

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ  
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования  
«ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

---

И.Г. Однокопылов., С.М. Семенов.

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИВОД. ДИНАМИКА

### ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

*Рекомендовано в качестве учебного пособия  
Редакционно-издательским советом  
Томского политехнического университета*

Издательство  
Томского политехнического университета  
2009

УДК 621.83  
ББК 00000  
О 00

**Однокопылов И.Г., Семенов С.М.**

О 00

Электрический привод. Динамика. Лабораторный практикум: учебное пособие / И.Г. Однокопылов, С.М. Семенов. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 100 с.

Лабораторный практикум содержит описания четырех лабораторных работ по курсам «Основы электропривода», «Электрический привод», «Автоматизированный электропривод» и предназначен для студентов всех форм обучения электромеханической и энергетических специальностей.

В данном практикуме приведены способы исследования динамических режимов электроприводов постоянного и переменного тока и статических характеристик замкнутых систем аналитическим и экспериментальным путем с использованием компьютерной техники.

**УДК 621.83  
ББК 00000**

*Рецензенты*

Кандидат технических наук, доцент зав. каф. ЭПА ССТИ

*С.Н. Кладиев*

Кандидат технических наук, специалист по силовой электронике  
отдела авт. эл. привода ООО «ЭлеТим»

*В.Н. Черемисин*

© Однокопылов И.Г., 2009

© Томский политехнический университет, 2009

© Оформление. Издательство Томского политехнического университета, 2009

## ЧАСТЬ 1

### 1. Описание лабораторного стенда

Базовые эксперименты выполняются на комплекте типового лабораторного оборудования «Электрический привод». В ходе их воспроизводятся установившиеся и переходные процессы в электроприводах постоянного и переменного тока.

Типовой комплект лабораторного оборудования предназначен для выполнения лабораторных работ по учебной дисциплине «Электрический привод (общий курс)» и смежным с ней дисциплинам.

Аппаратная часть комплекта выполнена по блочному (модульному) принципу и содержит:

- трехсоставной лабораторный стол со встроенным контейнером для хранения съемных функциональных блоков, проводников и методических материалов, рамами для установки необходимых в эксперименте функциональных блоков, выкатной полкой для клавиатуры компьютера и подставкой для системного блока последнего;
- электрические машины (выполненные в виде электромашинного агрегата), трансформаторы и элементы электрических цепей;
- источники питания;
- измерительные преобразователи и приборы.

Питание комплекса осуществляется от трехфазной электрической сети **напряжением 380 В с** нейтральным и защитным проводниками.

- Потребляемая мощность Вт, не более 500;
- Габариты (длина / ширина / высота), мм 2750×900×1600;
- Масса, кг, не более 250.

Программная часть комплекта включает:

- программную среду персонального компьютера (Windows всех версий, начиная с Windows 98);
- разработанные регистраторы режимных параметров машин постоянного и переменного тока, пульта управления электроприводами, виртуальный осциллограф.

### 2. Тактико-технические параметры электромашинного агрегата и функциональных блоков

Электромашинный агрегат предназначен для электромеханического преобразования энергии постоянного или переменного тока, получения сигналов, определяющих частоту вращения и угловое положение подвижных частей агрегата. Он включает сочлененные между собой и

установленные на едином основании машину постоянного тока, машину переменного тока, маховик и преобразователь угловых перемещений.

Параметры электромашинного агрегата приведены в таблице 1.

Таблица 1

Наименование	Параметры
1	2
<b>Машина постоянного тока (тип 101.2)</b>	
Номинальная мощность, Вт	90
Номинальное напряжение якоря, В	220
Номинальный ток якоря, А	0,56
Номинальная частота вращения, мин <sup>-1</sup>	1500
Возбуждение	Независимое /параллельное/ последовательное
Номинальное напряжение возбуждения, В	220
Номинальный ток обмотки возбуждения, А	0,2
КПД, %	57,2
Направление вращения	любое
Режим работы	двигатель- ный/генераторный
<b>Машина переменного тока (тип 102.1)</b>	
Число фаз на статоре	3
Число фаз на роторе	3
<i>Как синхронная машина</i>	
Номинальная активная мощность, Вт	100
Номинальное напряжение, В	230
Схема соединения обмоток статора	Y
cos φ <sub>н</sub>	1
Номинальный ток статора, А	0,26
Ток возбуждения холостого хода, А	1,6
Номинальное напряжение возбуждения, В	22
Номинальный ток возбуждения, А	1,85
Направление вращения	любое
Номинальная частота вращения, мин <sup>-1</sup>	1500

Продолжение таблицы 1

1	2
<i>Как асинхронная машина</i>	
Частота тока, Гц	50
Номинальная полезная активная мощность, Вт	30
Номинальное напряжение, В	127
Схема соединения обмотки статора	Y
Схема соединения обмотки ротора	Y
Номинальный ток статора, А	0,35
КПД, %	36
	0,73
Номинальная частота вращения, мин <sup>-1</sup>	1250
Маховик	
Момент инерции, н·м·с <sup>2</sup>	0,032
Масса, кг, не более	7
Преобразователь угловых перемещений (тип 104)	
Модель	BE 178A
Количество выходных каналов	6
Выходные сигналы	серия импульсов и опорный импульс
Число импульсов за оборот в серии	2500
Диапазон изменения рабочих частот вращения вала, мин <sup>-1</sup>	0..6000

Функциональные блоки, используемые в лабораторной установке (таблица 2).

Таблица 2

Наименование блоков	Параметры	Код
1	2	3
Трехфазный источник питания	~400 В; 16 А Ток срабатывания УЗО – 30 мА	201.2

## Продолжение таблицы 2

1	2	3
Источник питания машины постоянного тока	Цепь якоря –0...250 В; 3 А Цепь возбуждения –200 В; 1 А	206.1
Тиристорный преобразователь / регулятор	~3×400 В; 2 А	207.2
Возбудитель машины переменного тока	–0...40 В; 3,5 А	209.2
Преобразователь частоты	3×0...230 В; 3 А; 0...100 Гц	217
Трехполюсный выключатель	~400 В; 10 А	301.1
Терминал	6 розеток с 8 контактами; 6×8 гнезд	304
Активная нагрузка	3×0...50 Вт; 220/380 В	306.1
Реостат для цепи ротора машины переменного тока	3×0...40 Ом; 1 А	307.1
Реостат возбуждения машины постоянного тока	0...2000 Ом; 0,1...0,3 А	308.1
Линейный реактор	50Гц; 0,5 А; 0,3 Гн	314.2
Выпрямитель	400 В; 10 А	322
Реостат	0...200 Ом; 0,8 А	323.2
Трехфазная трансформаторная группа	3×80 В·А; 230 /240,230, 220, 133, 127 В	347.1

## Продолжение таблицы 2

1	2	3
Коннектор	8 аналог. диф. входов; 2 аналог. выхода; 8 цифр. входов/ выходов	330
Блок ввода /вывода цифровых сигналов	8 входов типа «сухой контакт»; 8 релейных выхо- дов	331
Блок датчиков тока и напряжения	3 измерительных преобразователя «ток – напряже- ние» (5 А/1 А)/5 В; 3 измерительных преобразователя «напряжение - напряжение» (1000 В/100 В) /5 В	402.3
Блок мультиметров	$\approx 0 \dots 1000$ В; $\approx 0 \dots 10$ А; $0 \dots 20$ МОм	508.2
Указатель угла нагрузки синхронной машины	$-180^\circ \dots 0 \dots 180^\circ$	505.2
Указатель частоты вращения	$2000 \dots 0 \dots 2000$ мин <sup>-1</sup>	506.2
Измеритель мощностей	15; 60; 150; 300; 600 В, 0,05; 0,1; 0,2; 0,5 А	507.2
Персональный компьютер	IBM- совместимый, плата сбора дан- ных PCI 6024E	550

### 3. Электрическая схема соединений тепловой защиты машины переменного тока

Блок – схема соединений тепловой защиты машины переменного тока изображена на рис.1.



Рис. 1. Схема тепловой защиты машины переменного тока

Перечень аппаратуры схемы тепловой защиты (рис. 1) приведен в таблице 3.

Таблица 3

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
D	Машина переменного тока	102.1	100 Вт / 230 В ~ / 1500 мин <sup>-1</sup>
GA	Трехфазный источник питания	201.2	400 В ~ / 16 А

### 4. Подготовка и проведение измерений с помощью электронного мультиметра

Для измерения трех базовых электрических величин (напряжения, тока и омического сопротивления) используется мультиметр. Схемы подключения мультиметра для измерения этих величин приведены рис. 2, рис.3, рис.4. До его подключения к цепи необходимо выполнить следующие операции:

- установить род тока (постоянный/переменный);
- выбрать диапазон измерений соответственно ожидаемому результату измерений;



- правильно подсоединить зажимы мультиметра к измеряемой цепи.

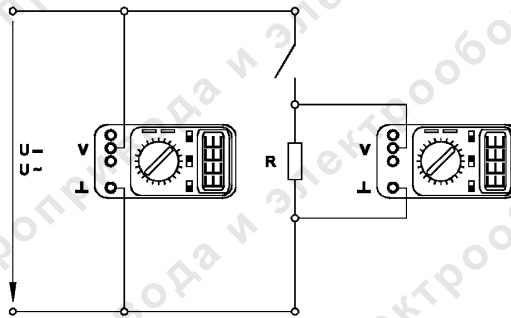


Рис. 2. Схема присоединения мультиметра (как вольтметра) для измерения напряжения

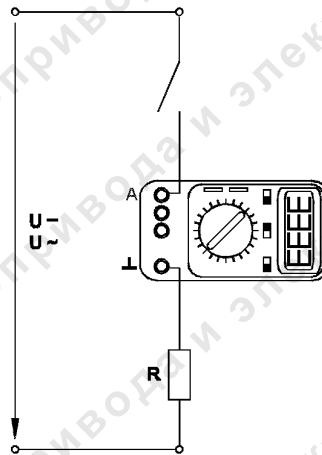


Рис. 3. Схема присоединения мультиметра (как амперметра) для измерения тока

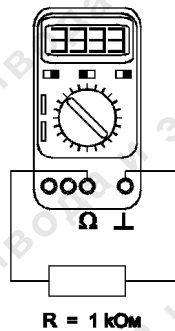


Рис. 4. Схема присоединения мультиметра (как омметра) для измерения омического сопротивления

## 5. Порядок работы с оригинальными программными продуктами

В программное обеспечение учебного лабораторного комплекса «Электрический привод» входят одиннадцать программных продуктов –

«Многоканальный осциллограф», «Регистратор режимных параметров машины постоянного тока», «Регистратор режимных параметров машины переменного тока», «Регистратор режимных параметров частотного привода» и семь узкоспециализированных программ для проведения экспериментов.

## **6. Описание работы с программой «Многоканальный осциллограф»**

Программа «Многоканальный осциллограф» является виртуальным аналогом реальных приборов и обладает широкими функциональными возможностями. Она предназначена для регистрации и отображения различных аналоговых сигналов в удобной для пользователя форме.

«Осциллограф» имеет четыре одинаковых канала, каждый из которых может быть сопоставлен с любым физическим каналом аналогового ввода платы. Каналы платы должны быть настроены на дифференциальный режим работы.

Каждый из каналов осциллографа может быть включен или выключен, иметь свой собственный коэффициент деления, быть «прямым» или «инверсным», иметь «открытый» или «закрытый» вход (т.е. сохранять или отрезать постоянную составляющую сигнала). Кроме того, сигнал любого канала можно «сгладить» (применяется для наблюдения за шумленными сигналами), отобразить определенным цветом, сдвинуть по вертикали.

Имеется два способа синхронизации картинки на экране осциллографа. Первый из них, «50 Гц» применяется для наблюдения сигналов, частота которых кратна 50 Гц. В этом режиме частоту синхронизации можно менять в небольших пределах, нажимая на кнопки с красными стрелками. Нажатием на правую стрелку можно заставить «бежать» картинку вправо, нажатием на левую – влево.

Второй способ синхронизации – классическая синхронизация по какому-либо каналу. Здесь можно выбрать номер канала, по которому будет производиться синхронизация, а также уровень синхронизирующего напряжения.

По оси времени картинку на экране осциллографа можно растянуть или сжать, задавая тот или иной масштаб по горизонтали, а также сдвинуть вправо или влево соответствующим движком.

Осциллограф:

- Работает в режиме XY. В этом случае можно задать номера каналов, сопоставленных с осями X и Y, а также цвет отображаемой линии. В любой момент сканирование аналоговых каналов можно остановить. При этом картинка на экране осциллографа «заморо-

зится». Полученные осциллограммы можно теперь также, как и до «замораживания» масштабировать, менять цвета линий и пр.

- Можно использовать в режиме запоминания, для чего в окне «Параметры» должна быть поставлена соответствующая галочка. В этом случае программа во время сканирования будет непрерывно сохранять данные в циклический буфер. Его содержимое можно отобразить *после остановки сканирования*. Существует возможность изменять порядок отображения запомненных кривых.
- Вычисляет интегральные значения принимаемых сигналов. Для включения этого режима нужно нажать соответствующую кнопку.

Программа позволяет сохранять осциллограммы в файлы. Сохранение может быть произведено двумя способами – в текстовый файл или в файл собственного формата \*.osc. В первом случае в созданном файле будет находиться таблица значений точек каналов, которую можно затем экспортировать в Excel. Во втором случае в сохраненном файле будет содержаться информация об осциллограммах, о положениях органов управления и пр. Сохраненный файл можно снова загрузить в «Осциллограф» и выполнять все те же действия, что и с «замороженной» осциллограммой.

Расширение \*.osc регистрируется в Windows при установке программы либо путем вызова соответствующего пункта меню.

«Многоканальный осциллограф» может гибко настраиваться на определенную скорость сканирования и нужное быстродействие. При установке параметров сканирования можно исходить из следующих соображений.

*Частота сканирования* должна находиться в пределах 1000 – 50000 герц. Если необходимо рассмотреть мелкие (по частоте) подробности сигнала (например, интервалы коммутации тиристоров в схемах силовой электроники), то частоту сканирования целесообразно задавать относительно высокую, если же форма сигнала не слишком интересна (например, заведомо известно, что сигналы – синусоиды), то частоту сканирования можно задать относительно низкую. Необходимо иметь в виду, что при установке высокой частоты сканирования быстродействие программы снижается, поэтому иногда целесообразно оставлять включенным лишь один канал.

*Частоту обновления осциллограмм* следует устанавливать в пределах 5...50 Гц. При этом необходимо иметь в виду, что если частота сканирования, деленная на частоту обновления осциллограмм, не кратна 50 Гц, то режим синхронизации «50 Гц» работать не будет. Также нужно учитывать, что чем выше частота обновления осциллограмм, тем быстрее реагирует осциллограф на изменение режима схемы; тем меньший

по длине отрезок времени отображается на экране; тем сильнее нагружается система. Верно и обратное утверждение.

На графиках осциллографа отображается каждая  $N$ -ная точка. Число  $N$  задается в пределах от 1 до 10. Чем выше  $N$ , тем менее подробно строятся графики и тем меньше загружается система. Верно и обратное утверждение.

Опцию «*Запоминать последние  $N$  секунд процесса*» следует устанавливать в диапазоне 1...20 с. Опцию «*Отображать каждую  $N$ -ную точку*» (на вкладке «Запоминание») - в диапазоне 1...10 с. Чем больше время запоминания, тем больше используется оперативная память компьютера и тем дольше отображается записанный в память процесс. Чем больше число  $N$ , тем менее подробно и более быстро происходит отображение. Верны и обратные утверждения.

Для некоторого увеличения общего быстродействия программы рекомендуется отключать режим запоминания.

Ниже перечислены неочевидные возможности интерфейса программы, а также некоторые замечания по этому поводу.

- Двойным щелчком мыши можно устанавливать в нуль регуляторы смещения картинка по горизонтали и по вертикали.
- Щелчок мыши на осях графика вызывает окно настройки соответствующей оси.
- В этом окне, помимо всего прочего, можно включить или отключить отображение нулевых линий.
- Масштабирование осциллограмм производится путем нажатия на графике левой клавиши мыши и, не отпуская ее, перемещения манипулятора слева направо и сверху вниз. Возврат к начальному масштабу осуществляется обратным перемещением манипулятора – справа налево и снизу вверх.
- Двигать график осциллограмм относительно осей координат можно путем нажатия и удержания на нем правой кнопки мыши и ее одновременного перемещения в нужную сторону.
- Для удобства определения значений величин на экране отображаются текущие координаты указателя мыши.
- Регулятор уровня синхронизации проградуирован в единицах графика.
- Делители напряжения каналов и временной делитель проградуированы по отношению к одной единице графика (например, положение 500 мВ означает, что одна единица (не клетка!) графика соответствует 500 мВ).

- Параметры сканирования по умолчанию можно установить, выбрав соответствующий пункт меню «Настройка».
- **Аналогичным образом можно зарегистрировать** расширение «\*.osc».
- Таким же образом можно вернуть все органы управления в исходное положение.
- Цвет того или иного графика можно выбрать, щелкнув «мышкой» по соответствующей кнопке выбора цвета.
- Отображение интегральных (средних, действующих, средневыпрямленных, максимальных, минимальных, амплитудных) значений сигналов можно включить, нажав на соответствующую кнопку.
- В режиме запоминания осциллограммы можно сглаживать, причем существуют два режима сглаживания - обычное, предназначенное для сглаживания случайных помех, и сильное (x10), предназначенное для сглаживания частот, сравнимых с 50 Гц. Следует понимать, что *любое сглаживание в общем случае искажает форму снятых зависимостей*.
- В режиме запоминания можно также менять порядок отображения графиков (т.е. вывести какую-либо кривую поверх остальных).

#### **7. Описание работы с программами «Регистратор режимных параметров машины постоянного тока», «Регистратор режимных параметров машины переменного тока» и «Регистратор режимных параметров частотного привода»**

Программы-регистраторы предназначены для регистрации и отображения специфических параметров электрических машин в удобной для пользователя форме. Программы не имеют практически никаких настроек и обладают простым, удобным и интуитивно понятным интерфейсом.

Необходимым условием правильной работы программ является правильное подключение к коннектору (код 330) аналоговых сигналов. Для удобства пользования, кроме схем данного руководства краткая информация по подключению сигналов имеется в самих программах.

Кроме того, для машины постоянного тока необходимо правильно задавать режим ее возбуждения.

Регистратор режимных параметров:

- машины постоянного тока в реальном времени отображает зависимости от времени напряжения и тока якорной обмотки, частоты вращения и электромагнитного момента машины, а также – ее ме-

ханическую характеристику (зависимость частоты вращения от электромагнитного момента).

- машины переменного тока в реальном времени отображает зависимости от времени тока статорной обмотки, частоты вращения и электромагнитного момента машины, а также – ее механическую характеристику (зависимость частоты вращения от электромагнитного момента).
- частотного привода в реальном времени отображает текущие значения тока двигателя, напряжения на нем, частоты вращения и крутящего момента, одновременно запоминая заранее заданный временной интервал этих параметров. После остановки регистратора запомненные параметры обрабатываются специальным алгоритмом (вейвлет анализа) и отображаются в виде временных зависимостей. Параметры обработки кривых и время запоминания можно изменять.

### Литература

1. Электрический привод: Руководство по выполнению базовых экспериментов ЭП. 001 РБЭ (905). – Челябинск: ИПЦ «Учебная техника», 2005. – 141 с.
2. Дьяконов В. П. Современная осциллография и осциллографы. – М.: СОЛОН-Пресс, 2005. – 320 с.
3. Садченков Д. А. Современные цифровые мультиметры. – М.: СОЛОН-Пресс, 2002. – 112 с.

## ЧАСТЬ 2

### Лабораторная работа №1

#### ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И РЕЖИМЫ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ ПОСТОЯННОГО ТОКА НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

##### 1.1. Цель работы

Исследование характеристик переходных процессов скорости  $\omega = f(t)$ , тока  $I = f(t)$  и момента  $M = f(t)$  при различных динамических режимах работы и способах регулирования скорости электропривода постоянного тока независимого возбуждения.

##### 1.2. Оборудование стенда (состав аппаратуры)

###### 1.2.1. Назначение и описание функциональных блоков лабораторной установки (рис 1.1)

Трехфазный источник питания.

Предназначен для питания комплекта трехфазным переменным напряжением. Включается вручную. Имеет защиту от перегрузок, устройство защитного отключения, кнопку аварийного отключения и ключ от несанкционированного включения.

Источник питания машины постоянного тока.

Предназначен для питания обмоток якоря и возбуждения постоянным током. Включается вручную или дистанционно / автоматически (от ПЭВМ). Якорное напряжение регулируется вручную или дистанционно. Напряжение возбуждения нерегулируемое.

Возбудитель машины переменного тока.

Предназначен для питания обмотки возбуждения синхронной машины. Включается вручную или дистанционно / автоматически (от ПЭВМ). Напряжение возбуждения регулируется вручную или дистанционно / автоматически. Выходные цепи изолированы от входных.

Активная нагрузка.

Предназначена для моделирования однофазных и трехфазных потребителей активной энергии. Регулируется вручную.

Блок мультиметров.

Предназначен для измерения токов, напряжений, омических сопротивлений. Цифровой с жидкокристаллическим дисплеем.

Указатель частоты вращения.

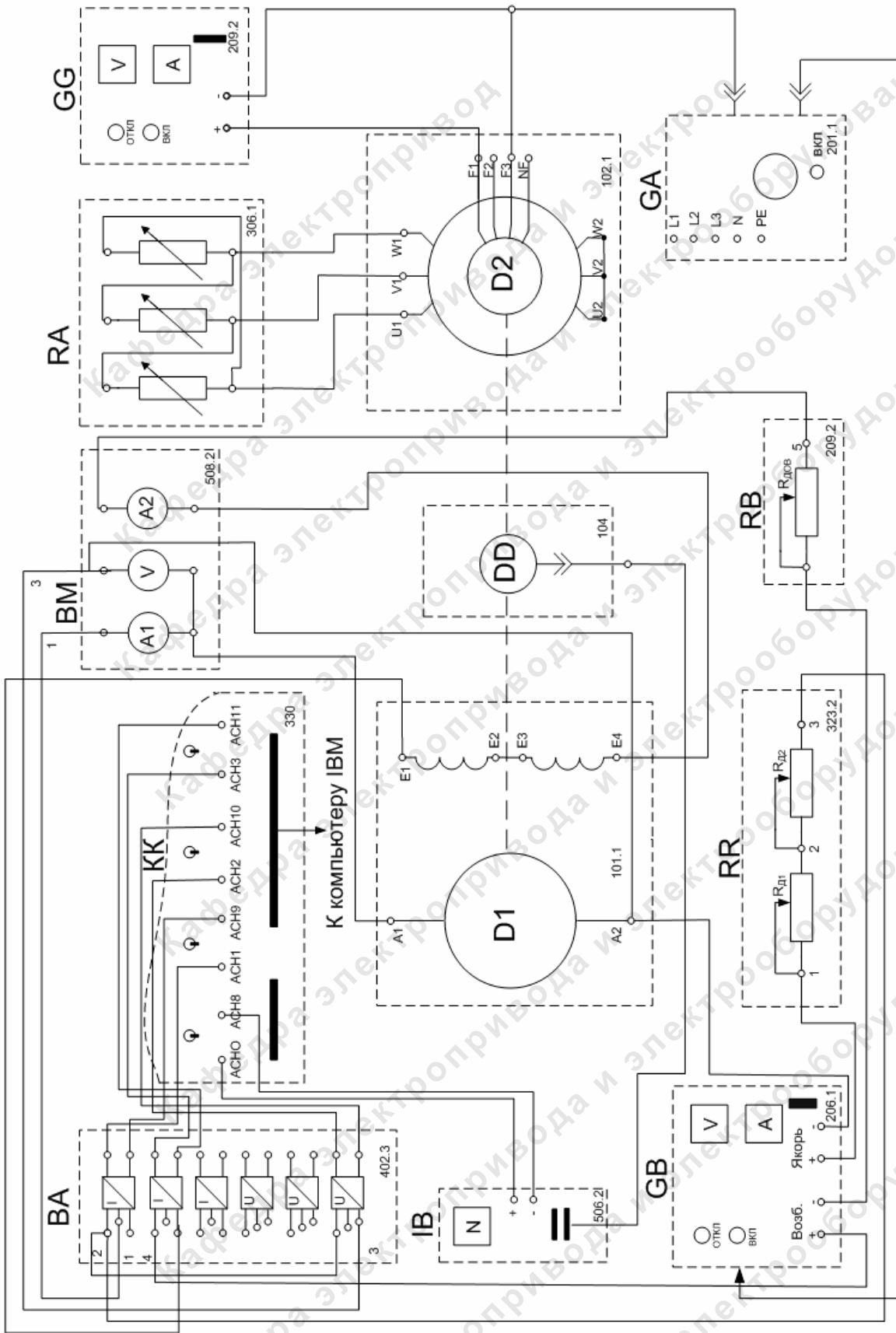


Рис. 1.1. Принципиальная электрическая схема стенда



Предназначен для отображения частоты вращения электрических машин в электромашинном агрегате в аналоговой форме.

