, места расположения каналов *A*, *B*, *C* и *D*, а также фрагмент циклограммы, полученной при вращении вала. Определите абсолютное положение θ вала в момент времени $t = 20{,}383$ мс.



*Задание 22.* Для определения текущего положения остановленного вала с находящегося на нем диска абсолютного энкодера с двоичной кодировкой сняли показание 1010. Определите угол θ абсолютного положения вала в пространстве.

*Задание 23.* Для определения текущего положения остановленного вала с находящегося на нем диска абсолютного энкодера с кодировкой Грея сняли показание 1010. Определите угол θ абсолютного положения вала в пространстве.

## Литература


Датчики измерительных систем: в 2 книгах. Кн. 1; пер. с франц. / Ж. Аш [и др.]. М.: Мир, 1992. 480 с.

Преобразователи информации в системах управления / В.И. Бойков [и др.] / Ч. 1. СПб.: Университет ИТМО, 2020. 65 с.

*Болл С.Р.* Аналоговые интерфейсы микроконтроллеров: учеб. пособие. М.: ДМК Пресс, 2010. 354 с.

*Вавилов В.Д.*, *Тимошенков С.П.*, *Тимошенков А.С.* Микросистемные датчики физических величин: монография: в 2 ч. М.: Техносфера, 2018. 549 с.

*Воротников С.А.* Информационные устройства робототехнических систем: учеб. пособие / под ред. С.Л. Зенкевича, А.С. Ющенко. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. 384 с.

*Кангин В.В.* Средства автоматизации и управления. Аппаратные и программные решения: учеб. пособие для вузов. Старый Оскол: ТНТ, 2014. 519 с.

*Клаассен К.Б.* Основы измерений. Электронные методы и приборы в измерительной технике; пер. с англ. / Е.В. Воронов, А.Л. Ларин. М.: Постмаркет, 2000. 350 с.

*Фрайден Дж.* Современные датчики: справочник; пер. с англ. / ред. пер. Е.Л. Свинцов; пер. Ю.А. Заболотная. М.: Техносфера, 2005. 588 с.

*Шерстобитова А.С.* Датчики физических величин. СПб.: Университет ИТМО, 2017. 57 с.

Датчики: Справочное пособие / под общ. ред. В.М. Шарапова, Е.С. Полищука. М.: Техносфера, 2012. 624 с.

## Оглавление

Предисловие ..... 3
**1. Краткая характеристика оптических энкодеров** ..... 4
1.1. Общие положения ..... 4
1.2. Принцип работы оптического энкодера ..... 4
1.3. Инкрементный энкодер ..... 6
1.4. Абсолютный энкодер с двоичной кодировкой ..... 10
1.5. Абсолютный энкодер с кодировкой Грея ..... 13
**2. Описание лабораторной установки** ..... 15
2.1. Общие сведения ..... 15
2.2. Конструктивная схема лабораторной установки ..... 16
2.3. Устройство и параметры диска инкрементного энкодера ..... 18
2.4. Устройство и параметры диска абсолютного энкодера с двоичной кодировкой ..... 18
2.5. Устройство и параметры диска абсолютного энкодера с кодом Грея ..... 20
**3. Работа с виртуальной средой LabSoft** ..... 23
3.1. Запуск виртуальной среды LabSoft ..... 23
3.2. Интерфейс виртуальной среды LabSoft ..... 24
3.3. Виртуальные приборы: графический анализатор ..... 25
**4. Порядок выполнения лабораторной работы** ..... 30
4.1. Подготовка и техника безопасности при работе с лабораторным оборудованием ..... 30
4.2. Использование инкрементного энкодера для определения угла поворота и частоты вращения вала ..... 31
4.3. Использование инкрементного энкодера с нулевым каналом для определения частоты вращения и абсолютного положения вала ..... 40
4.4. Использование абсолютного энкодера с двоичной кодировкой для определения угла поворота, частоты вращения и абсолютного положения вала ..... 46
4.5. Использование абсолютного энкодера с кодировкой Грея для определения угла поворота, частоты вращения и абсолютного положения вала ..... 53
Содержание отчета ..... 60
Контрольные вопросы и задания ..... 61
Литература ..... 76

*Учебное издание*

**Викулов** Александр Николаевич
**Кадырбаева** Анастасия Рустемовна
**Кувшинов** Андрей Владимирович
**Михайловская** Маргарита Борисовна
**Патрикеева** Анастасия Андреевна

**Прикладная механика и основы конструирования**

**Исследование параметров оптических энкодеров**

Редактор *Л.Т. Мартыненко*
Корректор *Н.И. Карнута*
Художник *Т.К. Сегеда*
Компьютерная графика *Т.Ю. Кутузовой*
Компьютерная верстка *Г.Ю. Молотковой*

Оригинал-макет подготовлен
в Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана.

В оформлении использованы шрифты
Студии Артемия Лебедева.

Подписано в печать 23.09.2025. Формат 60×90/16.
Усл. печ. л. 4,875. Тираж 138 экз. Изд. № 1568-2025.

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана.
105005, г. Москва, улица 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1.
press@bmstu.ru
https://press.bmstu.ru

Отпечатано в типографии МГТУ им. Н.Э. Баумана.
105005, г. Москва, улица 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1.

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМ. Н.Э. БАУМАНА

**ФАКУЛЬТЕТ**
Радиоэлектроника и лазерная техника

**КАФЕДРА**
Элементы приборных устройств

Приведены методы измерения угла поворота, абсолютного положения, частоты и направления вращения вала с помощью оптических энкодеров. Отмечены различия при определении параметров между инкрементным энкодером при отсутствии и наличии нулевого канала, а также абсолютными энкодерами с двоичной кодировкой и кодировкой Грея.

**«Политехнический молодежный журнал»** МГТУ им. Н.Э. Баумана приглашает студентов, магистрантов, аспирантов и молодых преподавателей (специалистов) опубликовать свои статьи.

- **Все публикации** бесплатные
- **Статьи индексируются в** РИНЦ

Полная информация о журнале, а также выпуски текущих номеров представлены на сайте ptsj.bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана,
Главный учебный корпус, ауд. 117

vk.com/ptsjournal
ptsj@bmstu.ru

ISBN 978-5-7038-6569-9

9 785703 865699

bmstu.ru

press.bmstu.ru