Преобразователь угловых перемещений.

Предназначен для преобразования скорости вращения электрических машин в сигнал цифрового вида.

Реостат.

Предназначен для ограничения пускового тока в цепи якоря двигателя постоянного тока.

Реостат возбуждения машины постоянного тока.

Предназначен для ручного регулирования тока возбуждения машины постоянного тока.

Блок датчиков тока и напряжения.

Датчики тока и напряжения гальванически изолируют от силовой электрической цепи и нормируют сигналы о токе и напряжении якоря и токе возбуждения исследуемого двигателя.

Коннектор.

Выполняет функцию связующего звена между компьютером и блоком датчиков тока и напряжения.

Персональный компьютер.

Используется в режиме информационно-измерительной системы.

Исследуемая машина постоянного тока (двигатель постоянного тока с независимым возбуждением):

$$P_H = 90 \text{ Вт};$$

$$\eta_H = 57,2 \%;$$

$$U_H = 220 \text{ В};$$

$$\cos \varphi_H = 0,73;$$

$$I_H = 0,56 \text{ А};$$

$$R_{\text{я}} = 86 \text{ Ом};$$

$$n_H = 1500 \text{ об/мин};$$

$$R_{\text{о.в.}} = 1,15 \text{ кОм}.$$

$$I_{\text{вн}} = 0,2 \text{ А};$$

Нагрузочная машина переменного тока (асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором):

$$P_H = 30 \text{ Вт};$$

$$\cos \varphi_H = 0,73;$$

$$U_H = 127 \text{ В};$$

$$x_1 = 0,087 \text{ о.е.};$$

$$I_H = 0,35 \text{ А};$$

$$R_1 = 0,18 \text{ о.е.};$$

$$n_H = 1250 \text{ об/мин};$$

$$x_2' = 0,15 \text{ о.е.}$$

$$\eta_H = 36 \%;$$

Исследуемая и нагрузочная машины жестко соединены между собой и представлены в виде электромашинного агрегата, дополненного маховиком и преобразователем угловых перемещений.

**1.2.2. Обозначение и параметры исследуемой аппаратуры  
(таблица 1.1)**

Таблица 1.1

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
RA	Активная нагрузка	306.1	$3 \times 0 \dots 50$ Вт; 220/380 В
RR	Реостат	323.2	200 Ом; 0,8 А
BA	Блок датчиков тока и напряжения	402.3	3 измерительных преобразователя "ток-напряжение" 5А/0,5А/5 В; 3 измерительных преобразователя "напряжение-напряжение" 1000 В/100 В/3 В
RB	Реостат возбуждения машины постоянного тока	209.2	0...2000 Ом; 0,1...0,5 А
KK	Коннектор	330	8 аналог. дифф. входов; 2 аналог. входа; 8 цифр. Входов
IBM	Персональный компьютер	550	IBM-совместимый плата сбора информации
GA	Трехфазный источник питания	201.2	$\sim 400$ В; 16 А
GB	Источник питания двигателя постоянного тока	206.1	-0...250 В 3 А (якорь) -200 В; 1 А (возбуждение)
GG	Возбудитель машины переменного тока	209.2	-0...40 В; 3,5 А

Продолжение таблицы 1.1

D2	Машина переменного тока	102.1	50 Вт; 230 В ~; 1500 мин <sup>-1</sup>
DD	Преобразователь угловых перемещений	104	6 выходных сигналов
D1	Машина постоянного тока	101.1	90 Вт; 220 В 0,76 А (якорь) 220 В (возбуждение)
IV	Указатель частоты вращения	506.2	2000...0...200 0 мин <sup>-1</sup>
BM	Блок мультиметров	508.2	0...1000 В ~; 0...20 А =

### 1.3. Общие сведения

Переходный или динамический режим электропривода - это режим работы при переходе из одного установившегося состояния привода к другому, происходящему во время пуска, торможения, реверсирования и резкого изменения нагрузки на валу. Эти режимы характеризуются изменениями ЭДС, угловой скорости, момента и тока.

В переходном режиме электропривода одновременно и взаимосвязано между собой действуют переходные электромеханические, электромагнитные и тепловые процессы.

Электромагнитные переходные процессы вызываются электромагнитной инерцией обмоток электрических машин и аппаратов. В некоторых случаях с влиянием электромагнитных процессов можно не считаться, тогда переходные процессы будут определяться только механическими процессами, в которых учитывается только механическая инерция движущихся масс электропривода.

Индуктивностью ( $L_{я}=0$ ) цепи якоря можно пренебречь, если электромеханическая постоянная времени электропривода  $T_m$  на порядок и более превосходит электромагнитную постоянную времени цепи якоря  $T_э$ . При этом скорость вращения  $\omega$ , ток **якоря I** и **электромагнитный момент M** двигателя в различных режимах рассчитывают по выражениям:

$$\omega = \omega_c + (\omega_{нач} - \omega_c) \cdot e^{-\frac{t}{T_m}}; \quad (1.1)$$

$$I = I_c + (I_{нач} - I_c) \cdot e^{-\frac{t}{T_m}}; \quad (1.2)$$

$$M = M_c + (M_{нач} - M_c) \cdot e^{-\frac{t}{T_m}}, \quad (1.3)$$

где  $\omega_{нач}$ ,  $\omega_c$  – начальная и установившаяся скорости вращения;

$I_{нач}$ ,  $I_c$  – начальный и установившийся токи;

$M_{нач}$ ,  $M_c$  – начальный момент двигателя и момент статической нагрузки на валу;

$T_M$  – электромеханическая постоянная времени электропривода, определяется по формуле:

$$T_M = \frac{J_{\Sigma} \cdot R_{\Sigma}}{c^2} = \frac{J_{\Sigma} \cdot \omega_0}{M_k} = \frac{J_{\Sigma} \cdot \Delta\omega}{\Delta M}, \quad (1.4)$$

где  $J_{\Sigma}$  – суммарный момент инерции установки (момента инерции механизма, двигателя, редуктора), приведенный к валу двигателя;

$c = \frac{U_n - I_n \cdot R_{я}}{\omega_n}$  – коэффициент связи двигателя;

$R_{\Sigma}$  – суммарное сопротивление цепи якоря;

$\omega_0$  – скорость идеального х.х.;

$M_k$  – момент короткого замыкания (стопорения) двигателя;

$\Delta M$ ,  $\Delta\omega$  – изменение скорости и момента двигателя между двумя какими-либо точками механической характеристики  $\omega = f(M)$ ;

$t_{mn}$  – текущее время переходного процесса.

Расчеты заканчивают при достижении 5-ти процентной зоны, если на характеристике реализуется установившийся режим ( в этом случае приблизительно  $t_{mn} = (3 \div 5) T_M$ , или по истечении времени:

$$t = T_M \cdot \ln \frac{\omega_{нач} - \omega_c}{\omega_{кон} - \omega_c} = T_M \cdot \ln \frac{I_{нач} - I_c}{I_{кон} - I_c} = T_M \cdot \ln \frac{M_{нач} - M_c}{M_{кон} - M_c}, \quad (1.5)$$

если на характеристике не достигается установившийся режим.

В формулы (1.1) ÷ (1.5) следует вносить величины той характеристики, на которой совершается переходный процесс.

При уточненных расчетах учитывают индуктивность цепи якоря и переходные характеристики рассчитывают следующим образом:

$$\omega = \omega_c + A_1 \cdot e^{p_1 t} + A_2 \cdot e^{p_2 t};$$

$$I = I_c + A_1 \cdot e^{p_1 t} + A_2 \cdot e^{p_2 t};$$

$$M = c \cdot I,$$

где  $p_1, p_2$  – корни характеристического уравнения электропривода,

$$p_{1,2} = \frac{-T_M \pm \sqrt{T_M^2 - 4 \cdot T_{\Sigma} \cdot T_M}}{2 \cdot T_{\Sigma} \cdot T_M};$$

$T_{\Sigma} = \frac{L_{я}}{R_{\Sigma}}$  – электромагнитная постоянная времени цепи якоря;

$A_1, A_2, B_1, B_2$  - постоянные интегрирования дифференциального уравнения электропривода.

Время достижения максимального значения пускового тока

$$t_M = \frac{\ln \left| \frac{p_1 \cdot B_1}{p_2 \cdot B_2} \right|}{p_2 - p_1} .$$

Двигатель начинает вращаться после подачи напряжения на якорь по истечении времени

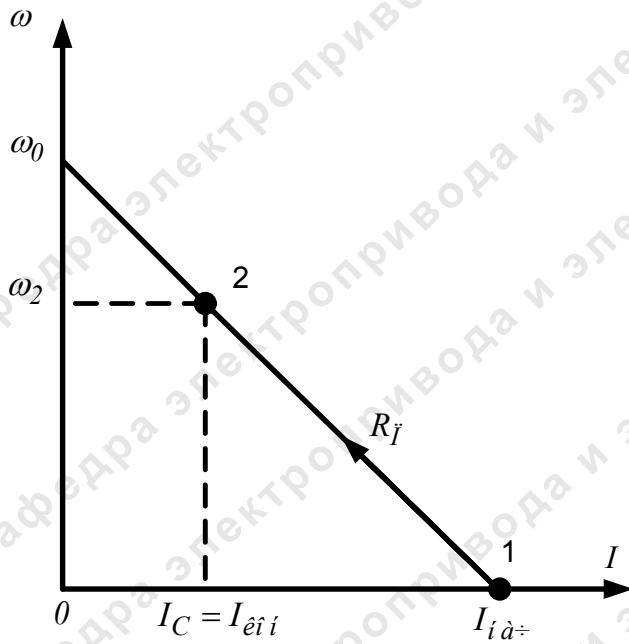
$$t_{\Theta} = T_{\Theta} \cdot \ln \frac{1}{1 - \frac{I_c \cdot R_{\Sigma}}{U}} .$$

### 1.3.1. Механические переходные процессы в двигательном режиме ( $L_{\text{я}}=0$ )

В двигательном режиме исследуются пуск из неподвижного состояния и перевод двигателя с одной характеристики на другую. На рис.1.2, рис.1.3, рис.1.4 показаны статические электромеханические характеристики для указанных переходных процессов:

1. Пуск на реостатной характеристике из неподвижного состояния (рис.1.2);
2. Перевод двигателя с естественной или реостатной характеристики на другую реостатную характеристику (рис.1.3);
3. Перевод двигателя с реостатной на другую реостатную характеристику или естественную характеристику (рис.1.4).

Так же на рисунках 1.3 и 1.4 приведены выражения для расчета установившихся скоростей, начальных токов и электромеханических постоянных времени.



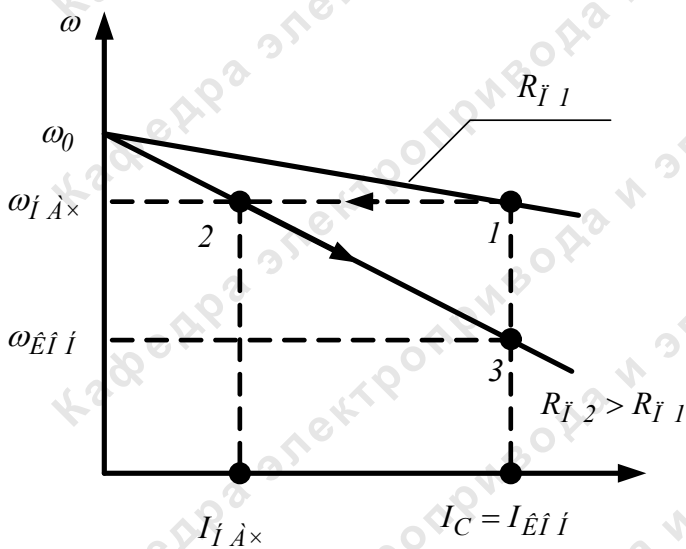
$$\omega_2 = \frac{U - I_C \cdot (R_{Я} + R_{Д})}{C}$$

$$I_{нач} = \frac{U}{R_{Я} + R_{Д}}$$

$$T_M = \frac{J \cdot (R_{Я} + R_{Д})}{C^2}$$

$$R_{П} = R_{Я} + R_{Д}$$

Рис. 1.2. Пуск на реостатной характеристике из неподвижного состояния



$$R_{î 1} = R_{\beta} + R_{\bar{A}1}; R_{î 2} = R_{\beta} + R_{\bar{A}1} + R_{\bar{A}2};$$

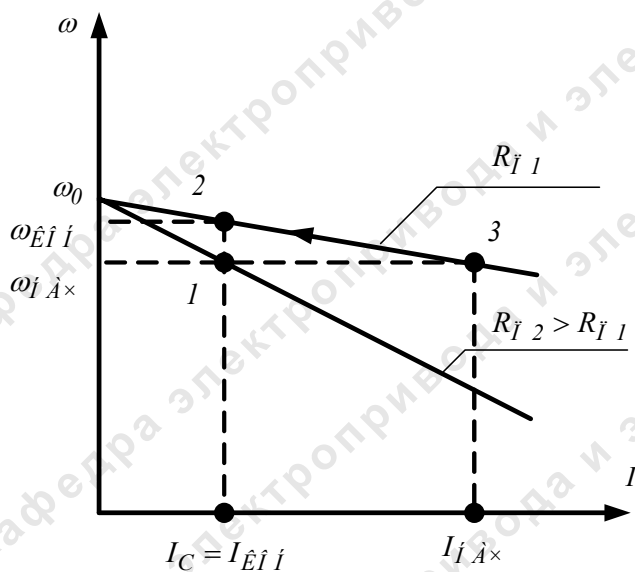
$$\omega_{îâ×} = \omega_1 = \frac{U - I_C \cdot (R_{\beta} + R_{\bar{A}1})}{\tilde{N}}$$

$$\omega_{êîî} = \omega_3 = \frac{U - I_C \cdot (R_{\beta} + R_{\bar{A}1} + R_{\bar{A}2})}{\tilde{N}}$$

$$I_{îâ×} = \frac{U - C \cdot \omega_1}{R_{\beta} + R_{\bar{A}1} + R_{\bar{A}2}}$$

$$T_M = \frac{J \cdot (R_{\beta} + R_{\bar{A}1} + R_{\bar{A}2})}{C^2}$$

Рис. 1.3. Перевод двигателя с естественной или реостатной характеристики на другую реостатную характеристику



$$R_{j1} = R_{\beta} + R_{\hat{A}1}; R_{j2} = R_{\beta} + R_{\hat{A}1} + R_{\hat{A}2};$$

$$\omega_{\hat{A}} = \omega_1 = \frac{U - I_C \cdot (R_{\beta} + R_{\hat{A}1} + R_{\hat{A}2})}{\tilde{N}}$$

$$\omega_{\hat{I}} = \omega_3 = \frac{U - I_C \cdot (R_{\beta} + R_{\hat{A}1})}{\tilde{N}}$$

$$I_{\hat{A}} = \frac{U - C \cdot \omega_1}{R_{\beta} + R_{\hat{A}1}}$$

$$T_M = \frac{J \cdot (R_{\beta} + R_{\hat{A}1})}{C^2}$$

**Рис. 1.4.** Перевод двигателя с реостатной на другую реостатную характеристику или естественную характеристику

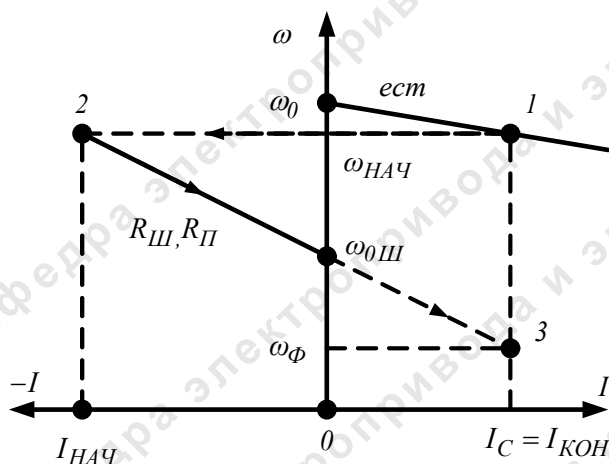
### 1.3.2. Механические переходные процессы в режимах торможения

Исследуются три тормозных режима:

1. Динамическое торможение при шунтировании якоря резистором (характеристика 2 –  $\omega_{out}$ ) (рис.1.5);
2. Динамическое торможение с независимым возбуждением и отключенным от сети якорем (характеристика 2-0) (рис 1.6);
3. Противовключение изменением полярности напряжения якоря (характеристика 2-3). (рис.1.7).

Проверочные расчеты характеристик  $\omega = f(t)$ ,  $I = f(t)$ ,  $M = f(t)$  выполняются по формулам (1.1) ÷ (1.5), в которых в качестве установившейся скорости принимается фиктивная установившаяся скорость  $\omega_{сф}$ .

Реверс включает режим противовключения (характеристика 2-3, рис. 1.7) и пуск в противоположном направлении (характеристика 3-4 там же). Проверочный расчет переходного процесса рекомендуется выполнять по участкам: 2-3 - по формулам противовключения, 3-4 по формулам пуска.



$$R_{\Pi} = R_{Я} + R_{Д}$$

$$R = R_{Я} + \frac{R_{Ш} \cdot R_{\Pi}}{R_{Ш} + R_{\Pi}}$$

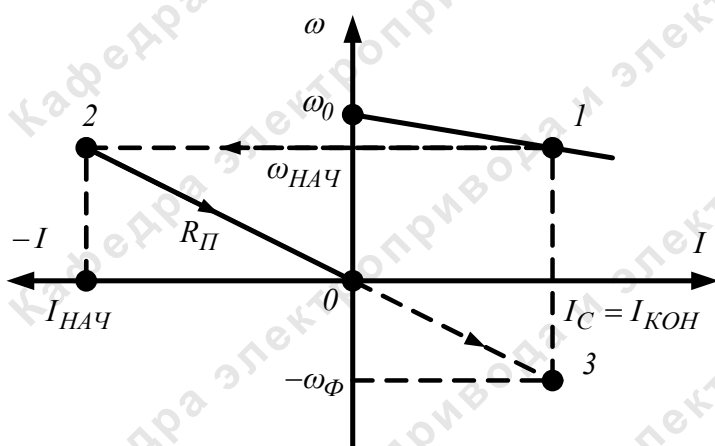
$$\omega_{НАЧ} = \omega_1 = \frac{U - I_C \cdot R_{Я}}{C}$$

$$I_{НАЧ} = \frac{U - C \cdot \omega_1}{R_{Я} + \frac{R_{Ш} \cdot R_{\Pi}}{R_{Ш} + R_{\Pi}}}$$

$$\omega_{\Phi} = \frac{U}{C} \cdot \frac{R_{Ш}}{R_{Ш} + R_{\Pi}} - \frac{I_C}{C} \cdot \left( R_{Я} + \frac{R_{Ш} \cdot R_{\Pi}}{R_{Ш} + R_{\Pi}} \right)$$

$$T_M = \frac{J \cdot \left( R_{Я} + \frac{R_{Ш} \cdot R_{\Pi}}{R_{Ш} + R_{\Pi}} \right)}{C^2}$$

Рис. 1.5. Динамическое торможение при шунтировании якоря резистором (характеристика 2 –  $\omega_{0ш}$ )



$$R_{\Pi} = R_{Я} + R_{Д};$$

$$\omega_{НАЧ} = \omega_1 = \frac{U - I_C \cdot (R_{Я} + R_{Д})}{C}$$

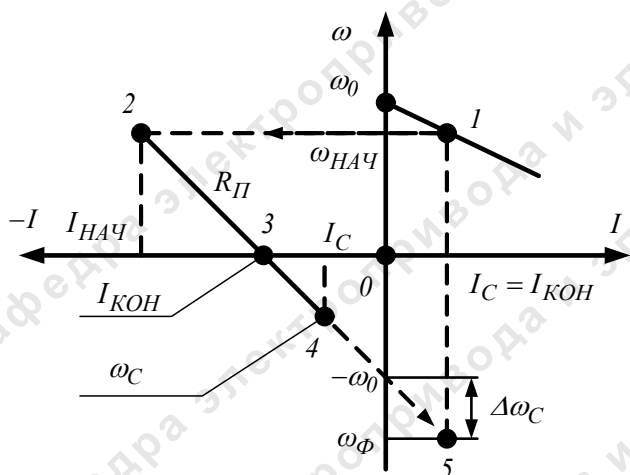
$$I_{НАЧ} = \frac{C \cdot \omega_1}{R_{Я} + R_{Д}}$$

$$\omega_{\Phi} = -\frac{I_C \cdot (R_{Я} + R_{Д})}{C}$$

$$T_M = \frac{J \cdot (R_{Я} + R_{Д})}{C^2}$$

Рис. 1.6. Динамическое торможение с независимым возбуждением и отключенным от сети якорем (характеристика 2-0)





$$R_{\Pi} = R_{Я} + R_{Д}$$

$$\omega_{НАЧ} = \omega_I = \frac{U - I_C \cdot (R_{Я} + R_{Д})}{C}$$

$$I_{НАЧ} = \frac{U + C \cdot \omega_{НАЧ}}{R_{Я} + R_{Д}}$$

$$I_{КОН} = \frac{U}{R_{Я} + R_{Д}}$$

$$\omega_{\Phi} = -(\omega_0 + \Delta\omega_C) = -\left[ \omega_0 + \frac{I_C \cdot (R_{Я} + R_{Д})}{C} \right]$$

$$T_M = \frac{J \cdot (R_{Я} + R_{Д})}{C^2}$$

Рис. 1.7. Противовключение изменением полярности напряжения якоря (характеристика 2-3)

#### 1.4. Принципиальная электрическая схема стенда

Принципиальная электрическая схема приведена на рис. 1.1.

Источник GA - источник синусоидального напряжения промышленной частоты.

Источник питания двигателя постоянного тока GB используется для питания регулируемым напряжением обмоток машины (двигателя) постоянного тока D1, работающей с независимым возбуждением. Половины обмотки возбуждения двигателя D1 следует соединить последовательно.

Преобразователь угловых перемещений DD генерирует импульсы, поступающие на вход указателя частоты вращения IB электромашинного агрегата.

Машина переменного тока D2, работающая в режиме генератора и обеспечивающая нагрузку на валу исследуемого двигателя, нагружена на активную нагрузку RA. Возбудитель GG питает обмотку возбуждения машины D2 регулируемым напряжением.

Реостат RR ограничивает ток цепи якоря двигателя D1. Реостат RB возбуждения машины постоянного тока ограничивает ток цепи возбуждения двигателя D1.

С помощью мультиметров блока BM контролируются ток и напряжение якоря, а также ток возбуждения двигателя D1.

Датчики тока и напряжения блока BA гальванически изолируют от силовой электрической цепи и нормируют сигналы о токе и напряжении якоря и токе возбуждения исследуемого двигателя D1.

Коннектор КК выполняет функцию связующего звена между компьютером ИМВ и блоком датчиков тока и напряжения ВА.

Компьютер ИМВ используется в режиме информационно-измерительной системы.

### 1.5. Программа экспериментов

Порядок экспериментального исследования электропривода:

- проверка работоспособности;
- зарисовать переходные процессы скорости  $\omega = f(t)$ , тока  $I = f(t)$  и момента  $M = f(t)$  при пуске на естественной характеристике;
- зарисовать переходные процессы скорости  $\omega = f(t)$ , тока  $I = f(t)$  и момента  $M = f(t)$  пуска при введенном добавочном сопротивлении в цепь якоря;
- зарисовать переходные процессы скорости  $\omega = f(t)$ , тока  $I = f(t)$  и момента  $M = f(t)$  пуска при пониженном напряжении;
- зарисовать переходные процессы скорости  $\omega = f(t)$ , тока  $I = f(t)$  и момента  $M = f(t)$  пуска при ослабленном потоке;
- зарисовать переходные процессы скорости  $\omega = f(t)$ , тока  $I = f(t)$  и момента  $M = f(t)$  пуска при шунтировании цепи якоря;
- зарисовать переходные процессы скорости  $\omega = f(t)$ , тока  $I = f(t)$  и момента  $M = f(t)$  перехода двигателя с естественной на реостатную характеристику;
- зарисовать переходные процессы скорости  $\omega = f(t)$ , тока  $I = f(t)$  и момента  $M = f(t)$  при останове двигателя с естественной характеристики;
- зарисовать переходные процессы скорости  $\omega = f(t)$ , тока  $I = f(t)$  и момента  $M = f(t)$  торможения при введенном добавочном сопротивлении в цепь якоря;
- зарисовать переходные процессы скорости  $\omega = f(t)$ , тока  $I = f(t)$  и момента  $M = f(t)$  торможения при пониженном напряжении;
- зарисовать переходные процессы скорости  $\omega = f(t)$ , тока  $I = f(t)$  и момента  $M = f(t)$  торможения при шунтировании якоря;
- зарисовать переходные процессы скорости  $\omega = f(t)$ , тока  $I = f(t)$  и момента  $M = f(t)$  торможения при ослабленном потоке;
- зарисовать переходные процессы скорости  $\omega = f(t)$ , тока  $I = f(t)$  и момента  $M = f(t)$  при сбросе и набросе нагрузки.

## 1.6. Подготовка стенда к эксперименту

### 1.6.1. Проверка работоспособности стенда (рис. 1.1)

Для этого необходимо сделать следующее:

- Убедиться, что устройства, используемые в экспериментах, отключены от сети электропитания.
- Собрать электрическую схему соединений тепловой защиты машины переменного тока (часть 1, стр. 8, рис.1).
- Соединить гнезда защитного заземления "⊕" устройств, используемых в эксперименте, с гнездом «РЕ» источника GA.
- Подключить аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений (рис.1.1).  
Переключатели режима работы источника GB и возбудителя GG установить в положение «РУЧН.».
- Регулировочные рукоятки источника GB и возбудителя GG повернуть против часовой стрелки до упора.
- Перевести регулировочные рукоятки реостатов блоков RR и RB в положения соответственно 50 и 200 Ом, а активной нагрузки RA в крайнее по часовой стрелке положение.
- Включить выключатели «СЕТЬ» блока мультиметров BM, указателя частоты вращения IB и блока датчиков тока и напряжения VA.
- Включить источник GA. О наличии напряжений фаз на его выходе должны сигнализировать светящиеся светодиоды.
- Установить мультиметры на соответствующие пределы измерений токов и напряжений.
- Включить выключатель «СЕТЬ» и нажать кнопку «ВКЛ.» источника GB.
- Вращая регулировочную рукоятку источника GB, разогнать двигатель D1.
- Привести в рабочее состояние персональный компьютер IBM. Запустить программу «Регистратор режимных параметров машины постоянного тока» или, если необходимо, «Многоканальный осциллограф».
- Нажать на виртуальную кнопку «Запустить».

### 1.6.2. Рекомендации по использованию программы «Многоканальный осциллограф» (рис.1.8)

Программа «Многоканальный осциллограф» является виртуальным аналогом реальных приборов и обладает широкими функцио-

нальными возможностями. Программа предназначена для регистрации и отображения различных аналоговых сигналов в удобной для пользователя форме. Виртуальная схема многоканального осциллографа приведена на рис.1.8.

Ниже перечислены возможности интерфейса программы, а также некоторые замечания по этому поводу.

- Включить компьютер ИМВ > пуск > программы > многоканальный осциллограф.
- Двойным щелчком мыши можно устанавливать в нуль регуляторы смещения картинки по горизонтали и по вертикали.
- Щелчок мыши на осях графика вызывает окно настройки соответствующей оси.

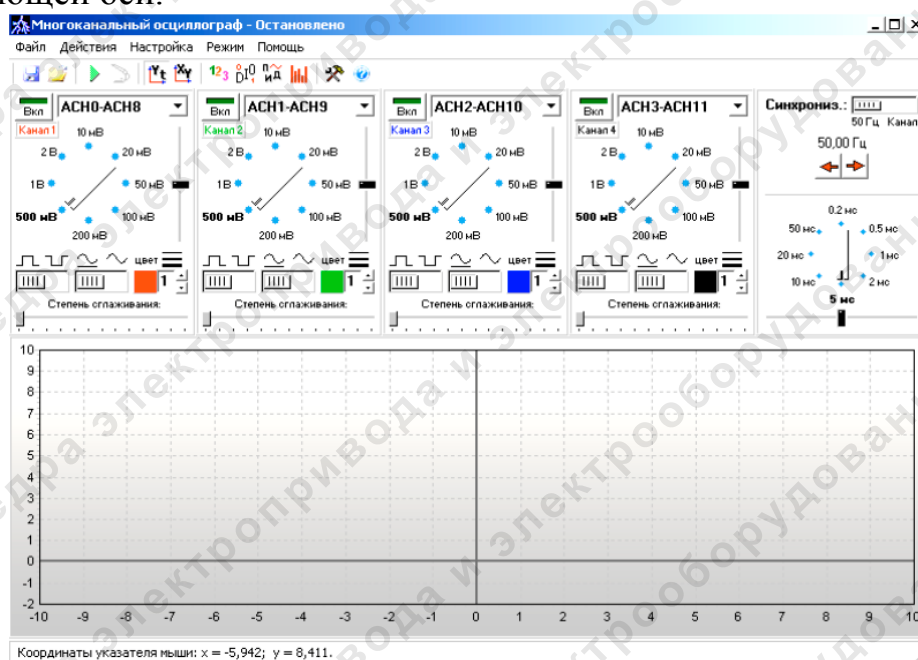



Рис. 1.8. Многоканальный осциллограф

- Масштабирование осциллограмм производится путем нажатия на графике левой клавиши мыши и, не отпуская ее, перемещения манипулятора слева направо и сверху вниз. Возврат к начальному масштабу осуществляется обратным перемещением манипулятора – справа налево и снизу вверх.
- Двигать график осциллограмм относительно осей координат можно путем нажатия и удержания на нем правой кнопки мыши и ее одновременного перемещения в нужную сторону.
- Для удобства определения значений величин на экране отображаются текущие координаты указателя мыши.

- Регулятор уровня синхронизации проградуирован *в единицах графика*.
- Делители напряжения каналов и временной делитель проградуированы по отношению *к одной единице* графика (например, положение 500 мВ означает, что одна единица (не клетка!) графика соответствует 500 мВ).
- Параметры сканирования по умолчанию можно установить, выбрав соответствующий пункт меню «Настройка».
- Аналогичным образом можно зарегистрировать расширение «\*.osc».
- Таким же образом можно вернуть все органы управления в исходное положение.
- Цвет того или иного графика можно выбрать, щелкнув «мышкой» по соответствующей кнопке выбора цвета.
- Отображение интегральных (средних, действующих, средневыпрямленных, максимальных, минимальных, амплитудных) значений сигналов можно включить, нажав на соответствующую кнопку.
- В режиме запоминания осциллограммы можно сглаживать, причем существуют два режима сглаживания - обычное, предназначенное для сглаживания случайных помех, и сильное (x10), предназначенное для сглаживания частот, сравнимых с 50 Гц. Следует понимать, что *любое сглаживание в общем случае искажает форму снятых зависимостей*.
- В режиме запоминания можно также менять порядок отображения графиков (т.е. вывести какую-либо кривую поверх остальных).

### **1.6.3. Рекомендации по использованию программы «Регистратор режимных параметров машины постоянного тока»**

- Для определения координат точек на графиках использовать отображаемые на экране текущие координаты указателя мыши.
- Масштабирование производить путем нажатия на графике левой клавиши мыши и, не отпуская ее, перемещения манипулятора слева направо и сверху вниз. Возврат к начальному масштабу осуществлять обратным перемещением манипулятора – справа налево и снизу вверх.
- Графики относительно осей координат двигать путем нажатия и удержания на соответствующем объекте правой кнопки мыши и ее одновременного перемещения в нужную сторону.

- Очищать область построения динамической характеристики нажатием на соответствующую виртуальную кнопку  или клавишу «Пробел».

### 1.7. Исследование процесса пуска электропривода на естественной характеристике

Характеристики  $\omega = f(t)$ ,  $I = f(t)$  и  $M = f(t)$  снимаются при номинальных параметрах двигателя D1 (рис 1.9).

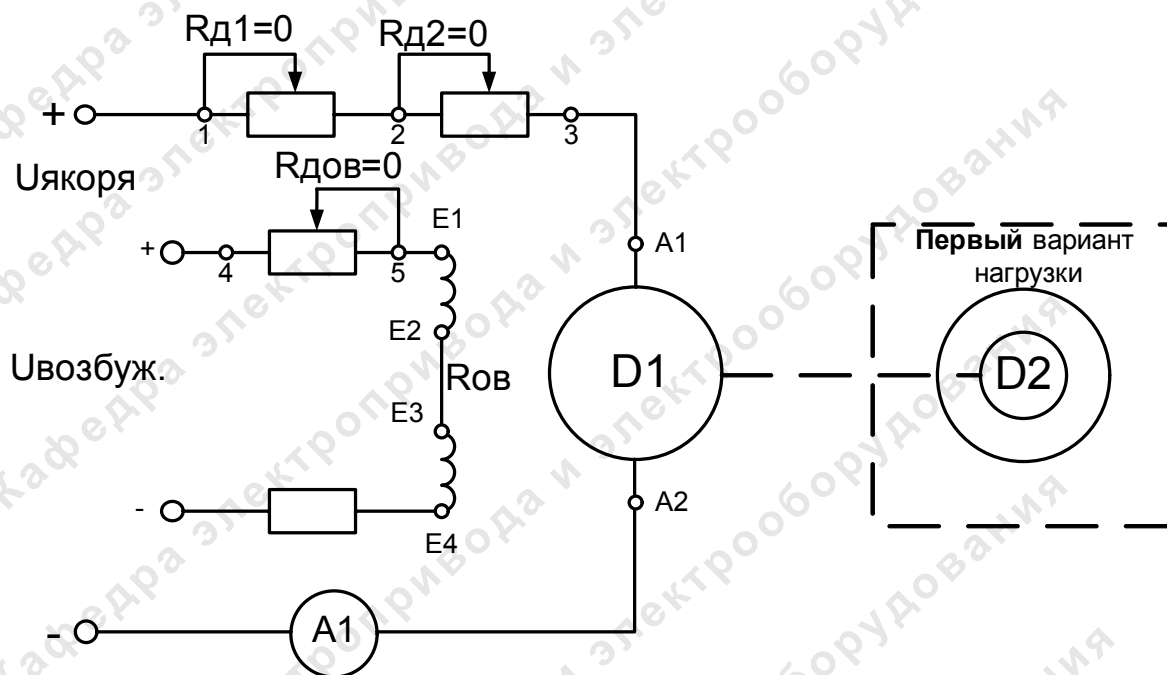


Рис. 1.9 Схема для снятия естественной характеристики в двигательном режиме

- Подготовить стенд к работе по пункту 1.6.1.
- Вращая регулировочную рукоятку возбудителя GG, установить ток якоря двигателя D1 равным 0,5 А.
  - Отключить двигатель D1 нажатием на кнопку «ОТКЛ.» источника питания GB.
  - Перевести регулировочные рукоятки реостатов RR и RB в крайнее левое положение.
  - При дальнейшей работе использовать рекомендации пунктов 1.6.2 и 1.6.3.
  - Организовать переходный процесс пуска, для чего нажать кнопку «ВКЛ.» источника питания GB.


- Наблюдать изменение координат и параметров электропривода в реальном времени  $\omega = f(t)$ ,  $I = f(t)$  и  $M = f(t)$ . При получении характеристик плохо приемлемых для анализа, повторить опыт с использованием программы «Многоканальный осциллограф».
- Сразу после завершения переходного процесса нажать виртуальную кнопку «Остановить» .
- Запустить из меню «Пуск > Программы > Стандартные» графический редактор «Paint» и поместить в него содержимое буфера обмена (меню «Правка > Вставить») или Shift-Ins (или Ctrl-V). Сохранить полученную информацию на Flash-памяти;
- По завершении эксперимента сначала у возбуждателя GG, а затем у источника GB повернуть регулировочную рукоятку против часовой стрелки до упора, нажать кнопки «ОТКЛ.» и отключить выключатели «СЕТЬ» указанных блоков. Отключить источник GA нажатием на кнопку-гриб и последующим поворотом против часовой стрелки ключа выключателя. Отключить выключатели «СЕТЬ» всех используемых в эксперименте блоков.
- Анализировать запомненные временные зависимости координат и параметров электропривода. Результаты анализа занести в таблицу 1.2.

Таблица 1.2

№п. п.	Параметр переходного процесса								Название переходного процесса (пуск, торможение и т.д.)
	$t_{пп}$ , мс	$\omega_{уст}$ , с <sup>-1</sup>	$\omega_{нач}$ , с <sup>-1</sup>	$I_{нач}$ , мА	$I_{уст}$ , мА	$\delta I_{уст}$ , %	$\delta I_{макс}$ , %	$I_{макс}$ , мА	
1									
2									
3									
4									
5									
6									

### 1.8. Исследование процесса пуска при введенном добавочном сопротивлении в цепь якоря двигателя D1

Характеристики  $\omega = f(t)$ ,  $I = f(t)$  и  $M = f(t)$  снимать при напряжении источника питания  $U_I = U_H$  и различных добавочных сопротивлениях ( $R_{д1}$  и  $R_{д2}$ ) в цепи якоря двигателя D1 (рис.1.10). Дальнейшее проведение работ согласно пункта 1.7.

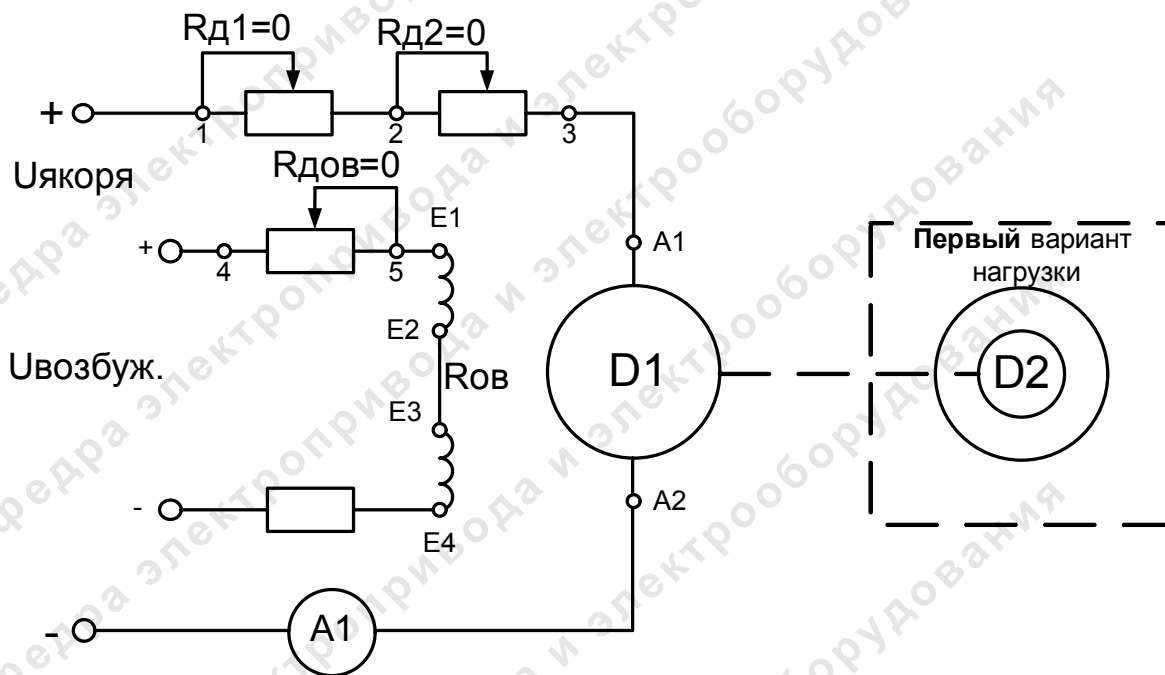


Рис. 1.10. Схема для снятия реостатных характеристик в двигательном режиме

### 1.9. Исследование процессов пуска при пониженном напряжении питания $U_1$ двигателя D1

Характеристики  $\omega = f(t)$ ,  $I = f(t)$  и  $M = f(t)$  снимать при  $R_{Д1}$  и  $R_{Д2}$  равными нулю и различных напряжениях питания  $U_1$  двигателя D1, устанавливаемых потенциометром блока GB (рис. 1.9). Дальнейшее проведение работ согласно пункта 1.7.

### 1.10. Исследование процессов пуска при ослабленном потоке $\Phi$ двигателя D1

Характеристики  $\omega = f(t)$ ,  $I = f(t)$  и  $M = f(t)$  снимать при  $R_{Д1}$  и  $R_{Д2}$  равными нулю и напряжении источника питания  $U_1 = U_H$ . Уменьшение тока возбуждения  $I_B$  осуществляется введением  $R_{ДОВ}$  в цепь обмотки возбуждения двигателя D1 (рис. 1.11). Дальнейшее проведение работ согласно пункта 1.7.



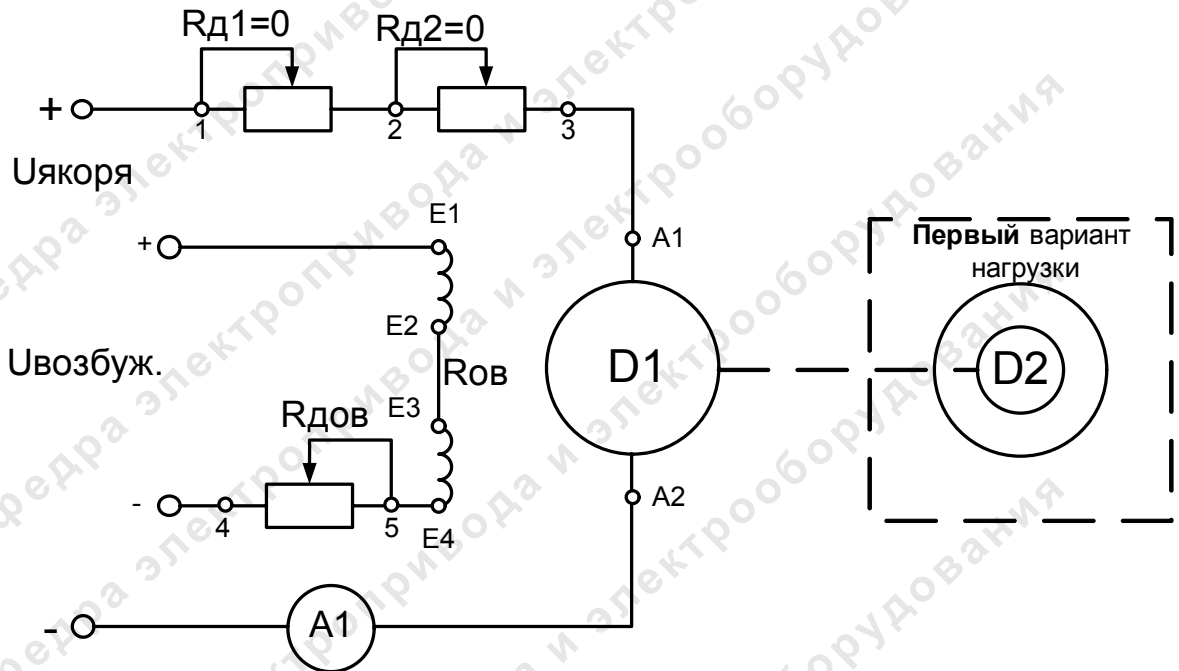


Рис. 1.11. Схема для снятия характеристик в двигательном режиме при ослабленном магнитном потоке

### 1.11. Исследование процессов пуска при шунтировании якоря двигателя D1

Характеристики  $\omega = f(t)$ ,  $I = f(t)$  и  $M = f(t)$  снимать по схеме, изображенной на рис. 1.12, при установленных величинах сопротивлений  $R_{д1}=100$  Ом и  $R_{д2}=100$  Ом и напряжении источника питания  $U_1=U_H$ . Дальнейшее проведение работ согласно пункта 1.7.

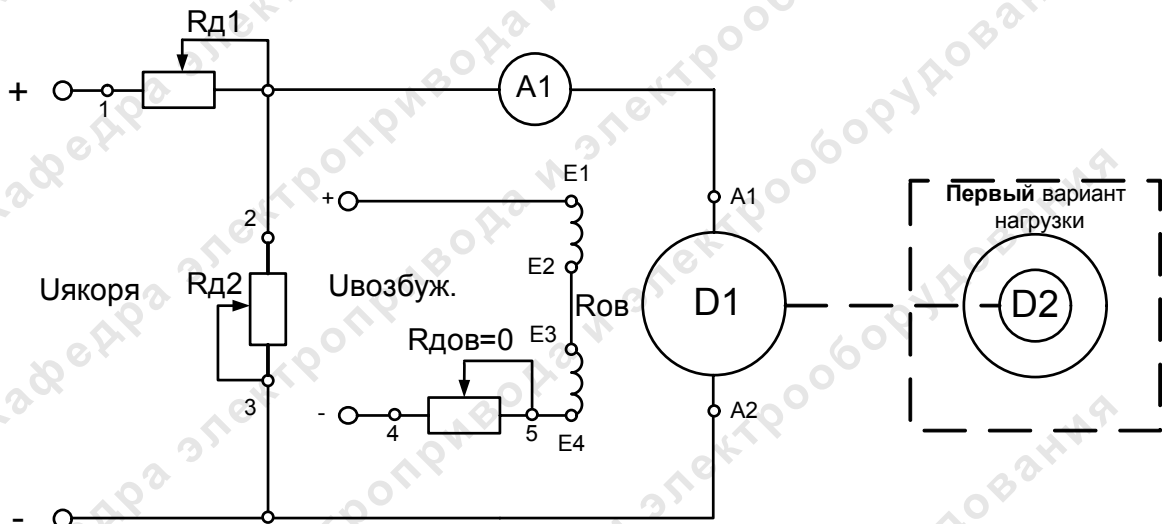



Рис. 1.12. Схема для снятия характеристик при шунтировании якоря

### 1.12. Исследование процесса перехода с естественной на реостатную характеристику двигателя D1

Снятие характеристик  $\omega = f(t)$ ,  $I = f(t)$  и  $M = f(t)$  производить при номинальных параметрах двигателя D1 (рис.1.9).


Подготовить стенд к работе по пункту 1.6.1.

- Вращая регулировочную рукоятку возбуждателя GG, установить ток якоря двигателя D1 равным 0,5 А.
- Перевести регулировочные рукоятки реостатов RR и RB в крайнее левое положение.
- При дальнейшей работе использовать рекомендации пунктов 1.6.2 и 1.6.3.
- Организовать переходный процесс перехода с естественной характеристики на реостатную путем введения в цепь якоря двигателя D1 сопротивления  $R_{д1}=100$  Ом.
- Наблюдать изменение координат и параметров электропривода в реальном времени  $\omega = f(t)$ ,  $I = f(t)$  и  $M = f(t)$ . При получении характеристик плохо приемлемых для анализа, повторить опыт с использованием программы «Многоканальный осциллограф».
- Сразу после завершения переходного процесса нажать виртуальную кнопку «Остановить» .
- Запустить из меню «Пуск > Программы > Стандартные» графический редактор «Paint» и поместить в него содержимое буфера обмена (меню «Правка > Вставить» или Shift-Ins (или Ctrl-V). Сохранить полученную информацию на Flash-памяти.
- По завершении эксперимента сначала у возбуждателя GG, а затем у источника GB повернуть регулировочную рукоятку против часовой стрелки до упора, нажать кнопки «ОТКЛ.» и отключить выключатели «СЕТЬ» указанных блоков. Отключить источник GA нажатием на кнопку-гриб и последующим поворотом против часовой стрелки ключа выключателя. Отключить выключатели «СЕТЬ» всех используемых в эксперименте блоков.
- Анализировать запомненные временные зависимости координат и параметров электропривода. Результаты анализа занести в таблицу, аналогичную таблице 1.2.

### 1.13. Исследование процесса останова электропривода с естественной характеристики

Характеристики  $\omega = f(t)$ ,  $I = f(t)$  и  $M = f(t)$  снимать при номинальных параметрах двигателя D1 (рис.1.9).

Подготовить стенд к работе по пункту 1.6.1.

- Вращая регулировочную рукоятку возбуждителя GG, установить ток якоря двигателя D1 равным 0,5 А.
- Перевести регулировочные рукоятки реостатов RR и RB в крайние левые положения.
- При дальнейшей работе использовать рекомендации пунктов 1.6.2. и 1.6.3.
- Организовать переходный процесс останова, для чего нажать кнопку «ОТКЛ.» источника питания GB.
- Наблюдать изменение координат и параметров электропривода в реальном времени  $\omega = f(t)$ ,  $I = f(t)$  и  $M = f(t)$ . При получении характеристик плохо приемлемых для анализа, повторить опыт с использованием программы «Многоканальный осциллограф».
- Сразу после завершения переходного процесса нажать виртуальную кнопку «Остановить» .
- Запустить из меню «Пуск > Программы > Стандартные» графический редактор «Paint» и поместить в него содержимое буфера обмена (меню «Правка > Вставить» или Shift-Ins (или Ctrl-V). Сохранить полученную информацию на Flash-памяти.
- По завершении эксперимента сначала у возбуждителя GG, а затем у источника GB повернуть регулировочную рукоятку против часовой стрелки до упора, нажать кнопки «ОТКЛ.» и отключить выключатели «СЕТЬ» указанных блоков. Отключить источник GA нажатием на кнопку-гриб и последующим поворотом против часовой стрелки ключа выключателя. Отключить выключатели «СЕТЬ» всех используемых в эксперименте блоков.
- Анализировать запомненные временные зависимости координат и параметров электропривода. Результаты анализа занести в таблицу, аналогичную таблице 1.2.

#### **1.14. Исследование процесса торможения при введенных добавочных сопротивлениях $R_{Д1}$ , $R_{Д2}$ в цепь якоря двигателя D1**

Характеристики  $\omega = f(t)$ ,  $I = f(t)$  и  $M = f(t)$  снимать при напряжении источника питания  $U_I = U_H$  и различных добавочных сопротивлениях ( $R_{Д1}$  и  $R_{Д2}$ ) в цепи якоря двигателя D1 (рис.1.11) Дальнейшее проведение работ согласно пункта 1.13.

#### **1.15. Исследование процесса торможения при пониженном напряжении питания $U_I$ двигателя D1**

Характеристики  $\omega = f(t)$ ,  $I = f(t)$  и  $M = f(t)$  снимать при  $R_{Д1}$  и  $R_{Д2}$  равными нулю и различном напряжении питания  $U_I$  двигателя D1, устанавливаемого потенциометром GB (рис.1.9). Дальнейшее проведение работ согласно пункта 1.13.

### **1.16. Исследование процесса торможения при шунтировании якоря двигателя D1**

Характеристики  $\omega = f(t)$ ,  $I = f(t)$  и  $M = f(t)$  снимать при напряжении источника питания  $U_I = U_H$  согласно схемы на рис.1.12 – торможение при шунтировании якоря. Дальнейшее проведение работ согласно пункта 1.13.


### **1.17. Исследование процесса торможения при ослабленном потоке $\Phi$ двигателя D1.**

Характеристики  $\omega = f(t)$ ,  $I = f(t)$  и  $M = f(t)$  снимать при  $R_{Д1}$  и  $R_{Д2}$  равными нулю и напряжениями источника питания  $U_I = U_H$ . Уменьшение тока возбуждения  $I_B$  осуществляется введением  $R_{ДОВ}$  в цепь обмотки возбуждения двигателя D1 с помощью реостата RB (рис.1.11). Дальнейшее проведение работ согласно пункта 1.13.

### **1.18. Исследование переходного процесса электропривода в режиме сброс-наброс нагрузки**

Характеристики  $\omega = f(t)$ ,  $I = f(t)$  и  $M = f(t)$  снимаются при номинальных параметрах двигателя D1 (рис.1.9).

Подготовить стенд к работе по пункту 1.6.1.

- Вращая регулировочную рукоятку возбудителя GG, установить ток якоря двигателя D1 равным 0,5 А.
- Организовать переходный процесс сброс-наброс нагрузки двигателя D1. Для чего нажать кнопку «ОТКЛ.» и спустя 5 с – кнопку «ВКЛ.» возбудителя GG.
- Наблюдать на экране компьютера изменение координат  $\omega = f(t)$ ,  $I = f(t)$  и  $M = f(t)$  электропривода в реальном времени.
- Сразу после завершения переходного процесса нажать виртуальную кнопку «Остановить» .
- Запустить из меню «Пуск > Программы > Стандартные» графический редактор «Paint» и поместить в него содержимое буфера обмена (меню «Правка > Вставить» или Shift-Ins (или Ctrl-V). Сохранить полученную информацию на Flash-памяти;
- По завершении эксперимента сначала у возбудителя GG, а затем у источника GB повернуть регулировочную рукоятку против часо-

вой стрелки до упора, нажать кнопки «ОТКЛ.» и отключить выключатели «СЕТЬ» указанных блоков. Отключить источник ГА нажатием на кнопку-гриб и последующим поворотом против часовой стрелки ключа выключателя. Отключить выключатели «СЕТЬ» всех используемых в эксперименте блоков.

- Анализировать запомненные временные зависимости координат и параметров электропривода. Результаты анализа занести в таблицу, аналогичную таблице 1.2.

### **1.19. Содержание отчета**

1. Цель работы.

2. Принципиальная электрическая схема стенда с краткими пояснениями.

3. Таблицы опытных данных, графики переходных процессов скорости  $\omega=f(t)$  и тока  $I=f(t)$  при пуске, останове, сбросе и набросе нагрузки на соответствующих характеристиках.

4. Краткие выводы.

### **1.20. Контрольные вопросы**

1.20.1. Почему при переходных процессах ток якоря и скорость двигателя изменяются не скачкообразно, а по экспонентам?

1.20.2. Что такое электромеханическая постоянная времени электропривода и способы ее определения?

1.20.3. Как электромеханическая постоянная времени зависит от величины нагрузки?

1.20.4. Что такое электромагнитная постоянная времени цепи якоря? То же цепи обмотки возбуждения?

1.20.5. Перечислить способы изменения постоянной времени электропривода?

1.20.6. Как определить время переходного процесса по осциллограмме и расчетным способом?

1.20.7. При каком условии переходный процесс данного двигателя может оказаться колебательным?

1.20.8. Почему времена переходного процесса скорости и тока могут отличаться друг от друга?

1.20.9. Пояснить понятие «установившаяся скорость» и «установившаяся фиктивная скорость».

1.20.10. Изобразить графически переход с одной статической характеристики  $\omega=\varphi(t)$  на другую характеристику без учета и с учетом индуктивности якоря двигателя

1.20.11. Почему переходные режимы двигателя следует выполнять с добавочным сопротивлением в цепи якоря?

1.20.12. Как найти по осциллограмме величину скорости и тока в любой момент времени переходного процесса?

### Литература

1. Москаленко В.В. Автоматизированный электропривод: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 416 с.

2. Ильинский Н.Ф., Козаченко В.Ф. Общий курс электропривода: Учеб. для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 544 с.

3. Москаленко В.В. Электрический привод: Учеб. пособие для студ. Учреждений сред. проф. образования. – М.: Мастерство: Высшая школа, 2000. – 368 с.

4. Электротехника: Учебное пособие для вузов. В 3-х книгах. Книга 3. Электроприводы. Электроснабжение / Под ред. П.А. Бутырина, Р.Х. Гафиятуллина, А.А. Шестакова. – Челябинск: Изд-во Ю УрГУ, 2005. – 639 с.

## Лабораторная работа № 2

### ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И РЕЖИМЫ РАБОТЫ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ФАЗНЫМ РОТОРОМ

#### 2.1. Цель работы

Исследование характеристик переходных процессов скорости  $\omega = f(t)$ , тока  $I = f(t)$  и момента  $M = f(t)$  при различных динамических режимах в асинхронном электроприводе.

#### 2.2. Оборудование стенда (состав аппаратуры)

##### 2.2.1. Назначение и описание функциональных блоков лабораторной установки (рис. 2.1)

Трёхфазный источник питания.

Предназначен для питания комплекта трёхфазным переменным напряжением. Включается вручную. Имеет защиту от перегрузок, устройство защитного отключения, кнопку аварийного отключения и ключ от несанкционированного включения.

Источник питания машины постоянного тока.

Предназначен для питания обмоток якоря и возбуждения постоянным током. Включается вручную или дистанционно / автоматически (от ПЭВМ). Якорное напряжение регулируется вручную или дистанционно. Напряжение возбуждения нерегулируемое.

Трёхфазная трансформаторная группа.

Предназначена для преобразования однофазного / трёхфазного напряжения.

Трёхполюсный выключатель.

Предназначен для ручного или дистанционного / автоматического (от ПЭВМ) включения / отключения электрических цепей.

Реостат для цепи ротора машины переменного тока.

Предназначен для ручного регулирования тока в обмотке ротора машины переменного тока.

Блок датчиков тока и напряжения.

Предназначен для получения нормированных электрических сигналов, пропорциональных напряжениям и токам в контролируемых силовых цепях постоянного и переменного тока, и гальванически с последними не связанных.

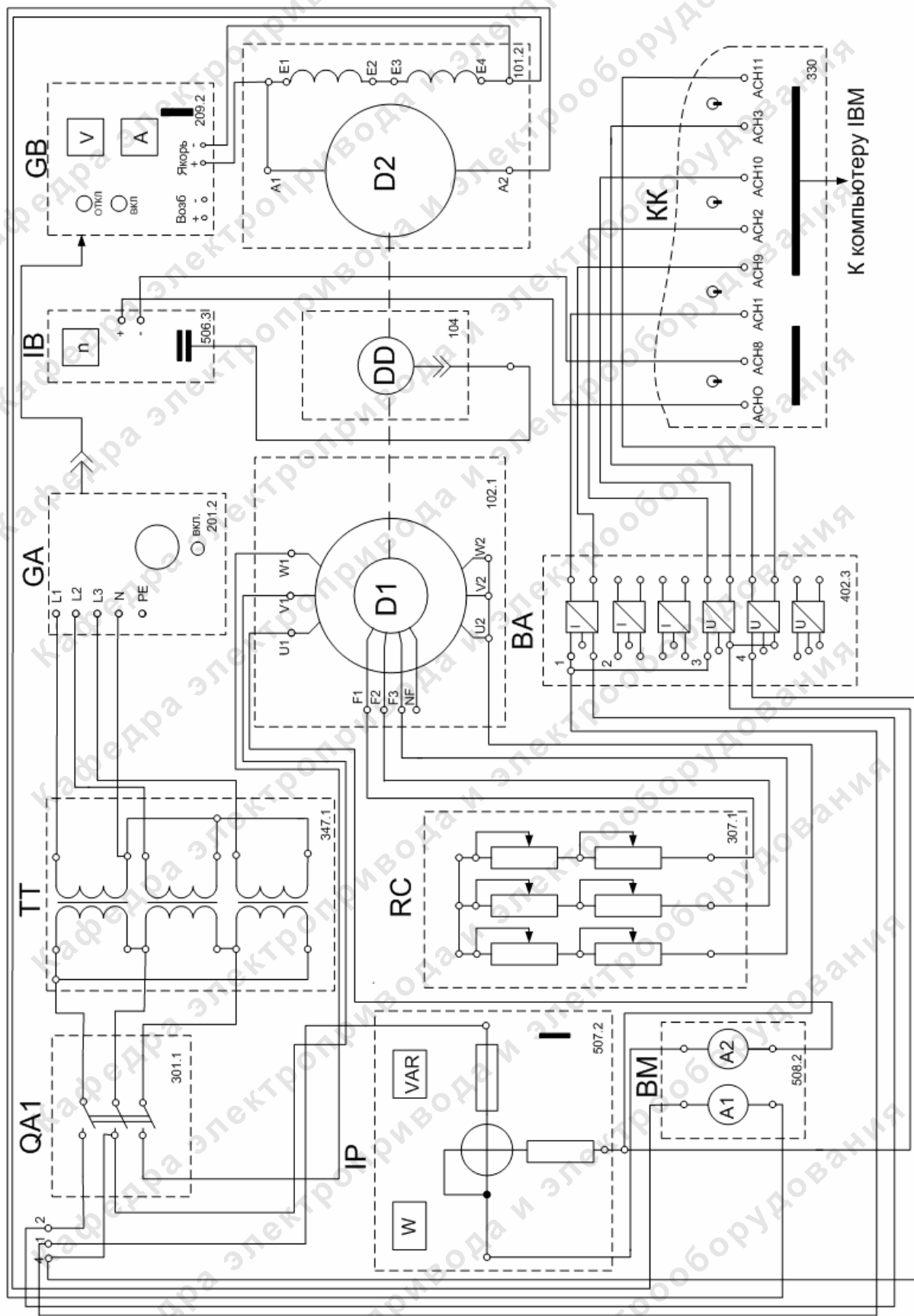


Рис. 2.1. Принципиальная электрическая схема стенда



Коннектор.

Предназначен для обеспечения удобного доступа к входам / выходам платы сбора данных PCI 6024E персонального компьютера.

Персональный компьютер.

Предназначен для дистанционного / автоматического управления лабораторным комплексом и отображения информации о нем.

Преобразователь угловых перемещений.

Предназначен для регулирования частоты вращения асинхронного двигателя. Выходные частота и напряжение регулируются согласованно вручную или дистанционно / автоматически (от ПЭВМ).

Указатель частоты вращения.

Предназначен для отображения частоты вращения электрических машин в электромашинном агрегате в аналоговой форме.

Измеритель мощностей.

Предназначен для измерения активной и реактивной мощностей в однофазной электрической цепи и отображения их в аналоговой форме.

Блок мультиметров.

Предназначен для измерения токов, напряжений, омических сопротивлений. Цифровой с жидкокристаллическим дисплеем.

Исследуемая машина переменного тока (асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором):

$$\begin{aligned} P_H &= 30 \text{ Вт}; & \cos \varphi_H &= 0,73; \\ U_H &= 127 \text{ В}; & x_1 &= 0,087 \text{ о.е.}; \\ I_H &= 0,35 \text{ А}; & R_1 &= 0,18 \text{ о.е.}; \\ n_H &= 1250 \text{ об/мин}; & x_2' &= 0,15 \text{ о.е.}; \\ \eta_H &= 36 \%; & R_2' &= 0,150 \text{ о.е.} \end{aligned}$$

Нагрузочная машина постоянного тока (двигатель постоянного тока с независимым возбуждением):

$$\begin{aligned} P_H &= 90 \text{ Вт}; & \eta_H &= 57,2 \%; \\ U_H &= 220 \text{ В}; & \cos \varphi_H &= 0,73; \\ I_H &= 0,56 \text{ А}; & R_{\text{я}} &= 86 \text{ Ом}; \\ n_H &= 1500 \text{ об/мин}; & R_{\text{о.в.}} &= 1,15 \text{ кОм}. \\ I_{\text{вн}} &= 0,2 \text{ А}; \end{aligned}$$

Исследуемая и нагрузочная машины жестко соединены между собой и представлены в виде электромашинного агрегата, дополненного маховиком и преобразователем угловых перемещений.

## 2.2.2. Обозначения и параметры исследуемой схемы (таблица 2.1)

Таблица 2.1

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
ТТ	Трехфазная трансформаторная группа	347.1	3 x 80 В·А; 230 / 242, 235, 230, 226, 220, 133, 127 В
QA	Трехполюсный выключатель	301.1	~400 В; 10 А
RC	Реостат для цепи ротора машины переменного тока	307.1	3 x 0...40 Ом; 1 А
ВА	Блок датчиков тока и напряжения	402.3	3 измерительных преобразователя «ток-напряжение» 5А/0,5А/5 В; 3 измерительных преобразователя «напряжение-напряжение» 1000 В/100 В/3 В
КК	Коннектор	330	8 аналог. дифф. входов; 2 аналог. выхода; 8 цифр. входов/выходов
IBM	Персональный компьютер	550	IBM-совместимый, плата сбора информации PCI 6024E
GA	Трехфазный источник питания	201.2	~400 В; 16 А
GB	Источник питания двигателя постоянного тока	206.1	-0...250 В 3 А (якорь) -200 В; 1 А (возбуждение)
D2	Машина постоянного тока	101.1	90 Вт; -220 В 0,76 А (якорь) -220 В (возбуждение)

Продолжение таблицы 2.1

DD	Преобразователь угловых перемещений	104	6 выходных сигналов
D1	Машина переменного тока	102.1	100 Вт; ~230 В; 1500 мин <sup>-1</sup>
IB	Указатель частоты вращения	506.3	2000...0...2000 мин <sup>-1</sup>
IP	Измеритель мощностей	507.2	15; 60; 150; 300; 600 В, 0,05; 0,1; 0,2; 0,5 А
BM	Блок мультиметров	508.2	3 мультиметра ≈0...1000 В; ≈0...10 А; 0...20 МОм

### 2.3. Механические и электромагнитные переходные процессов в асинхронном электроприводе

#### 2.3.1. Механические переходные процессы

Элементы, образующие механическую часть электрического привода (ЭП), связаны между собой и оказывают тем самым друг на друга соответствующее воздействие. Поэтому, анализируя механическое движение того или иного элемента, необходимо учитывать влияние на него других элементов кинематической схемы ЭП. Это достигается соответствующим пересчетом входящих в уравнения (2.1), (2.2) сил, моментов, масс и моментов инерции к элементу, движение которого рассматривается.

$$\sum F = m \frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial m}{\partial t}, \quad (2.1)$$

$$\sum M = J \frac{\partial \omega}{\partial t} + \omega \frac{\partial J}{\partial t}. \quad (2.2)$$

Выполнение операции приведения позволяет раскрыть левую часть уравнения (2.3):

$$\sum M = J d\omega / dt = J \varepsilon. \quad (2.3)$$

В общем случае входящие в него моменты двигателя  $M$  и сопротивления  $M_c$  могут иметь как положительные, так и отрицательные знаки:

$$\pm M \pm M_c = J d\omega / dt. \quad (2.4)$$

Правило, по которому определяются эти знаки, следующее: если направление действия момента совпадает с направлением скорости, то такой момент считается положительным и наоборот. В наиболее типичном для работы ЭП случае двигатель создает движущий момент, а исполнительный орган—момент сопротивления движению.

Левая часть уравнения (2.4), представляющая собой разность моментов двигателя и нагрузки и определяющая условия ускорения или замедления движения, является динамическим моментом электропривода  $M_{дин} = M - M_c$ .

Механические переходные процессы в асинхронном ЭП описываются основным уравнением механического движения (2.4) в котором моменты АД  $M(S)$  и исполнительного органа  $M_c(\omega)$  в общем случае являются нелинейными функциями скорости (скольжения). Получение искомых зависимостей  $s(t)$ ,  $\omega(t)$  и  $M(t)$  может быть осуществлено несколькими путями.

Переходные процессы этого вида относятся к случаям, когда моменты двигателя и исполнительного органа являются различными, в том числе и нелинейными функциями скорости, времени или положения (пути). Основные трудности получения искомых зависимостей  $\omega(t)$  и  $M(t)$  связаны с интегрированием уравнения движения (2.4), которое из-за множества возможных вариантов не имеет единого универсального способа решения. В зависимости от исходных данных и требуемой точности могут применяться несколько методов нахождения кривых переходного процесса.

### 2.3.1.1. Линеаризация нелинейных механических характеристик двигателя и исполнительного органа

Способ основан на аппроксимации механических характеристик или их отдельных участков прямыми линиями. В этом случае для построения кривых переходного процесса или расчета его продолжительности могут быть использованы формулы:

$$t_{nn} = J(\omega_{кон} - \omega_{нач}) / (M - M_c),$$
$$\omega(t) = (\omega_{нач} - \omega_{уст}) e^{-t/T_m} + \omega_{уст},$$
$$M(t) = (M_{нач} - M_{уст}) e^{-t/T_m} + M_{уст}.$$

Если механические характеристики аппроксимированы несколькими отрезками прямых, то переходный процесс строится по участкам, при этом конечные значения переменных на предыдущем участке являются их начальными значениями для следующего участка.

### 2.3.1.2. Точное интегрирование уравнения движения

Этот способ может использоваться в тех случаях, когда моменты двигателя и исполнительного органа заданы аналитически (в виде формул) как функции скорости, положения или времени. Нахождение зависимостей  $\omega(t)$  и  $M(t)$  осуществляется подстановкой этих функций в уравнение (2.4) и его решением, которое является теоретически точным.

### 2.3.1.3. Методы численного интегрирования уравнения движения

Во многих случаях, когда механические характеристики двигателя и исполнительного органа заданы графически или в виде таблиц, целесообразно применение разработанных в математике численных методов интегрирования дифференциальных уравнений, к которым и относится уравнение (2.4) механического движения ЭП.

Путем сложения скорости на предыдущем интервале  $\omega_{i-1}$  и приращения определяют текущее значение скорости  $\Delta\omega_i$ .

По механическим характеристикам рис. 2.2, на каждом интервале скорости определяют средние значения моментов двигателя  $M_i$  и исполнительного органа  $M_{ci}$ .

### 2.3.1.4. Построение характеристик переходных процессов скорости $\omega=f(t)$ и тока $I=f(t)$ при пуске графическим (графоаналитическим) методом

Методика построения переходного процесса  $\omega=f(I)$  и  $M=f(t)$  графическим способом приведена на рис. 2.2.

По этому методу вначале необходимо построить механическую характеристику двигателя  $M=f(\omega)$  и характеристику статического момента. В нашем случае последний обусловлен моментом потерь в агрегате  $M_c=\Delta M=f(\omega)$ . По нелинейным зависимостям  $M=f(\omega)$  и  $\Delta M=f(\omega)$  строится характеристика динамического момента  $M_j=M-\Delta M$ , которую затем разбивают по оси ординат на ряд отрезков с перепадами скоростей  $\Delta\omega_i$ .

Величины  $\Delta\omega_i$ , могут быть разными или одинаковыми в зависимости от характера изменения момента.

Заменой действительного значения момента во всех интервалах скорости  $\Delta\omega_i$  средними значениями получают ступенчатую линию динамического момента. Влево от начала координат откладывают отрезок ОА, равный  $J_{\max}$ .



В соответствии с вышеизложенным, уравнение движения можно представить в виде пропорции:

$$\frac{Mi \pm M_{ci}}{J} = \frac{\Delta\omega_i}{\Delta t_i} \quad (2.5)$$

Эта пропорция, выраженная в отрезках, будет иметь вид:

$$\frac{Mi \pm M_{ci}}{\frac{\mu_M}{J/\mu_J}} = \frac{\Delta\omega_i/\mu_\omega}{\Delta t_i \cdot \frac{1}{\mu_t}} \quad (2.6)$$

где  $\mu_M, \mu_J, \mu_\omega, \mu_t$  - масштабные коэффициенты для вращающегося момента, момента инерции, скорости и времени.

Из сопоставления выражений (2.5) и (2.6) следует, что равенство (2.6) только в том случае будет отражать действительное соответствие величин, входящих в уравнение движения, если между масштабными коэффициентами имеет место соотношение:

$$\frac{\mu_J}{\mu_M} = \frac{\mu_t}{\mu_\omega} \quad (2.7)$$

Поэтому, задаваясь произвольно масштабами  $\mu_M, \mu_J, \mu_\omega$  получим, что масштаб времени должен быть равен:

$$\mu_t = \frac{\mu_\omega \cdot \mu_J}{\mu_M} \quad (2.8)$$

Характеристику  $\omega=f(t)$ , а, следовательно, и переходные процессы для других величин двигателя, можно построить, находя для её точек 1'', 2'', 3'', ... 8'' значения  $\Delta t_i$ , расчётным способом из выражения:

$$\Delta t = \frac{J \cdot \Delta\omega_i}{M_i \mp M_{ci}} \quad (2.9)$$

Использование для построения механических переходных процессов выражения (2.9) исключает значительную часть графических построений и позволяет осуществить их с большей точностью. В учебных целях для сравнения трудоёмкости и точности графического и графоаналитического способов построения характеристики  $\omega=f(t)$ , рекомендуется при выполнении лабораторной работы строить эту кривую обоими способами.

Построение характеристики переходного процесса тока ведётся на основании имеющейся скоростной характеристики и характеристики переходного процесса скорости. Оно представлено на рис. 2.3, где построена характеристика  $I=f(t)$  при пуске АД на естественной характеристике.

Для расчётов переходных процессов необходимо знать приведённый момент инерции системы электропривода. В лаборатории он должен

быть определён экспериментально и представляет собой суммарный момент инерции испытуемого двигателя ИД и нагрузочной машины НМ, валы которых механически соединены. Из четырёх известных методов определения  $J$ , наименее трудоёмким является метод свободного выбега, суть которого заключается в следующем: агрегат разгоняют до номинальной скорости и отключают его от сети. Накопленная кинетическая энергия теперь будет расходоваться на преодоление сил трения, и двигатель начнет тормозиться "выбегом" (рис. 2.4), подчиняясь третьему закону механики:

$$-\Delta M = J \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad [H \cdot м], \quad (2.10)$$

где  $\Delta M$  - момент потерь, обусловленный силами трения  $[H \cdot м]$ ,  $J$  - момент инерции агрегата  $[кг \cdot м^3]$ .

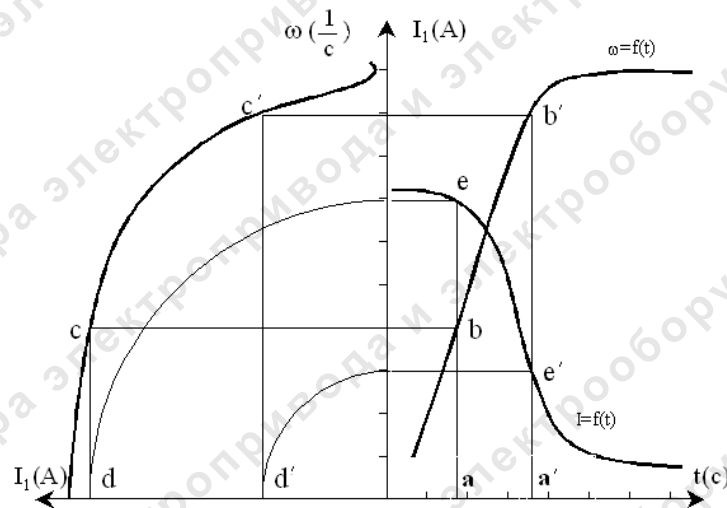


Рис. 2.3. Построение переходных процессов графоаналитическим методом

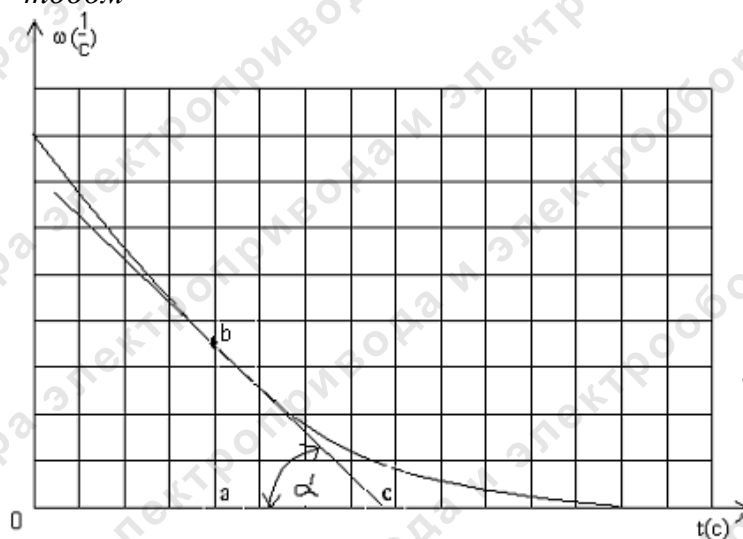


Рис. 2.4. Кривая выбега исследуемого двигателя



### 2.3.2. Электромагнитные переходные процессы

Асинхронный двигатель (АД) представляет собой электромеханический преобразователь энергии с несколькими магнитосвязанными между собой обмотками статора и ротора, взаимное положение которых при вращении ротора непрерывно изменяется. Вследствие этого при пуске, реверсе и торможении двигателя возникающие переходные токи в обмотках статора и ротора изменяются по сложным колебательным зависимостям, а определяемый ими электромагнитный момент имеет колебательный характер и является сложной функцией времени. Что, для примера, можно подтвердить экспериментально снятыми графиками скорости 1 и момента 2 АД (рис.2.5) при его пуске.

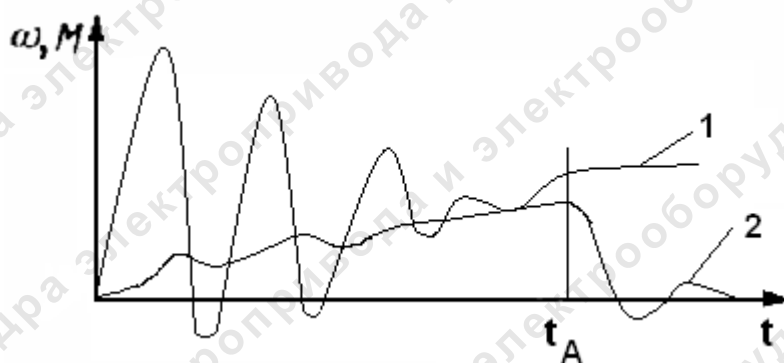


Рис.2.5. Экспериментальные графики момента и скорости при пуске АД

Анализ этих зависимостей позволяет отметить, что при большом суммарном моменте инерции и моменте нагрузки кривая момента АД в начале переходного процесса имеет много пиков, затухание которых происходит медленно.

Большое влияние на характер переходных процессов при реверсе и торможении двигателя оказывает оставшееся магнитное поле, так как при отключении АД от сети магнитный поток электрической машины не может мгновенно снизиться до нуля. Как показывают расчеты и эксперимент, наличие этого потока оказывает неблагоприятное воздействие на переходные процессы и вызывает увеличение максимальных переходных моментов АД при реверсе и торможении. Пики переходных электромагнитных моментов двигателя при пуске в  $3 \div 5$ , а при реверсе в  $12 \div 18$  раз превышают номинальный момент асинхронного двигателя.

### 2.4. Принципиальная электрическая схема стенда

Принципиальная электрическая схема приведена на рис. 2.1.

Источник GA — источник синусоидального напряжения промышленной частоты.

Источник питания двигателя постоянного тока GB используется для питания регулируемым напряжением обмоток машины постоянного тока D2 с параллельным возбуждением, работающей в режиме тормоза.

Преобразователь угловых перемещений DD генерирует импульсы, поступающие на вход указателя частоты вращения IB электромашинного агрегата.

Машина (асинхронный двигатель с фазным ротором) D1 получает питание от источника GA через трехфазную трансформаторную группу ТТ и трехполюсный выключатель QA.

Реостат RC служит для изменения активного сопротивления цепи ротора асинхронного двигателя D1.

Измеритель мощностей IP используется для измерения активной мощности в фазе «А» исследуемого двигателя D1.

С помощью блока мультиметров BM контролируется ток фазы «А» двигателя D1.

Датчики тока и напряжения блока ВА гальванически изолируют от силовой электрической цепи и нормируют сигналы о токе фазы «А», напряжении фазы «А» и напряжении фазы «В» исследуемого двигателя D1.

Коннектор КК выполняет функцию связующего звена между компьютером IBM и блоком измерительных трансформаторов ВА.

Компьютер IBM используется в режиме информационно-измерительной системы.

## 2.5. Программа экспериментов


Порядок экспериментального исследования электропривода:

- проверка работоспособности стенда;
- зарисовать переходные процессы скорости  $\omega = f(t)$ , тока  $I = f(t)$  и момента  $M = f(t)$  при пуске двигателя на естественной характеристике;
- зарисовать переходные процессы скорости  $\omega = f(t)$ , тока  $I = f(t)$  и момента  $M = f(t)$  при торможении двигателя с естественной характеристики;
- зарисовать переходные процессы скорости  $\omega = f(t)$ , тока  $I = f(t)$  и момента  $M = f(t)$  при пуске двигателя на реостатной характеристике;
- зарисовать переходные процессы скорости  $\omega = f(t)$ , тока  $I = f(t)$  и момента  $M = f(t)$  при сбросе и набросе нагрузки.

## 2.6. Подготовка стенда к эксперименту

### 2.6.1. Проверка работоспособности стенда (рис. 2.1)

Для этого необходимо сделать следующее.

- Убедиться, что устройства, используемые в экспериментах, отключены от сети электропитания.
- Собрать электрическую схему соединений тепловой защиты машины переменного тока (часть 1, стр.8, рис.1).
- Соединить гнезда защитного заземления "⊕" устройств, используемых в эксперименте, с гнездом «РЕ» источника GA.
- Соединить аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений (рис.2.1).
- Переключатели режима работы источника GB и выключателя QA установить в положение «РУЧН.».
- Регулировочные рукоятки источника GB и реостата RC повернуть против часовой стрелки до упора.
- Установить переключателями в блоке ТТ номинальное вторичное фазное напряжение трансформаторов 133 В.
- Включить выключатели «СЕТЬ» указателя частоты вращения IB, измерителя мощностей IP, блока мультиметров BM, выключателя QA и блока датчиков тока и напряжения BA.
- Включить источник GA. О наличии напряжений фаз на его выходе должны сигнализировать светящиеся светодиоды.
- Установить мультиметры на соответствующие пределы измерений токов и напряжений.
- Осуществить пуск двигателя D1 нажатием соответствующей кнопки выключателя QA.
- Привести в рабочее состояние персональный компьютер IBM. Запустить программу «Регистратор режимных параметров машины переменного тока» или, если необходимо, «Многоканальный осциллограф».
- Начать сбор данных, нажав на виртуальную кнопку «Запустить» .

### 2.6.2. Рекомендации по использованию программы «Многоканальный осциллограф» (рис.2.6)

Программа «Многоканальный осциллограф» является виртуальным аналогом реальных приборов и обладает широкими функциональными возможностями. Программа предназначена для регистрации и отображения различных аналоговых сигналов в удобной для пользо-

вателя форме. Виртуальная схема многоканального осциллографа приведена на рис.2.6.

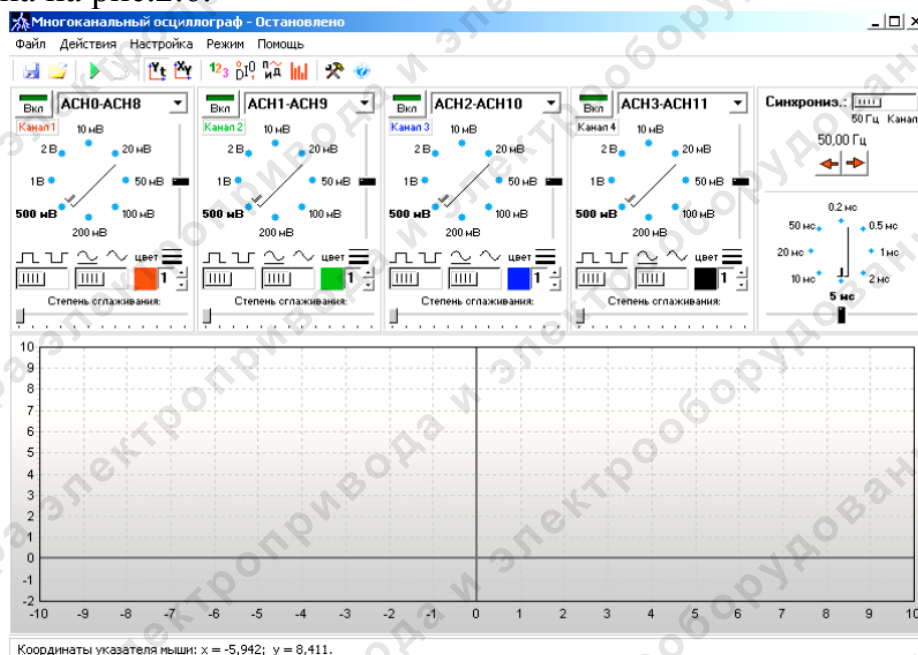


Рис. 2.6. Многоканальный осциллограф

Ниже перечислены возможности интерфейса программы, а также некоторые замечания по этому поводу.


- Включить компьютер ИМВ > пуск > программы > многоканальный осциллограф.
- Двойным щелчком мыши можно устанавливать в нуль регуляторы смещения картинки по горизонтали и по вертикали.
- Щелчок мыши на осях графика вызывает окно настройки соответствующей оси.
- В этом окне, помимо всего прочего, можно включить или отключить отображение нулевых линий.
- Масштабирование осциллограмм производится путем нажатия на графике левой клавиши мыши и, не отпуская ее, перемещения манипулятора слева направо и сверху вниз. Возврат к начальному масштабу осуществляется обратным перемещением манипулятора – справа налево и снизу вверх.
- Двигать график осциллограмм относительно осей координат можно путем нажатия и удержания на нем правой кнопки мыши и ее одновременного перемещения в нужную сторону.
- Для удобства определения значений величин на экране отображаются текущие координаты указателя мыши.

- Регулятор уровня синхронизации проградуирован *в единицах графика*.
- Делители напряжения каналов и временной делитель проградуированы по отношению *к одной единице* графика (например, положение 500 мВ означает, что одна единица (не клетка!) графика соответствует 500 мВ).
- Параметры сканирования по умолчанию можно установить, выбрав соответствующий пункт меню «Настройка».
- Аналогичным образом можно зарегистрировать расширение «\*.osc».
- Таким же образом можно вернуть все органы управления в исходное положение.
- Цвет того или иного графика можно выбрать, щелкнув «мышкой» по соответствующей кнопке выбора цвета.
- Отображение интегральных (средних, действующих, средневыпрямленных, максимальных, минимальных, амплитудных) значений сигналов можно включить, нажав на соответствующую кнопку.
- В режиме запоминания осциллограммы можно сглаживать, причем существуют два режима сглаживания - обычное, предназначенное для сглаживания случайных помех, и сильное (x10), предназначенное для сглаживания частот, сравнимых с 50 Гц. Следует помнить, что *любое сглаживание в общем случае искажает форму снятых зависимостей*.

В режиме запоминания можно также менять порядок отображения графиков (т.е. вывести какую-либо кривую поверх остальных).

### **2.6.3. Рекомендации по использованию программы «Регистратор режимных параметров машины переменного тока»**

- Для определения координат точек на графиках использовать отображаемые на экране текущие координаты указателя мыши.
- Масштабирование производить путем нажатия на графике левой клавиши мыши и, не отпуская ее, перемещения манипулятора слева направо и сверху вниз. Возврат к начальному масштабу осуществлять обратным перемещением манипулятора – справа налево и снизу вверх.
- Графики относительно осей координат двигать путем нажатия и удержания на соответствующем объекте правой кнопки мыши и ее одновременного перемещения в нужную сторону.

- Очищать область построения динамической характеристики нажатием на соответствующую виртуальную кнопку  или клавишу «Пробел».

## 2.7. Исследование процесса пуска электропривода на естественной характеристике

Характеристики  $\omega = f(t)$ ,  $I = f(t)$  и  $M = f(t)$  снимаются при номинальных параметрах двигателя D1 (рис.2.7).

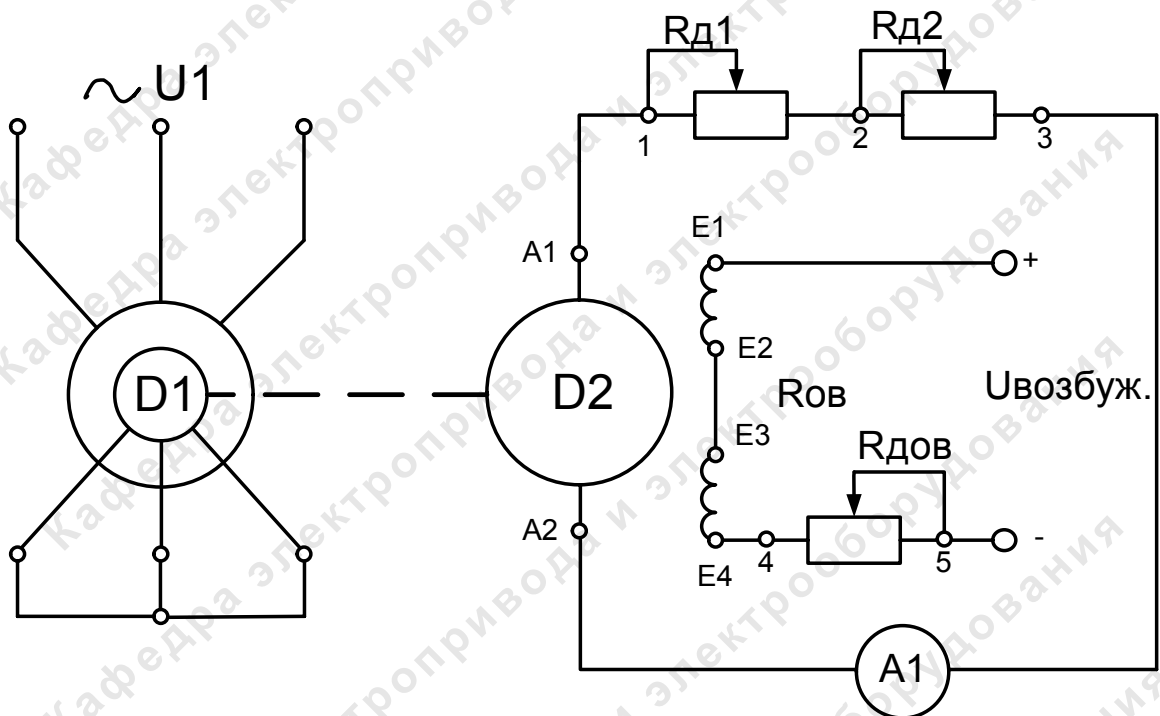



Рис. 2.7. Схема для снятия естественной характеристики в двигательном режиме

- Подготовить стенд к работе по пункту 2.6.1.
- Нажать кнопку «ВКЛ.» источника питания GB.
- Вращая регулировочную рукоятку источника GB, установить ток якоря двигателя D2 равным 0,7 А.
- При дальнейшей работе использовать рекомендации пунктов 2.6.2. и 2.6.3.
- Отключить двигатель D1 путем нажатия кнопки «ОТКЛ.» выключателя QA.
- Начать сбор данных, нажав на виртуальную кнопку «Запустить» .
- Организовать переходный процесс пуска, для чего нажать кнопку «ВКЛ.» выключателя QA.




- Наблюдать изменение координат и параметров электропривода в реальном времени  $\omega = f(t)$ ,  $I = f(t)$  и  $M = f(t)$ . При получении характеристик плохо приемлемых для анализа, повторить опыт с использованием программы «Многоканальный осциллограф».
- Сразу после завершения переходного процесса нажать виртуальную кнопку «Остановить» .
- Запустить из меню «Пуск > Программы > Стандартные» графический редактор «Paint» и поместить в него содержимое буфера обмена (меню «Правка > Вставить») или Shift-Ins (или Ctrl-V). Сохранить полученную информацию на Flash-памяти;
- По завершении эксперимента отключить выключатель QA нажатием на кнопку «ОТКЛ.» и источник GA нажатием на кнопку-гриб и последующим поворотом против часовой стрелки ключа выключателя. Отключить выключатели «СЕТЬ» всех используемых в эксперименте блоков.
- Анализировать запомненные временные зависимости координат и параметров электропривода. Результаты анализа занести в таблицу 2.2.


Таблица 2.2

№п. п.	Параметр переходного процесса								Название переходного процесса (пуск, торможение и т.д.)
	$t_{пп}$ , мс	$\omega_{уст}$ , с <sup>-1</sup>	$\omega_{нач}$ , с <sup>-1</sup>	$I_{нач}$ , мА	$I_{уст}$ , мА	$\delta I_{уст}$ , %	$\delta I_{макс}$ , %	$I_{макс}$ , мА	
1									
2									
3									
4									
5									
6									

### 2.8. Исследование процесса останова электропривода с естественной характеристики

Характеристики  $\omega = f(t)$ ,  $I = f(t)$  и  $M = f(t)$  снимаются при номинальных параметрах двигателя D1 (рис.2.7).

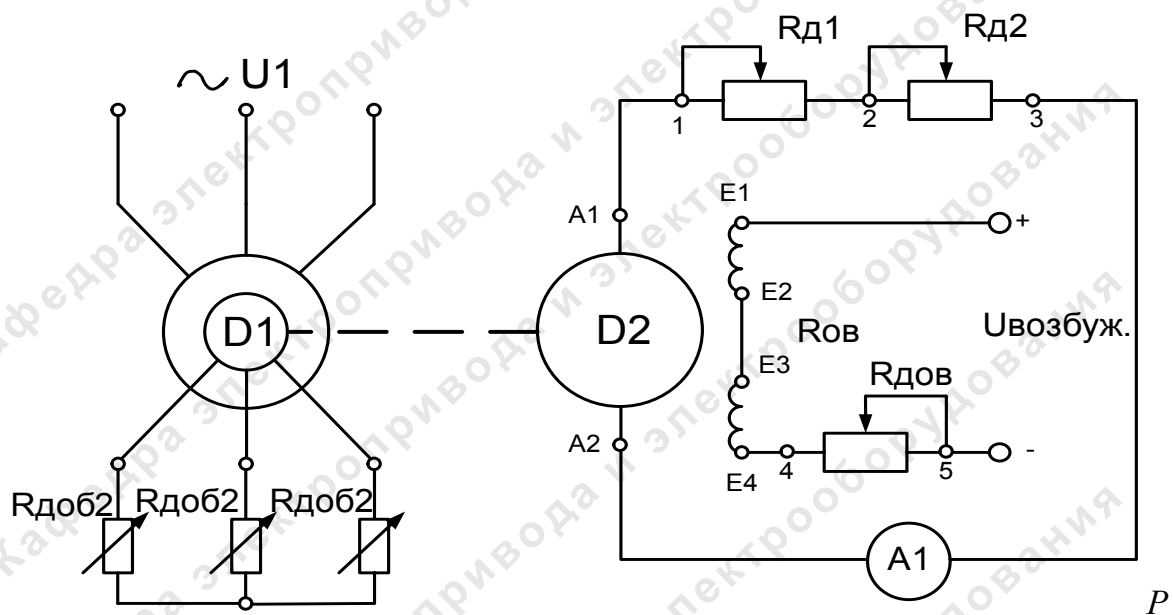
- Подготовить стенд к работе по пункту 2.6.1.
- Нажать кнопку «ВКЛ.» источника питания GB.

- Вращая регулировочную рукоятку источника GB, установить ток якоря двигателя D2 равным 0,7 А.
- При дальнейшей работе использовать рекомендации пунктов 2.6.2. и 2.6.3.
- Организовать переходный процесс торможения, для чего нажать кнопку «ОТКЛ.» выключателя QA.
- Наблюдать изменение координат и параметров электропривода в реальном времени  $\omega = f(t)$ ,  $I = f(t)$  и  $M = f(t)$ . При получении характеристик плохо приемлемых для анализа, повторить опыт с использованием программы «Многоканальный осциллограф».
- Сразу после завершения переходного процесса нажать виртуальную кнопку «Остановить» .
- Запустить из меню «Пуск > Программы > Стандартные» графический редактор «Paint» и поместить в него содержимое буфера обмена (меню «Правка > Вставить» или Shift-Ins (или Ctrl-V). Сохранить полученную информацию на Flash-памяти;
- Отключить источник GA нажатием на кнопку-гриб и последующим поворотом против часовой стрелки ключа выключателя. Отключить выключатели «СЕТЬ» всех используемых в эксперименте блоков.
- Анализировать запомненные временные зависимости координат и параметров электропривода. Результаты анализа занести в таблицу аналогичную таблице 2.2.


### **2.9. Исследование процесса пуска электропривода на реостатной характеристике**

Характеристики  $\omega = f(t)$ ,  $I = f(t)$  и  $M = f(t)$  снимаются при введенных добавочных сопротивлениях блока RC в цепи ротора двигателя D1 (рис.2.8).






ис. 2.8. Схема для снятия реостатных характеристик в двигательном режиме

- Подготовить стенд к работе по пункту 2.6.1.
- Нажать кнопку «ВКЛ.» источника питания GB.
- Вращая регулировочную рукоятку источника GB, установить ток якоря двигателя D2 равным 0,7 А.
- При дальнейшей работе использовать рекомендации пунктов 2.6.2. и 2.6.3.
- Регулировочную рукоятку реостата RC повернуть по часовой стрелки до упора.
- Отключить двигатель D1 путем нажатия кнопки «ОТКЛ.» выключателя QA.
- Организовать переходный процесс пуска, для чего нажать кнопку «ВКЛ.» выключателя QA.
- Наблюдать изменение координат и параметров электропривода в реальном времени  $\omega = f(t)$ ,  $I = f(t)$  и  $M = f(t)$ . При получении характеристик плохо приемлемых для анализа, повторить опыт с использованием программы «Многоканальный осциллограф».
- Сразу после завершения переходного процесса нажать виртуальную кнопку «Остановить» .
- Запустить из меню «Пуск > Программы > Стандартные» графический редактор «Paint» и поместить в него содержимое буфера обмена (меню «Правка > Вставить» или Shift-Ins (или Ctrl-V). Сохранить полученную информацию на Flash-памяти.

- По завершении эксперимента отключить выключатель QA нажатием на кнопку «ОТКЛ.» и источник GA нажатием на кнопку-гриб и последующим поворотом против часовой стрелки ключа выключателя. Отключить выключатели «СЕТЬ» всех используемых в эксперименте блоков.
- Анализировать запомненные временные зависимости координат и параметров электропривода. Результаты анализа занести в таблицу аналогичную таблице 2.2.

### 2.10. Исследование переходного процесса электропривода в режиме сброс-наброс нагрузки

Характеристики  $\omega = f(t)$ ,  $I = f(t)$  и  $M = f(t)$  снимаются при номинальных параметрах двигателя D1 (рис.2.7).

- Подготовить стенд к работе по пункту 2.6.1.
- Нажать кнопку «ВКЛ.» источника питания GB.
- Вращая регулировочную рукоятку источника GB, установить ток якоря двигателя D2 равным 0,7 А.
- При дальнейшей работе использовать рекомендации пунктов 2.6.2. и 2.6.3.
- Организовать переходный процесс сброс-наброс нагрузки двигателя D1. Для чего нажать кнопку «ОТКЛ.» и спустя 5 с – кнопку «ВКЛ.» источника GB.
- Наблюдать изменение координат и параметров электропривода в реальном времени  $\omega = f(t)$ ,  $I = f(t)$  и  $M = f(t)$ . При получении характеристик плохо приемлемых для анализа, повторить опыт с использованием программы «Многоканальный осциллограф».
- Сразу после завершения переходного процесса нажать виртуальную кнопку «Остановить» .
- Запустить из меню «Пуск > Программы > Стандартные» графический редактор «Paint» и поместить в него содержимое буфера обмена (меню «Правка > Вставить» или Shift-Ins (или Ctrl-V). Сохранить полученную информацию на Flash-памяти;
- По завершении эксперимента отключить выключатель QA нажатием на кнопку «ОТКЛ.» и источник GA нажатием на кнопку-гриб и последующим поворотом против часовой стрелки ключа выключателя. Отключить выключатели «СЕТЬ» всех используемых в эксперименте блоков.

- Анализировать запомненные временные зависимости координат и параметров электропривода. Результаты анализа занести в таблицу аналогичную таблице 2.2.

### 2.11. Содержание отчета

1. Цель работы.

2. Принципиальная электрическая схема стенда с краткими пояснениями.

3. Таблицы опытных данных, графики переходных процессов скорости  $\omega=f(t)$  и тока  $I=f(t)$  при пуске, останове, сбросе и набросе нагрузки на соответствующих характеристиках.

4. Краткие выводы.

### 2.12. Контрольные вопросы

2.12.1. Изобразить графики механических переходных процессов  $\omega=f(t)$  и  $I=f(t)$  в системе электропривода:

- при пуске;
- при торможении;
- при пуске под нагрузкой;
- при сбросе-набросе нагрузки.

2.12.2. По какой траектории изменяются значения скорости и тока во время переходного процесса?

2.12.3. Назвать способы определения времени переходного процесса.

2.12.4. Как определить электромеханическую постоянную времени переходного процесса?

### Литература

1. Москаленко В.В. Автоматизированный электропривод: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 416 с.

2. Ильинский Н.Ф., Козаченко В.Ф. Общий курс электропривода: Учеб. для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 544 с.

3. Москаленко В.В. Электрический привод: Учеб. пособие для студ. Учреждений сред. проф. Образования. – М.: Мастерство: Высшая школа, 2000. – 368 с.

4. Электротехника: Учебное пособие для вузов. В 3-х книгах. Книга 3. Электроприводы. Электроснабжение / Под ред. П.А. Бутырина, Р.Х. Гафиятуллина, А.А. Шестакова. – Челябинск: Изд-во Ю УрГУ, 2005. – 639 с.

## Лабораторная работа №3

### ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА СИСТЕМЫ «ТИРИСТОРНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ – ДВИГАТЕЛЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ»

#### 3.1. Цель работы

Исследование характеристик переходных процессов скорости  $\omega = f(t)$ , тока  $I = f(t)$  и момента  $M = f(t)$  при различных динамических режимах тиристорного электропривода постоянного тока.

#### 3.2. Оборудование стенда (состав аппаратуры)

##### 3.2.1. Перечень, назначение и описание функциональных блоков лабораторной установки (рис.3.1)

Трехфазный источник питания.

Предназначен для питания комплекта трехфазным переменным напряжением. Включается вручную. Имеет защиту от перегрузок, устройство защитного отключения, кнопку аварийного отключения и ключ от не-санкционированного включения.

Возбудитель машины переменного тока.

Предназначен для питания обмотки возбуждения синхронной машины. Включается вручную или дистанционно / автоматически (от ПЭВМ). Напряжение возбуждения регулируется вручную или дистанционно / автоматически. Выходные цепи изолированы от входных.

Активная нагрузка.

Предназначена для моделирования однофазных и трехфазных потребителей активной энергии. Регулируется вручную.

Блок мультиметров.

Предназначен для измерения токов, напряжений, омических сопротивлений. Цифровой с жидкокристаллическим дисплеем.

Указатель частоты вращения.

Предназначен для отображения частоты вращения электрических машин в электромашинном агрегате в аналоговой форме.

Преобразователь угловых перемещений.

Предназначен для преобразования скорости вращения электрических машин в сигнал цифрового вида.

Блок датчиков тока и напряжения.

Предназначен для получения нормированных электрических сигналов, пропорциональных напряжениям и токам в контролируемых силовых

цепях постоянного и переменного тока, и гальванически с последними не связанных.

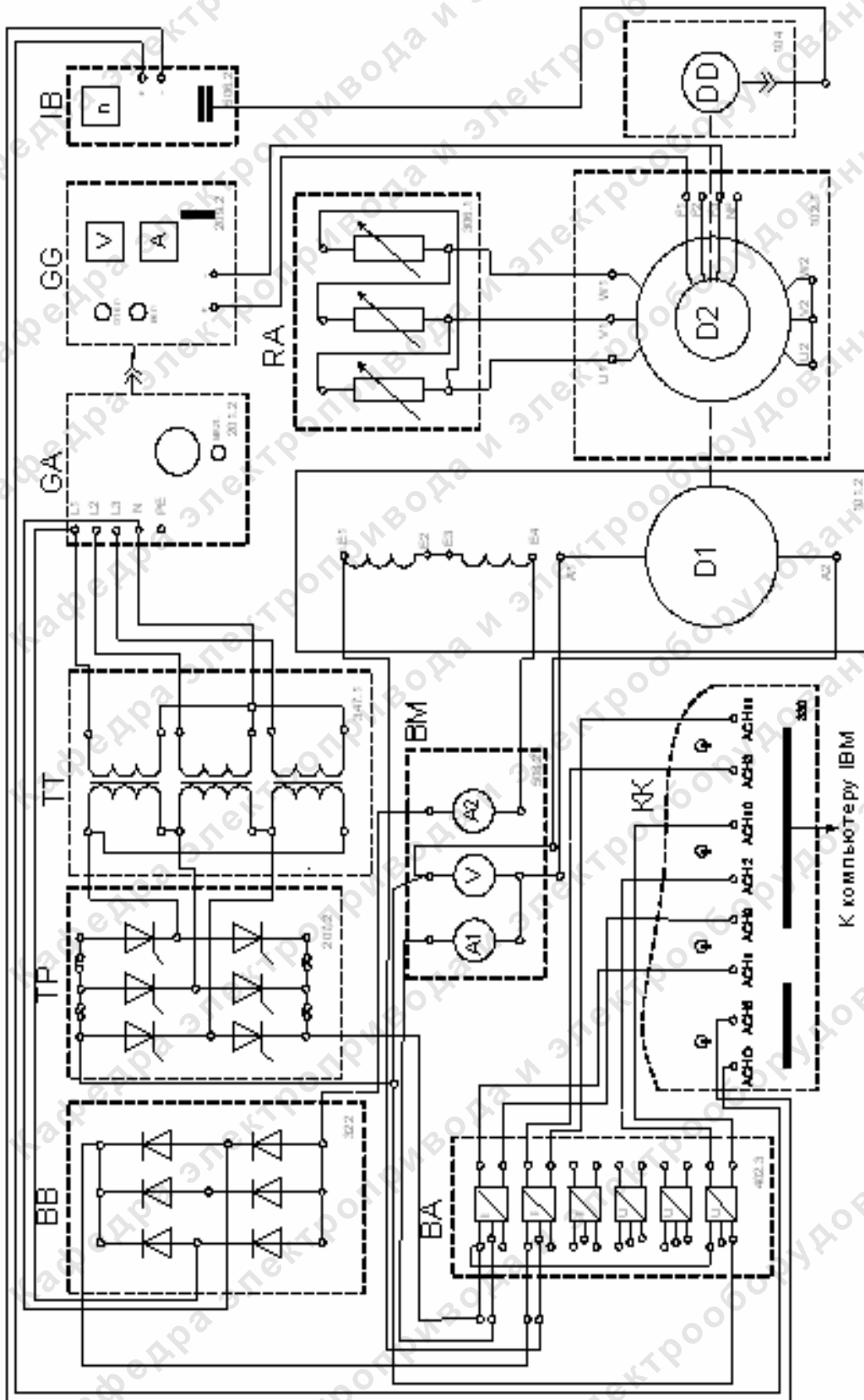


Рис. 3.1. Принципиальная схема системы "ТП-ДПТ"

Трехфазная трансформаторная группа.

Предназначена для преобразования однофазного / трехфазного напряжения.

Тиристорный преобразователь / регулятор.

Предназначен для регулирования частоты вращения двигателя постоянного тока (режим преобразователя) и трехфазного асинхронного двигателя (режим регулятора). Преобразует трехфазное напряжение синусоидального тока в напряжение постоянного тока, а также в трехфазное напряжение переменной величины. Выходное напряжение регулируется вручную или дистанционно / автоматически (от ПЭВМ).

Выпрямитель.

Предназначен для неуправляемого преобразования энергии трехфазного переменного тока в энергию постоянного тока.

Коннектор.

Предназначен для обеспечения удобного доступа к входам / выходам платы сбора данных PCI 6024E персонального компьютера.

Персональный компьютер.

Предназначен для дистанционного / автоматического управления лабораторным комплексом и отображения информации о нем.

Исследуемая машина постоянного тока (двигатель постоянного тока с независимым возбуждением):

$$P_H = 90 \text{ Вт};$$

$$\eta_H = 57,2 \text{ \%};$$

$$U_H = 220 \text{ В};$$

$$\cos \varphi_H = 0,73;$$

$$I_H = 0,56 \text{ А};$$

$$R_{\text{я}} = 86 \text{ Ом};$$

$$n_H = 1500 \text{ об/мин};$$

$$R_{o.в.} = 1,15 \text{ кОм.}$$

$$I_{\text{вн}} = 0,2 \text{ А};$$

Нагрузочная машина переменного тока (асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором):

$$P_H = 30 \text{ Вт};$$

$$\cos \varphi_H = 0,73;$$

$$U_H = 127 \text{ В};$$

$$x_1 = 0,087 \text{ о.е.};$$

$$I_H = 0,35 \text{ А};$$

$$R_1 = 0,18 \text{ о.е.};$$

$$n_H = 1250 \text{ об/мин};$$

$$x_2' = 0,15 \text{ о.е.};$$

$$\eta_H = 36 \text{ \%};$$

$$R_2' = 0,150 \text{ о.е.}$$

Исследуемая и нагрузочная машины жестко соединены между собой и представлены в виде электромашинного агрегата, дополненного маховиком и преобразователем угловых перемещений.

### 3.2.2. Обозначение и параметры исследуемой аппаратуры (таблица 3.1)

Таблица 3.1

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
РА	Активная нагрузка	306.1	3 × 0...50 Вт; 220/380 В
ТТ	Трехфазная трансформаторная группа	347.1	3×80 В·А; 230 /240,230, 220, 133, 127
ТР	Тиристорный преобразователь - регулятор	207.2	3×400 В ~ / 2 А
ВВ	Выпрямитель	322	Трехфазный мост 3х400 В / 2 А
ВА	Блок датчиков тока и напряжения	402.3	3 измерительных преобразователя "ток-напряжение" 5А/0,5А/5 В; 3 измерительных преобразователя "напряжение-напряжение" 1000 В/100 В/3 В
КК	Коннектор	330	8 аналог. дифф. входов; 2 аналог. выхода; 8 цифр. входов/вых.
IBM	Персональный компьютер	550	IBM-совместимый плата сбора информации PCI 6024E

Продолжение таблицы 3.1

GA	Трехфазный источник питания	201.2	400 В $\sim$ ; 16 А
GG	Возбудитель машины переменного тока	209.2	0...40 В $-$ ; 3,5 А
D2	Машина переменного тока	102.1	50 Вт; 230 В $\sim$ ; 1500 мин $^{-1}$
DD	Преобразователь угловых перемещений	104	6 выходных сигналов
D1	Машина постоянного тока	101.1	90 Вт; 220 В 0,76 А (якорь) 220 В (возбуждение)
IV	Указатель частоты вращения	506.2	2000...0...200 0 мин $^{-1}$
BM	Блок мультиметров	508.2	0...1000 В $\approx$ ; 0...20 А $\approx$

### 3.3. Общие сведения

Переходные процессы в системе «Тиристорный преобразователь – двигатель постоянного тока независимого возбуждения» (ТП-ДПТ) в общем случае относятся к классу электромеханических. В этом случае выходное напряжение преобразователя из-за его инерционности или вследствие специального формирования его входного сигнала управления является определенной функцией времени. Основной особенностью этих процессов являются широкие возможности по формированию переходных процессов, т.е. по получению заданных (оптимальных) законов изменения во времени тока, момента, скорости и угла поворота вала ДПТ. Достигается это регулированием в переходных процессах напряжения на якоре двигателя за счет соответствующего изменения ЭДС преобразователя.

Переходные процессы в данной системе при изменении ЭДС  $E_{\Pi}$  преобразователя во времени и не учете электромагнитной инерции якоря ДПТ описывается линейными дифференциальными уравнениями (3.1), (3.2).



$$T_M \frac{d\omega}{dt} + \omega = \omega_{\text{уст}}, \quad (3.1)$$

$$T_M \frac{d\omega}{dt} + \omega = \omega_{\text{уст}}(t), \quad (3.2)$$

где  $\omega_{\text{уст}}(t) = \omega_0(t) - \frac{M_c}{\beta} = \omega_0(t) - \Delta\omega_c$ ;

$$\omega_0(t) = \frac{e_{\text{II}}(t)}{k\Phi}.$$

В отличие от дифференциального уравнения (3.1), описывающего механические переходные процессы, в уравнении (3.2) правая часть есть функция времени, определяемая изменением во времени ЭДС  $e_{\text{II}}(t)$  преобразователя. Отметим, что переходные процессы в системе «ТП-ДПТ» при изменении нагрузки на валу двигателя не рассматриваются.

Основная особенность переходных процессов в этой системе заключается в малой инерционности преобразователя. Это позволяет простыми средствами осуществлять формирование переходных процессов в электроприводе, т.е. обеспечивать требуемый характер изменения во времени скорости, тока и момента ДПТ.

Формирование переходных процессов в системе осуществляется за счет соответствующего регулирования ЭДС  $E_{\text{II}}$  преобразователя. Допустим, что скорость ДПТ в системе «ТП - ДПТ» (рис.3.2) должна изменяться по графику, показанному на рис.3.3 а. В соответствии с этим графиком двигатель в момент времени  $t=0$  запускается, затем в момент  $t_1$  реверсируется, а в момент  $t_2$  тормозится. Для реализации этого графика скорости в момент  $t=0$  скачкообразно подается задающий сигнал по скорости  $U_{3,c}$ , а в момент времени  $t_2$  этот сигнал снимается.

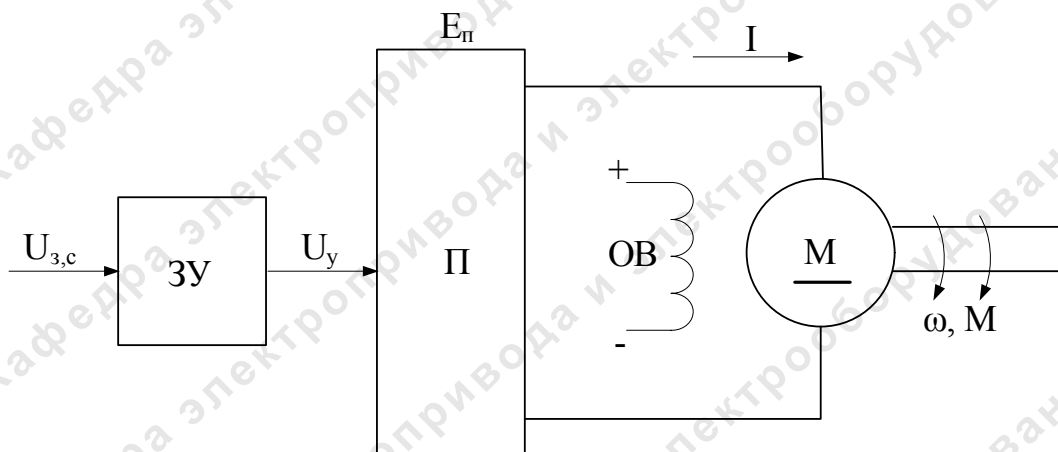


Рис. 3.2. Блок схема системы «ТП - ДПТ»

Если не предпринять специальных мер по формированию заданного графика скорости, то переходные процессы будут существенно отли-

чататься от заданных из-за малой инерционности преобразователя, т.е. будут характеризоваться недопустимо большими бросками тока и момента.

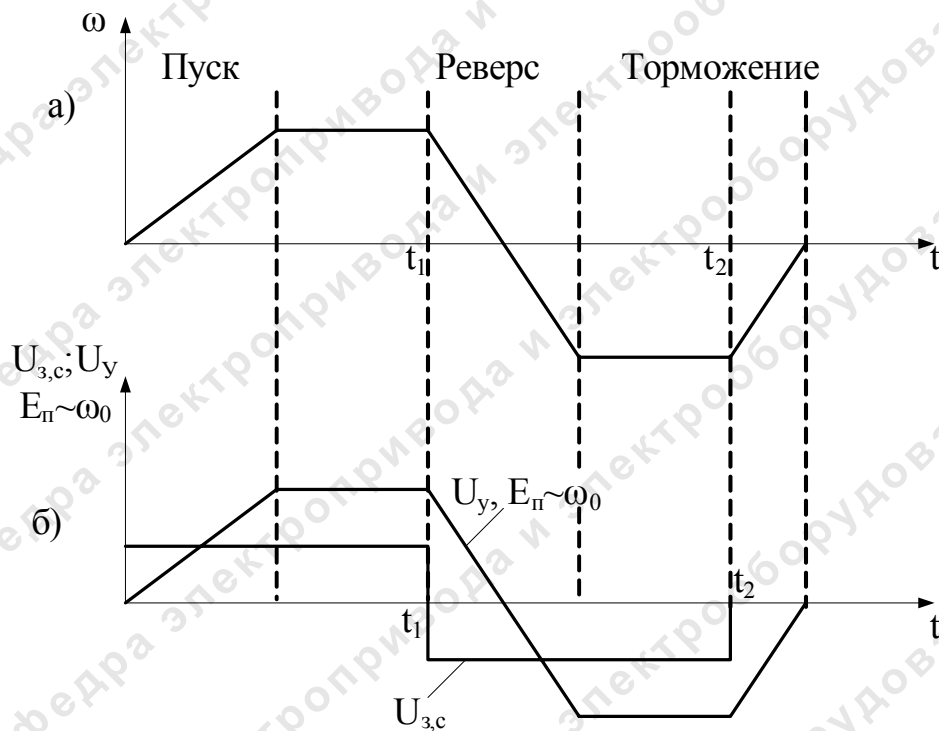


Рис. 3.3. а – график задания скорости;  
 б – изменение сигналов управления  
 и ЭДС преобразователя

Возможности формирования требуемого характера переходных процессов связаны со специфичным для системы «ТП - ДПТ» способом с использованием задающего устройства системы ЗУ (задатчик интенсивности, рис.3.2). Назначение ЗУ состоит в том, чтобы преобразовать ступенчатый сигнал скорости  $U_{3,c}$  в управляющий сигнал  $U_y$  который изменяется по линейному закону во времени. Сигнал  $U_y$  поступая на вход преобразователя П, вызовет пропорциональное изменение его ЭДС (рис.3.3 б) и соответствующее изменение скорости двигателя, показанное на рис.3.3 а.

Рассмотрим типовой переходный процесс при отсутствии нагрузки на валу двигателя.

**Пуск ДПТ.** При пуске ДПТ график изменения во времени сигнала управления  $U_y(t)$ , ЭДС преобразователя  $e_n(t)$  и скорости холостого хода  $\omega_0(t)$  состоит из двух участков. На первом участке эти величины изменяются по линейному закону от нуля до установившегося (номинального) значения, а затем на втором участке пуска они остаются неизменными

ми. Математически для скорости холостого хода это выражается следующим образом:

$$\begin{cases} \omega_0(t) = \varepsilon_{\text{н}} t & \text{при } 0 < t \leq t_{\text{н0}}, \\ \omega_0 = \omega_{0\text{уст}} & \text{при } t > t_{\text{н0}}, \end{cases} \quad (3.3)$$

где  $\omega_{0\text{уст}}$  - скорость холостого хода на верхней характеристике;

$t_{\text{н0}}$  - время нарастания сигнала управления  $U_y$  с производной  $\varepsilon = \varepsilon_{\text{н}}$ .

Зависимость  $\omega_0(t)$  показана на рис.3.4. ломаной линией 1.

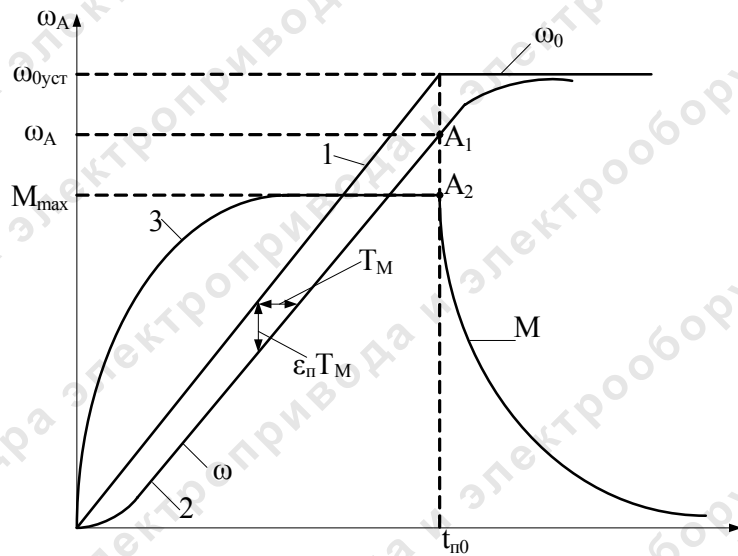


Рис. 3.4. Пуск двигателя вхолостую в системе «ТП-ДПТ» при использовании задатчика интенсивности

При пуске с нулевыми начальными условиями и  $M_c = 0$  ( $\omega_{0\text{нач}} = \omega_{\text{нач}} = \Delta\omega_c = 0$ ) выражение для скорости и момента для первого интервала времени  $0 < t \leq t_{\text{н0}}$  приобретают вид:

$$\omega = \varepsilon_{\text{н}} t - \varepsilon_{\text{н}} T_M \left(1 - e^{-\frac{t}{T_M}}\right) \quad (3.4)$$

$$M = J \varepsilon_{\text{н}} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_M}}\right) \quad (3.5)$$

Зависимость  $\omega(t)$  и  $M(t)$ , соответствующие этим выражениям, изображены кривыми 2 и 3 на рис.3.4. При  $t > 3T_M$  момент ДПТ становится практически постоянным, а скорость изменяется по линейному закону. Действительно, при этом  $e^{-t/T_M} \approx 0$  и выражения (3.4) и (3.5) приобретают вид:

$$\omega = \varepsilon_{\text{н}} t - \varepsilon_{\text{н}} T_M = \omega_0 - \varepsilon_{\text{н}} T_{\text{н}} \quad (3.6)$$

$$M = J \varepsilon_{\text{н}} = M_{\text{max}} \quad (3.7)$$

Из уравнений (3.3) и (3.6) следует, что при  $t < t_{\text{н0}}$  скорость ДПТ меньше скорости холостого хода на  $\omega_0 - \omega = \varepsilon_{\text{н}} T_M$ , а отставание по време-

ни равно механической постоянной времени  $T_M$ . Отметим, что кривая момента  $M(t)$  в другом масштабе отражает кривую тока  $i(t)$ .

**Торможение ДПТ.** Торможение осуществляется за счет уменьшения ЭДС преобразователя и тем самым скорости идеального холостого хода на интервале времени  $0 < t \leq t_{T0}$  по линейному закону:

$$\omega_0(t) = \omega_{0уст} - \varepsilon_T t, \quad (3.8)$$

что соответствует линии 1 на рис.3.5.

Учитывая, что при торможении вхолостую  $\Delta\omega_c=0$ ,  $\omega_{0нач}=\omega_{нач}=\omega_{0уст}$ , из  $\omega = \varepsilon t + (\omega_{0нач} - \Delta\omega_c - T_M\varepsilon)(1 - e^{-t/T_M}) + \omega_{нач}e^{-t/T_M}$  и

$M = M_c + J\varepsilon + \frac{J(\omega_{0нач} - \omega_{нач} - T_M\varepsilon - \Delta\omega_c)}{T_M} e^{-t/T_M}$  получаем при замене  $\varepsilon = \varepsilon_T$  следующие выражения:

$$\omega = \omega_{0уст} - \varepsilon_T t + \varepsilon_T T_M (1 - e^{-t/T_M}); \quad (3.9)$$

$$M = -J\varepsilon_T (1 - e^{-t/T_M}), \quad (3.10)$$

которым соответствуют кривые 2 и 3 на рис.3.5. Отметим, что и в этом случае при  $t > 3T_M$  сохраняются отмеченные выше интервалы  $T_M$  между кривыми  $\omega_0(t)$  и  $\omega(t)$  по горизонтали и  $\varepsilon_T T_M$  по вертикали. Второй этап переходного процесса соответствует динамическому торможению ДПТ в то время как на первом этапе при  $0 < t \leq t_{T0}$  имеет место рекуперативное торможение. Изменение скорости и момента на втором этапе соответствует механическому переходному процессу.

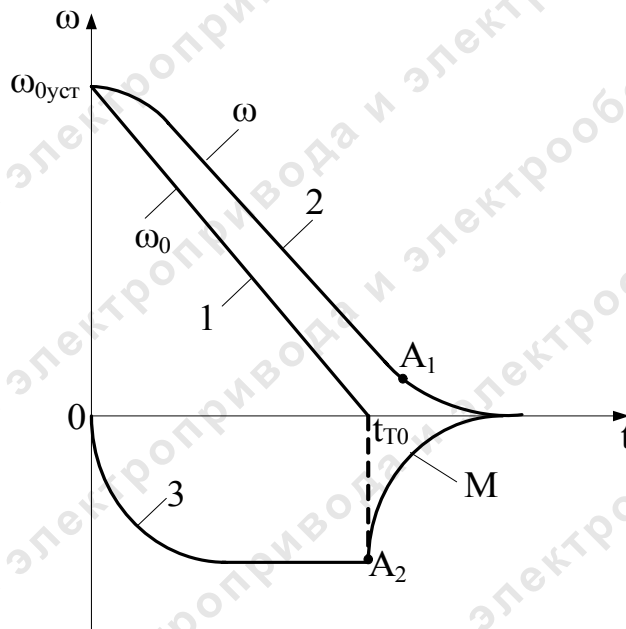


Рис. 3.5. Торможение двигателя вхолостую в системе «ТП-ДПТ» при использовании задатчика интенсивности

### 3.4. Принципиальная электрическая схема стенда

Принципиальная электрическая схема приведена на рис. 3.1.

Источник GA - источник синусоидального напряжения промышленной частоты.

Тиристорный преобразователь/регулятор TP питает регулируемым напряжением обмотки машины (двигателя) постоянного тока D1, работающей с независимым возбуждением. При этом половины обмотки возбуждения двигателя D1 следует соединить последовательно.

Трехфазная трансформаторная группа ТТ преобразует напряжение источника GA в пониженное напряжение, подаваемое на тиристорный преобразователь/регулятор TP.

Блок ВВ выпрямляет однофазное сетевое напряжение для питания обмотки возбуждения двигателя D1.

Преобразователь угловых перемещений DD генерирует импульсы, поступающие на вход указателя частоты вращения IB электромашинного агрегата.

Машина переменного тока D2, работающая в режиме генератора и обеспечивающая нагрузку на валу исследуемого двигателя, нагружена на активную нагрузку RA. Возбудитель GG питает обмотку возбуждения машины D2 регулируемым напряжением.

С помощью блока мультиметров BM контролируются ток и напряжение якоря, а также ток возбуждения двигателя D1.

Датчики тока и напряжения блока ВА гальванически изолируют от силовой электрической цепи и нормирует сигналы о токе и напряжении якоря и токе возбуждения исследуемого двигателя D1.

Коннектор КК выполняет функцию связующего звена между компьютером IBM и блоком датчиков тока и напряжения ВА.

Компьютер IBM используется в режиме информационно-измерительной системы.

### 3.5. Программа экспериментов

Порядок экспериментального исследования системы электропривода:

- проверка работоспособности стенда;
- зарисовать переходные процессы скорости  $\omega=f(t)$ , тока  $I=f(t)$  и момента  $M=f(t)$  при пуске на основной характеристике;
- зарисовать переходные процессы скорости  $\omega=f(t)$ , тока  $I=f(t)$  и момента  $M=f(t)$  при останове двигателя с основной характеристики;


- зарисовать переходные процессы скорости  $\omega=f(t)$ , тока  $I=f(t)$  и момента  $M=f(t)$  при пуске на характеристике с пониженным напряжением;
- зарисовать переходные процессы скорости  $\omega=f(t)$ , тока  $I=f(t)$  и момента  $M=f(t)$  при сбросе и набросе нагрузки.

### 3.6. Подготовка стенда к эксперименту

#### 3.6.1. Проверка работоспособности стенда (рис. 3.1.)

Для этого необходимо проделать следующие:

- Убедиться, что устройства, используемые в экспериментах, отключены от сети электропитания.
- Собрать электрическую схему соединений тепловой защиты машины переменного тока (часть 1, стр. 8, рис.1).
- Соединить гнезда защитного заземления "⊕" устройств, используемых в эксперименте, с гнездом «РЕ» источника ГА.
- Подключить аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений (рис. 3.1).
- Переключатель режима работы возбудителя GG установить в положение «РУЧН.».
- Регулировочные рукоятки возбудителя GG и тиристорного преобразователя ТР повернуть против часовой стрелки до упора.
- Перевести регулировочные рукоятки активной нагрузки RA в крайнее по часовой стрелке положение.
- Установить переключателями в блоке ТТ номинальное вторичное фазное напряжение трансформаторов 133 В.
- Включить выключатели «СЕТЬ» блока мультиметров ВМ, указателя частоты вращения IB и блока датчиков тока и напряжения ВА.
- Включить выключатель «СЕТЬ» тиристорного преобразователя - регулятора ТР.
- Включить источник ГА. О наличии напряжений фаз на его выходе должны сигнализировать светящиеся светодиоды.
- Установить мультиметры на соответствующие пределы измерений токов и напряжений.
- Нажать кнопку «3Ф ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ» на лицевой панели преобразователя ТР и удерживать ее до тех пор, пока не загорится расположенный рядом с ней светодиод.
- Вращая регулировочную рукоятку тиристорного преобразователя ТР, разогнать двигатель D1 до скорости равной  $1500 \text{ мин}^{-1}$ .

- Привести в рабочее состояние персональный компьютер IBM. Запустите программу «Регистратор режимных параметров машины постоянного тока» или, если необходимо, «Многоканальный осциллограф».
- Нажать на виртуальную кнопку «Запустить» .

### 3.6.2. Рекомендации по использованию программы «Многоканальный осциллограф» (рис.3.6)

Программа «Многоканальный осциллограф» является виртуальным аналогом реальных приборов и обладает широкими функциональными возможностями. Программа предназначена для регистрации и отображения различных аналоговых сигналов в удобной для пользователя форме. Виртуальная схема многоканального осциллографа приведена на рис.3.6.

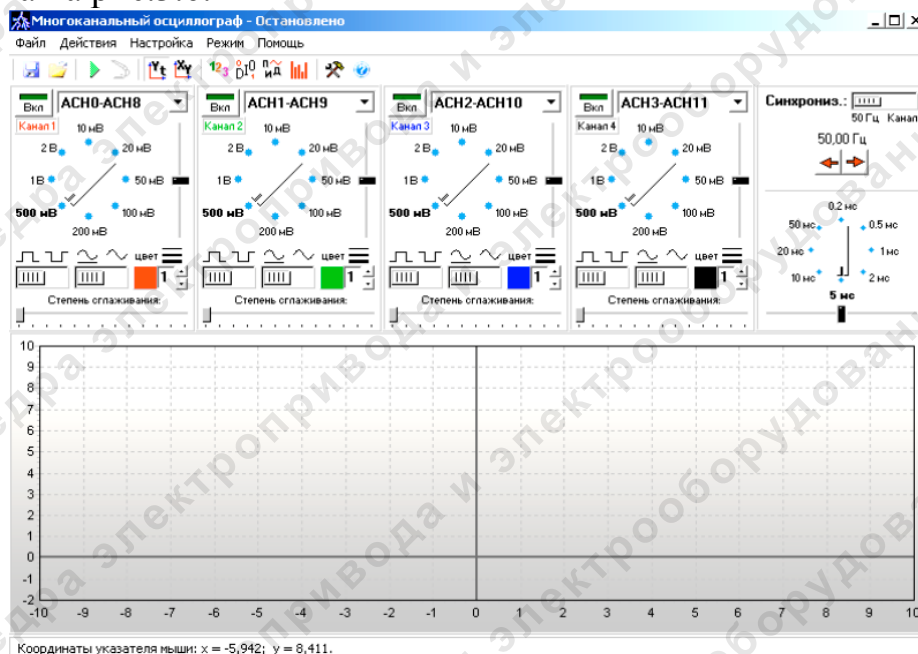


Рис. 3.6. Многоканальный осциллограф


Ниже перечислены возможности интерфейса программы, а также некоторые замечания по этому поводу.

- Включить компьютер IBM > пуск > программы > многоканальный осциллограф.
- Двойным щелчком мыши можно устанавливать в нуль регуляторы смещения картинки по горизонтали и по вертикали.
- Щелчок мыши на осях графика вызывает окно настройки соответствующей оси.

- В этом окне, помимо всего прочего, можно включить или отключить отображение нулевых линий.
- Масштабирование осциллограмм производится путем нажатия на графике левой клавиши мыши и, не отпуская ее, перемещения манипулятора слева направо и сверху вниз. Возврат к начальному масштабу осуществляется обратным перемещением манипулятора – справа налево и снизу вверх.
- Двигать график осциллограмм относительно осей координат можно путем нажатия и удержания на нем правой кнопки мыши и ее одновременного перемещения в нужную сторону.
- Для удобства определения значений величин на экране отображаются текущие координаты указателя мыши.
- Регулятор уровня синхронизации проградуирован *в единицах графика*.
- Делители напряжения каналов и временной делитель проградуированы по отношению *к одной единице* графика (например, положение 500 мВ означает, что одна единица (не клетка!) графика соответствует 500 мВ).
- Параметры сканирования по умолчанию можно установить, выбрав соответствующий пункт меню «Настройка».
- Аналогичным образом можно зарегистрировать расширение «\*.osc».
- Таким же образом можно вернуть все органы управления в исходное положение.
- Цвет того или иного графика можно выбрать, щелкнув «мышкой» по соответствующей кнопке выбора цвета.
- Отображение интегральных (средних, действующих, средневыпрямленных, максимальных, минимальных, амплитудных) значений сигналов можно включить, нажав на соответствующую кнопку.
- В режиме запоминания осциллограммы можно сглаживать, причем существуют два режима сглаживания - обычное, предназначенное для сглаживания случайных помех, и сильное (x10), предназначенное для сглаживания частот, сравнимых с 50 Гц. Следует понимать, что *любое сглаживание в общем случае искажает форму снятых зависимостей*.  
В режиме запоминания можно также менять порядок отображения графиков (т.е. вывести какую-либо кривую поверх остальных).




### 3.6.3. Рекомендации по использованию программы «Регистратор режимных параметров машины постоянного тока»

- Для определения координат точек на графиках использовать отображаемые на экране текущие координаты указателя мыши.
- Масштабирование производить путем нажатия на графике левой клавиши мыши и, не отпуская ее, перемещения манипулятора слева направо и сверху вниз. Возврат к начальному масштабу осуществлять обратным перемещением манипулятора – справа налево и снизу вверх.
- Графики относительно осей координат двигать путем нажатия и удержания на соответствующем объекте правой кнопки мыши и ее одновременного перемещения в нужную сторону.
- Очищать область построения динамической характеристики нажатием на соответствующую виртуальную кнопку  или клавишу «Пробел».

### 3.7. Исследование процессов пуска системы «ТП-ДПТ» на основной характеристике

Характеристики  $\omega = f(t)$ ,  $I = f(t)$  и  $M = f(t)$  снимаются при номинальных параметрах системы «ТП-ДПТ».

- Подготовить стенд к работе по пункту 3.6.1.
- Вращая регулировочную рукоятку возбуждателя GG, установите ток якоря двигателя D1 равным 0,5 А.
- Отключить двигатель D1 нажатием на кнопку «ОТКЛ.» источника питания GA.
- При дальнейшей работе использовать рекомендации пункта 3.6.2 и 3.6.3.
- Организовать переходный процесс пуска, для чего нажать кнопку «ВКЛ.» источника питания GA.
- Наблюдать изменение координат и параметров электропривода в реальном времени  $\omega = f(t)$ ,  $I = f(t)$  и  $M = f(t)$ . При получении характеристик плохо приемлемых для анализа, повторить опыт с использованием программы «Многоканальный осциллограф».
- Сразу после завершения переходного процесса нажать виртуальную кнопку «Остановить» .
- Запустить из меню «Пуск > Программы > Стандартные» графический редактор «Paint» и поместить в него содержимое буфера обмена (меню «Правка > Вставить» или Shift-Ins (или Ctrl-V)). Сохранить полученную информацию на Flash-памяти.

- По завершении экспериментов сначала у возбудителя GG, а затем у преобразователя TP повернуть регулировочные рукоятки против часовой стрелки до упора, нажать кнопку «ОТКЛ.» возбудителя GG. Отключить источник GA нажатием на кнопку-гриб и последующим поворотом против часовой стрелки ключа выключателя. Отключить выключатели «СЕТЬ» всех используемых в эксперименте блоков.
- Анализировать запомненные временные зависимости координат и параметров электропривода. Результаты анализа занести в таблицу 3.2.

Таблица 3.2

№п. п.	Параметр переходного процесса								Название переходного процесса (пуск, торможение и т.д.)
	$t_{пп}$ , мс	$\omega_{уст}$ , с <sup>-1</sup>	$\omega_{нач}$ , с <sup>-1</sup>	$I_{нач}$ , мА	$I_{уст}$ , мА	$\delta I_{уст}$ , %	$\delta I_{макс}$ , %	$I_{макс}$ , мА	
1									
2									
3									
4									
5									
6									

### 3.8. Исследование процесса пуска системы «ТП-ДПТ» при пониженном напряжении $U_1$ источника питания

Характеристики  $\omega = f(t)$ ,  $I = f(t)$  и  $M = f(t)$  снимают при различных напряжениях питания  $U_1$  двигателя D1, устанавливаемых вращением виртуальной регулировочной рукоятки задания скорости.

- Подготовить стенд к работе по пункту 3.6.1.
- Вращая регулировочную рукоятку преобразователя, установить угол управления  $\alpha = 150^\circ$ . Электродвигатель D1 должен разогнаться.
- Вращая регулировочную рукоятку возбудителя GG, установить ток якоря двигателя D1 равным 0,5 А.
- Отключить двигатель D1 нажатием на кнопку «ОТКЛ.» источника питания GA.


- При дальнейшей работе использовать рекомендации пункта 3.6.2. и 3.6.3.
- Организовать переходный процесс пуска, для чего нажать кнопку «ВКЛ.» источника питания GA.
- Наблюдать изменение координат и параметров электропривода в реальном времени  $\omega = f(t)$ ,  $I = f(t)$  и  $M = f(t)$ . При получении характеристик плохо приемлемых для анализа, повторить опыт с использованием программы «Многоканальный осциллограф».
- Сразу после завершения переходного процесса нажать виртуальную кнопку «Остановить» **||**.
- Запустить из меню «Пуск > Программы > Стандартные» графический редактор «Paint» и поместить в него содержимое буфера обмена (меню «Правка > Вставить» или Shift-Ins (или Ctrl-V). Сохранить полученную информацию на Flash-памяти.
- По завершении экспериментов сначала у возбуждателя GG, а затем у преобразователя TP повернуть регулировочные рукоятки против часовой стрелки до упора, нажать кнопку «ОТКЛ.» возбуждателя GG. Отключить источник GA нажатием на кнопку-гриб и последующим поворотом против часовой стрелки ключа выключателя. Отключить выключатели «СЕТЬ» всех используемых в эксперименте блоков.
- Анализировать запомненные временные зависимости координат и параметров электропривода. Результаты анализа занести в таблицу, аналогичную таблице 3.2.
- Прodelать опыт с меньшим значением угла управления  $\alpha$  (по заданию преподавателя).

### **3.9. Исследование процесса останова системы «ТП-ДПТ» с основной характеристики**

Характеристики  $\omega = f(t)$ ,  $I = f(t)$  и  $M = f(t)$  снимаются при номинальных параметрах системы «ТП-ДПТ».


- Подготовить стенд к работе по пункту 3.6.1.
- Вращая регулировочную рукоятку возбуждателя GG, установить ток якоря двигателя D1 равным 0,5 А.
- При дальнейшей работе использовать рекомендации пунктов 3.6.2. и 3.6.3.
- Организовать переходный процесс останова, для чего нажать кнопку «ОТКЛ.» источника питания GA.
- Наблюдать изменение координат и параметров электропривода в реальном времени  $\omega = f(t)$ ,  $I = f(t)$  и  $M = f(t)$ . При получении ха-

ра характеристик плохо приемлемых для анализа, повторить опыт с использованием программы «Многоканальный осциллограф».

- Сразу после завершения переходного процесса нажать виртуальную кнопку «Остановить» .
- Запустить из меню «Пуск > Программы > Стандартные» графический редактор «Paint» и поместить в него содержимое буфера обмена (меню «Правка > Вставить» или Shift-Ins (или Ctrl-V)). Сохранить полученную информацию на Flash-памяти.
- По завершении экспериментов сначала у возбуждателя GG, а затем у преобразователя TP повернуть регулировочные рукоятки против часовой стрелки до упора, нажать кнопку «ОТКЛ.» возбуждателя GG. Отключить источник GA нажатием на кнопку-гриб и последующим поворотом против часовой стрелки ключа выключателя. Отключить выключатели «СЕТЬ» всех используемых в эксперименте блоков.
- Анализировать запомненные временные зависимости координат и параметров электропривода. Результаты анализа занести в таблицу аналогичную таблице 3.2.

### **3.10. Исследование переходного процесса системы «ТП-ДПТ» в режиме сброс-наброс нагрузки**

Характеристики  $\omega = f(t)$ ,  $I = f(t)$  и  $M = f(t)$  снимаются при номинальных параметрах системы «ТП-ДПТ».

- Подготовить стенд к работе по пункту 3.6.1.
- Вращая регулировочную рукоятку возбуждателя GG, установить ток якоря двигателя D1 равным 0,5 А.
- Организовать переходный процесс сброс-наброс нагрузки двигателя D1. Для чего нажать кнопку «ОТКЛ.» и спустя 5 с – кнопку «ВКЛ.» возбуждателя GG.
- Наблюдать изменение координат и параметров электропривода в реальном времени  $\omega = f(t)$ ,  $I = f(t)$  и  $M = f(t)$ . При получении характеристик плохо приемлемых для анализа, повторить опыт с использованием программы «Многоканальный осциллограф».
- Сразу после завершения переходного процесса нажать виртуальную кнопку «Остановить» .
- Запустить из меню «Пуск > Программы > Стандартные» графический редактор «Paint» и поместить в него содержимое буфера обмена (меню «Правка > Вставить» или Shift-Ins (или Ctrl-V)). Сохранить полученную информацию на Flash-памяти.

- По завершении экспериментов сначала у возбуждателя GG, а затем у преобразователя TP повернуть регулировочные рукоятки против часовой стрелки до упора, нажать кнопку «ОТКЛ.» возбуждателя GG. Отключить источник GA нажатием на кнопку-гриб и последующим поворотом против часовой стрелки ключа выключателя. Отключить выключатели «СЕТЬ» всех используемых в эксперименте блоков.
- Анализировать запомненные временные зависимости координат и параметров электропривода. Результаты анализа занести в таблицу, аналогичную таблице 3.2.

### 3.11. Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Принципиальная электрическая схема стенда с краткими пояснениями.
3. Графики переходных процессов скорости  $\omega=f(t)$  и тока  $I=f(t)$  при пуске, останове и сбросе и набросе нагрузки на соответствующих характеристиках.
4. Краткие выводы.

### 3.12. Контрольные вопросы

3.12.1. Изобразить графики переходных процессов  $\omega=f(t)$  и  $I=f(t)$  в системе электропривода:

- при пуске;
- при торможении (останове);
- при сбросе и набросе нагрузки.

3.12.2. Назвать причину отсутствия перерегулирования на графике переходного процесса по скорости.

3.12.3. По какой траектории изменяются значения скорости и тока во время переходного процесса?

3.12.4. Назвать способы определения времени переходного процесса.

3.12.5. Как определить электромеханическую постоянную времени переходного процесса?

3.12.6. От каких параметров зависит постоянная времени тиристорного электропривода постоянного тока?

### Литература

1. Москаленко В.В. Автоматизированный электропривод: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. –416 с.

2. Ильинский Н.Ф., Козаченко В.Ф. Общий курс электропривода: Учеб. для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 544 с.
3. Москаленко В.В. Электрический привод: Учеб. пособие для студ. Учреждений сред. проф. Образования. – М.: Мастерство: Высшая школа, 2000. – 368 с.
4. Электротехника: Учебное пособие для вузов. В 3-х книгах. Книга 3. Электроприводы. Электроснабжение / Под ред. П.А. Бутырина, Р.Х. Гафиятуллина, А.А. Шестакова. – Челябинск: Изд-во Ю УрГУ, 2005. – 639 с.

## Лабораторная работа №4

### СТАТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И РЕЖИМЫ РАБОТЫ ЗАМКНУТОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

#### 4.1. Цель работы

Исследования электромеханических  $\omega = f(I)$  и механических  $\omega = f(M)$  характеристик и характеристик динамических режимов работы  $\omega = f(t)$ ,  $M = f(t)$  замкнутого электропривода на основе ДПТ с независимым возбуждением.

#### 4.2. Оборудование стенда (состав аппаратуры)

##### 4.2.1. Перечень, назначение и описание функциональных блоков лабораторной установки (рис. 4.1)

Трехфазный источник питания.

Предназначен для питания комплекта трехфазным переменным напряжением. Включается вручную. Имеет защиту от перегрузок, устройство защитного отключения, кнопку аварийного отключения и ключ от несанкционированного включения.

Источник питания двигателя постоянного тока.

Предназначен для питания обмоток якоря и возбуждения постоянным током. Включается вручную или дистанционно / автоматически (от ПЭВМ). Якорное напряжение регулируется вручную или дистанционно. Напряжение возбуждения нерегулируемое.

Возбудитель машины переменного тока.

Предназначен для питания обмотки возбуждения синхронной машины. Включается вручную или дистанционно / автоматически (от ПЭВМ). Напряжение возбуждения регулируется вручную или дистанционно / автоматически. Выходные цепи изолированы от входных.

Терминал.

Предназначен для обеспечения удобного доступа к входам / выходам управления функциональных блоков.

Активная нагрузка.

Предназначена для моделирования однофазных и трехфазных потребителей активной энергии. Регулируется вручную.

Коннектор.

Предназначен для обеспечения удобного доступа к входам / выходам платы сбора данных PCI 6024E персонального компьютера.

Блок ввода /вывода цифровых сигналов.



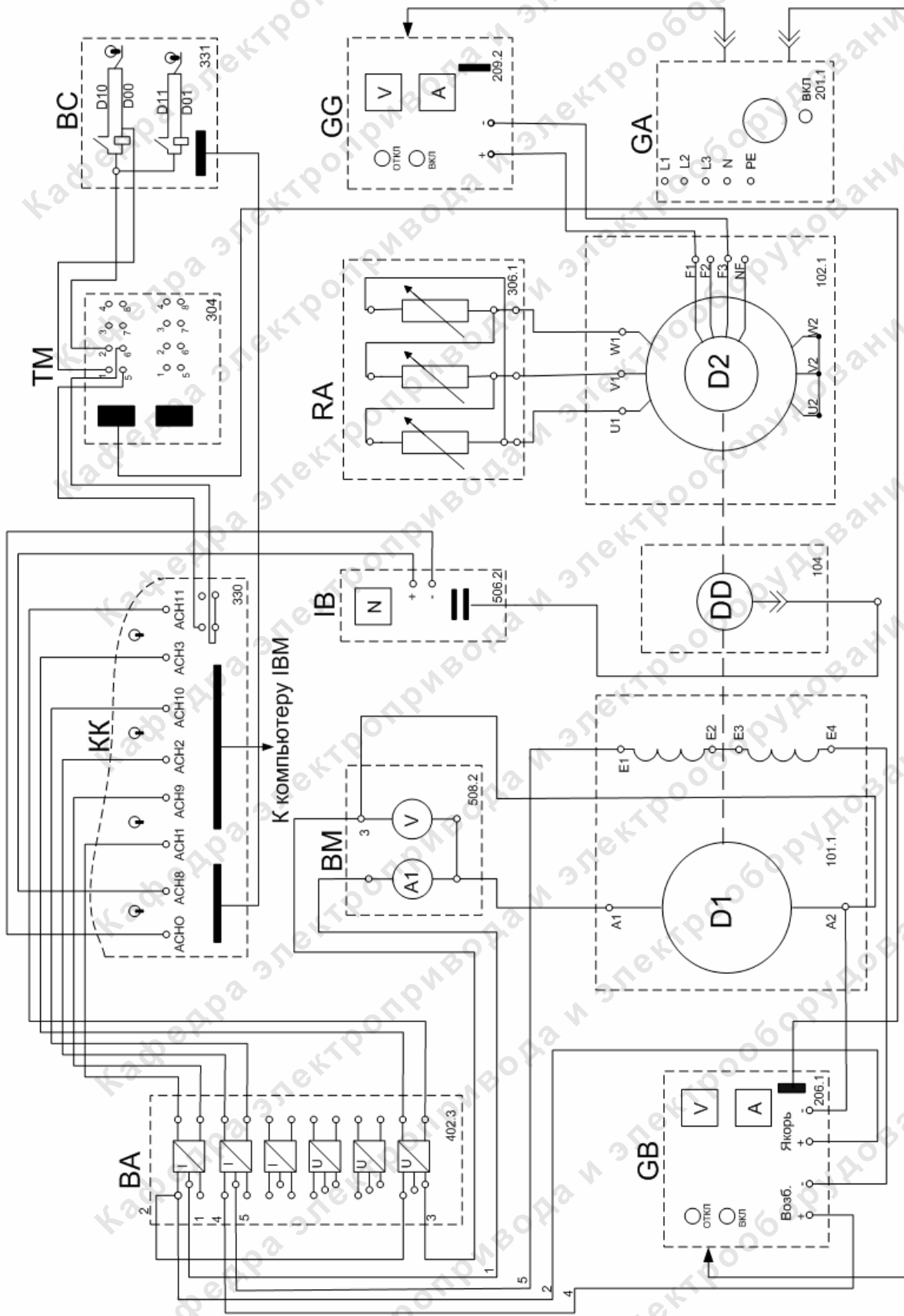


Рис. 4.1. Принципиальная электрическая схема замкнутого электропривода



Предназначен для ввода сигналов типа «сухой контакт» и вывода сигналов через контакты промежуточного реле

Блок датчиков тока и напряжения.

Предназначен для получения нормированных электрических сигналов, пропорциональных напряжениям и токам в контролируемых силовых цепях постоянного и переменного тока, и гальванически с последними не связанных.

Персональный компьютер.

Предназначен для дистанционного / автоматического управления лабораторным комплексом и отображения информации о нем.

Блок мультиметров.

Предназначен для измерения токов, напряжений, омических сопротивлений. Цифровой с жидкокристаллическим дисплеем.

Указатель частоты вращения.

Предназначен для отображения частоты вращения электрических машин в электромашинном агрегате в аналоговой форме.

Преобразователь угловых перемещений.

Предназначен для преобразования скорости вращения электрических машин в сигнал цифрового вида.

Исследуемая машина постоянного тока (двигатель постоянного тока с независимым возбуждением):

$$P_H = 90 \text{ Вт};$$

$$\eta_H = 57,2 \%;$$

$$U_H = 220 \text{ В};$$

$$\cos \varphi_H = 0,73;$$

$$I_H = 0,56 \text{ А};$$

$$R_{\text{я}} = 86 \text{ Ом};$$

$$n_H = 1500 \text{ об/мин};$$

$$R_{\text{о.в.}} = 1,15 \text{ кОм.}$$

$$I_{\text{вн}} = 0,2 \text{ А};$$

Нагрузочная машина переменного тока (асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором):

$$P_H = 30 \text{ Вт};$$

$$\cos \varphi_H = 0,73;$$

$$U_H = 127 \text{ В};$$

$$x_1 = 0,087 \text{ о.е.};$$

$$I_H = 0,35 \text{ А};$$

$$R_1 = 0,18 \text{ о.е.};$$

$$n_H = 1250 \text{ об/мин};$$

$$x_2 = 0,15 \text{ о.е.};$$

$$\eta_H = 36 \%;$$

$$R_2 = 0,150 \text{ о.е.}$$

Исследуемая и нагрузочная машины жестко соединены между собой и представлены в виде электромашинного агрегата, дополненного маховиком и преобразователем угловых перемещений.

**4.2.2. Обозначение и параметры исследуемой аппаратуры  
(таблица 4.1)**

Таблица 4.1

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
GA	Трехфазный источник питания.	201.2	~400 В; 16 А
GB	Источник питания двигателя постоянного тока.	206.1	-0...250 В; 3 А(якорь) -200 В; 1 А (возбуждение)
GG	Возбудитель машины переменного тока	209.2	-0...40 В; 3,5 А
BM	Блок мультиметров	508.2	3 мультиметра ≈0...1000 В; ≈0...10 А; 0...20 МОм
IB	Указатель частоты вращения	506.3	2000...0...2000 мин <sup>-1</sup>
IBM	Персональный компьютер	550	IBM совместимый, плата сбора данных PCI 6024E
DD	Преобразователь угловых перемещений	104	6 выходных сигналов
TM	Терминал	304	6 розеток с 8 контактами; 6×8 гнезд
KK	Коннектор	330	8 аналог. диф. входов; 2 аналог. выхода; 8 цифр. входов/выходов
BC	Блок ввода /вывода цифровых сигналов	331	8 входов типа «сухой контакт»; 8 релейных входов

Продолжение таблицы 4.1

ВА	Блок датчиков тока и напряжения	402.1	3 измерительных преобразователя «ток – напряжение» (5 А/1 А)/5 В; 3 измерительных преобразователя «напряжение – напряжение» (1000 В/100 В)/5 В
D1	Машина постоянного тока	101.1	90 Вт; -220 В; 0,76 А (якорь); -220 В (возбуждение)
D2	Машина переменного тока	102.1	50 Вт; ~230 В; 1500 мин <sup>-1</sup>

#### 4.3. Режимы работы, статические характеристики и графики переходных процессов двигателя постоянного тока независимого возбуждения в замкнутом электроприводе

Замкнутые структуры электропривода, как правило, строятся по принципу отклонения (обратной связи), рис. 4.2.

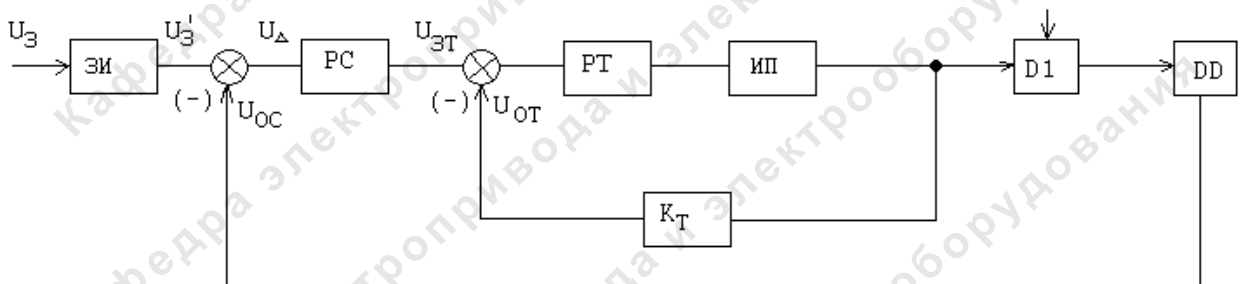


Рис.4.2. Структурная схема замкнутого электропривода ДПТ с НВ, где ЗИ – задатчик интенсивности; РС и РТ – регуляторы скорости и тока; ИП – преобразователь; D1 – ДПТ с НВ; DD – датчик скорости; К<sub>Т</sub> – коэффициент передачи обратной связи по току

Применительно к рассматриваемой схеме лабораторной установки регулирования скорости одним из признаков этой структуры является цепь обратной связи, по которой информация о текущем значении скорости (сигнал обратной связи  $U_{oc}$ ) подается на вход электропривода, где он вычитается из сигнала задания скорости  $U_3$ . Управление двигателем D1 осуществляется сигналом отклонения  $U_{\Delta} = U_3 - U_{oc}$  (его также называют сигналом рассогласования или ошибки). Этот сигнал при отклонении скорости от заданного уровня автоматически изменяется необходимым образом и устраняет с помощью системы управления эти отклонения. Происходит стабилизация скорости вращения при воздействии различных возмущений.

Для управления движением рабочего (исполнительного) органа иногда требуется регулировать несколько координат электропривода, например тока (момента) и скорости. В этом случае замкнутые электроприводы выполняются по схеме с подчиненным регулированием координат (рис.4.2). В ней регулирование каждой координаты осуществляется своими регуляторами тока РТ, скорости РС, которые вместе с соответствующими обратными связями образуют замкнутые контуры. Выходным, задающим сигналом для контура тока является выходной сигнал внешнего по отношению к нему контура скорости, то есть внутренний контур тока подчинен внешнему контуру скорости – основной в лабораторной работе выходной координате электропривода.

Не сложные преобразования позволяют получить выражения для электромеханических и механических характеристик ДПТ с НВ в замкнутой системе:

$$\omega = \frac{K_{PP} \cdot U_{3C}}{c \cdot (1+k)} - \frac{I \cdot R_{яц}}{c \cdot (1+k)} = \omega_0 - \Delta\omega_3;$$

$$\omega = \frac{K_{PP} \cdot U_{3C}}{c \cdot (1+k)} - \frac{M \cdot R_{яц}}{c \cdot (1+k)} = \omega_0 - \Delta\omega_3,$$

где:  $c$  – коэффициент связи двигателя;

$K_{PP}$  – коэффициент усиления прямой ветви;

$k$  – общий коэффициент передачи разомкнутой системы

( $k = K_{PP} \cdot K_{OC}$ );

$R_{яц}$  – сопротивление якорной цепи двигателя;

$\omega_0$  – скорость холостого хода;

$\Delta\omega_3$  – перепад скорости.

Сравнительный анализ жесткости характеристик в разомкнутой  $\Delta\omega_P$  и замкнутой  $\Delta\omega_3$  системах при одном и том же токе (моменте), приведенном ниже, показывает, что жесткость в замкнутой системе выше:

$$D\omega_p = \frac{I \cdot R_{яц}}{c};$$

$$D\omega_3 = \frac{I \cdot R_{яц}}{c \cdot (1+k)} = \frac{DW_p}{(1+k)},$$

т.к.  $k > 0$ , то всегда  $D\omega_3 < \Delta\omega_p$

В системе подчиненного регулирования появляется возможность регулирования переменных, отдельной настройки контуров (начиная с внутреннего) и коррекции переменных процессов в каждом контуре, что существенно упрощает как расчетную, так и практическую настройку системы.

Настройку контура (расчет и выбор элементов последовательных корректирующих цепей, т.е. выбор типа регулятора и расчет его параметров) проводят таким образом, чтобы получить технически оптимальный переходный процесс, при котором время  $t$  изменения регулируемой величины от 0 до установившегося значения было бы минимально возможным при перерегулировании  $\Delta x_{был}$ , не превышающем допустимого значения, примерно  $4 \div 10\%$  (рис. 4.3).

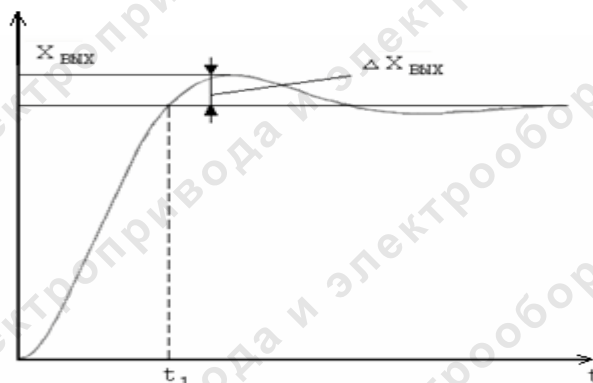


Рис.4.3. Технически оптимальный переходный процесс

Такой переходный процесс при скачке задания является компромиссным между процессом более быстрым, но с большим перерегулированием, и процессом с меньшим перерегулированием, но более медленным.

Известно, что характер переходного процесса замкнутой системы определяется соотношением постоянных времени системы, и оптимальному переходному процессу соответствует оптимальное соотношение постоянных времени. Математически это выражается определенным (оптимальным) соотношением коэффициентов характеристического уравнения системы.

Как известно при техническом оптимуме с помощью регулятора обеспечивается следующая желаемая передаточная функция разомкнутого оптимизированного контура:

$$W_{PO(TEXH)} = \frac{1}{K_{OC} \cdot 2 \cdot T_m \cdot p \cdot (1 + T_m \cdot p)},$$

где:  $T_m$  – некоторая постоянная времени контура;

$K_{OC}$  – коэффициент обратной связи.

Расчет и проектирование схемы управления электроприводом по принципу последовательной коррекции начинается с построения внутреннего (типового) контура, используя составляющие структурной схемы системы П-ДПТ: преобразователь (П), двигатель (ДПТ),  $K_{II}$  и  $T_{II}$  – коэффициент усиления и постоянная времени преобразователя,  $T_{Я}$  и  $T_M$  – постоянные времени соответственно якорной цепи ДПТ и механической части привода.

В цепь управления вводится РТ с неизвестной передаточной функцией  $W_{р.т.}$ , на вход которого подаются сигналы задающей:  $U_{ЗТ}$  и обратной связи по току  $U_{ОТ} = K_T I$ .

Искомая передаточная функция регулятора тока  $W_{р.т.}$  находится путем приравнивания желаемой передаточной функции разомкнутого оптимизированного контура к передаточной  $W_{раз.т.}$ , образованной РТ; П и цепью якоря ДПТ (П и цепь якоря ДПТ образуют объект регулирования для контура тока с передаточной функцией  $W_{ом}$ ):

$$\frac{1}{K_T \cdot 2 \cdot T_m \cdot p \cdot (1 + T_m \cdot p)} = W_{р.т.} \cdot \frac{K_{II}}{(1 + T_{II} \cdot p)} \cdot \frac{1 / R_{яц}}{(1 + T_{Я} \cdot p)},$$

откуда

$$W_{р.т.} = \frac{R_{яц} \cdot (1 + T_{Я} \cdot p) \cdot (1 + T_{II} \cdot p)}{K_T \cdot K_{II} \cdot 2 \cdot T_m \cdot p \cdot (1 + T_m \cdot p)},$$

где:  $K_T$  – коэффициент передачи обратной связи по току;

$K_{II}$  – коэффициент передачи преобразователя;

$T_{II}$  – постоянная времени преобразователя;

$T_m$  – постоянная времени контура тока;

$T_{Я}$  – электромашинная постоянная времени цепи якоря;

$R_{яц}$  – суммарное сопротивление цепи якоря.

Обычно принимают постоянную времени  $T_m$  равной небольшой (около 0.01с) постоянной времени преобразователя  $T_{II}$ , тогда

$$W_{р.т.} = \frac{T_{Я}}{T_{II}} - \frac{1}{p} T_{II},$$

где:  $T_{II} = K_T \cdot K_{II} \cdot 2 \cdot \frac{T_{II}}{R_{яц}}$  - постоянная времени регулятора.

Т.е. регулятор тока представляет собой пропорционально-интегральный регулятор (ПИ).

Передаточная функция замкнутого контура тока определяется как:

$$W_{з.т.} = \frac{W_{р.т.}}{1 + W_{р.т.} \cdot K_T} = \frac{1/K_T}{2 \cdot T_{II} \cdot p \cdot (1 + T_{II} \cdot p) + 1},$$

т.е. замкнутый контур представляет собой систему второго порядка с малой постоянной времени  $T_{II}$ . Другими словами, введение регулятора тока с передаточной функцией  $W_{р.т.}$  позволяет скомпенсировать большую постоянную времени цепи якоря  $T_{я}$  и обеспечить оптимальный характер переходных процессов с отмеченными ранее показателями (рис. 4.3).

Передаточную функцию регулятора скорости определяют как и для регулятора тока по передаточной функции объекта регулирования скорости  $W_{о.с.}$ , состоящему из контура тока, механической части привода и желаемой передаточной функции разомкнутой системы регулирования скорости  $W_{р.с.}$ .

Если пренебречь в выражении для  $W_{з.т.}$  членом второго порядка  $2T_{II}^2 \cdot p^2$ , то передаточная функция  $W_{о.с.}$  примет вид:

$$W_{з.т.} = \frac{R_{яц}}{K_T \cdot c \cdot T_m \cdot p \cdot (1 + 2 \cdot T_{II} \cdot p)} \quad (4.2)$$

Желаемая передаточная функция разомкнутой системы  $W_{р.с.}$  определяется выражением (4.3) при подстановке в него  $K_C = K_{о.с.}$  и  $T_{\mu} = 2T_{II}$ :

$$W_{з.т.} = \frac{R_{яц}}{4 \cdot K_C \cdot T_m \cdot p \cdot (1 + 2 \cdot T_{II} \cdot p)} \quad (4.3)$$

Разделив выражение (4.3) на (4.2), получаем искомую передаточную функцию регулятора скорости:

$$W_{р.с.} = \frac{W_{р.с.}}{W_{о.с.}} = \frac{K_T \cdot T_m \cdot c}{4 \cdot K_C \cdot T_{II} \cdot R_{яц}} = K_{р.с.}$$

Из этого следует, что регулятор скорости представляет собой пропорциональный (П) регулятор, при включении которого оказывается скомпенсирована другая значительная постоянная времени электропривода  $T_{\mu}$ .

Передаточная функция замкнутой системы имеет вид:

$$W_{з.с.} = \frac{W_{р.с.}}{1 + W_{р.с.} \cdot K_C} = \frac{1/K_C}{4T_{II} \cdot p \cdot (1 + 2 \cdot T_{II} \cdot p) + 1},$$

т.е. вся система электропривода представляет собой колебательное звено второго порядка, и в ней за счет настройки регуляторов тока и скорости

в соответствии с их передаточными функциями обеспечивается оптимальное регулирование тока и скорости.

Ограничение тока двигателя при пусках и торможениях в системах подчиненного регулирования достигается не ограничением выходного сигнала регулятора скорости (ограничение сохраняется как средство защиты), а применением задатчика интенсивности ЗИ, посредством которого сигнал задания скорости изменяется не скачком, а линейно во времени до требуемого уровня.

#### **4.4. Принципиальная электрическая схема стенда**

Принципиальная электрическая схема приведена на рис. 4.1.

Источник GA – источник синусоидального напряжения промышленной частоты.

Источник питания двигателя постоянного тока GB используется для питания регулируемым напряжением обмоток машины (двигателя) постоянного тока D1, работающей с независимым возбуждением. В этом случае половины обмотки возбуждения двигателя D1 следует соединить последовательно.

Преобразователь угловых перемещений DD генерирует импульсы, поступающие на вход указателя частоты вращения IB электромашинного агрегата.

Машина переменного тока D2, работающая в режиме генератора и обеспечивающая нагрузку на валу исследуемого двигателя, нагружена на активную нагрузку RA. Возбудитель GG питает обмотку возбуждения машины D2 регулируемым напряжением.

Датчики тока и напряжения блока BA гальванически изолируют от силовой электрической цепи и нормируют сигналы о токе и напряжении якоря и токе возбуждения исследуемого двигателя D1.

Терминал TM служит для разветвления на отдельные проводники кабеля, подключенного к источнику GB.

Блок BC служит для усиления цифровых сигналов.

Коннектор KK выполняет функцию связующего звена между компьютером IBM, блоком датчиков тока и напряжения BA, указателем частоты вращения IB и блоком ввода-вывода цифровых сигналов BC.

Компьютер IBM используется в режиме информационно-измерительной и управляющей системы.

#### **4.5. Программа экспериментов**

Порядок экспериментального исследования замкнутого электропривода в статическом режиме:

- проверка работоспособности стенда;



- снятие естественных характеристик  $\omega = f(I)$ ,  $\omega = f(M)$  в двигательном режиме с использованием виртуальной панели компьютера;
- снятие характеристик электропривода изменением напряжения питания  $U_1$  якоря двигателя D1 с использованием виртуальной панели компьютера.



Порядок экспериментального исследования замкнутого электропривода в динамическом режиме:

- проверка работоспособности стенда;
- зарисовать переходные процессы скорости  $\omega = f(t)$ , тока  $I = f(t)$  и момента  $M = f(t)$  при пуске на естественной характеристике;
- зарисовать переходные процессы скорости  $\omega = f(t)$ , тока  $I = f(t)$  и момента  $M = f(t)$  при останове двигателя с естественной характеристики;
- зарисовать переходные процессы скорости  $\omega = f(t)$ , тока  $I = f(t)$  и момента  $M = f(t)$  при пуске на реостатной характеристике;
- зарисовать переходные процессы скорости  $\omega = f(t)$ , тока  $I = f(t)$  и момента  $M = f(t)$  при сбросе и набросе нагрузки.

#### 4.6. Проверка работоспособности стенда (рис. 4.1)

Для этого необходимо проделать следующее:

- Убедиться, что устройства, используемые в экспериментах, отключены от сети электропитания.
- Собрать электрическую схему соединений тепловой защиты машины переменного тока (часть 1, стр. 8, рис. 1).
- Соединить гнезда защитного заземления "⊕" устройств, используемых в эксперименте, с гнездом «РЕ» источника GA.
- Подключить аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений (рис.4.1).
- Переключатель режима работы источника GB установить в положение «АВТ.», а возбудителя GG - в положение «РУЧН».
- Регулировочные рукоятки активной нагрузки RA установить в крайнее по часовой стрелке положение.
- Регулировочную рукоятку возбудителя GG повернуть против часовой стрелки до упора.
- Привести в рабочее состояние персональный компьютер IBM.
- Запустить программу «Источник ЭДС – двигатель постоянного тока – Опыт 3.1.1» или, если необходимо, «Многоканальный осциллограф».

- Нажать на виртуальную кнопку «Параметры»  и задать параметры управления электроприводом. Например, использовать уставки по умолчанию, нажав виртуальную кнопку «Использовать уставки по умолчанию».
- Запустить сбор данных, нажав кнопку «Запустить» .
- Включить источник GA.
- Установить мультиметры на соответствующие пределы измерений токов и напряжений.
- Нажать кнопку «ВКЛ.» возбудителя GG.
- Нажать на виртуальную кнопку «ПУСК».
- Вращая виртуальную регулировочную рукоятку, установить задание скорости вращения двигателя D1 до начала разгона электрической машины.

#### 4.7. Снятие статических характеристик замкнутой системы

##### 4.7.1. Снятие естественной характеристики двигателя D1 в замкнутой системе электропривода

Естественные характеристики  $\omega = f(I)$  и  $\omega = f(M)$  снимаются при номинальных параметрах исследуемого двигателя D1 ( $U_l = 220$  В, для этого необходимо установить виртуальный сигнал задания скорости 190 рад/с).

- Подготовить стенд к работе по пункту 4.6.
- Вращая регулировочную рукоятку возбудителя генератора GG, изменять ток якоря  $I_l$  (до 1 А) двигателя D1 и заносить показания амперметра А и вольтметра V блока ВМ, а также указателя ИВ в таблицу 4.2.

Таблица 4.2

$I_l, \text{ А}$									
$U_l, \text{ В}$									
$n, \text{ мин}^{-1}$									

- Наблюдать механическую  $\omega = f(M)$  характеристику двигателя D1 на экране монитора компьютера.
- По завершении эксперимента повернуть регулировочную рукоятку источника GG против часовой стрелки до упора и нажать кнопку «ОТКЛ.». Отключить выключатель QA нажатием на кнопку «ОТКЛ.» и источник GA нажатием на кнопку-гриб и последующим отключением против часовой стрелки ключа выключателя.

Отключить выключатели «СЕТЬ» всех используемых в эксперименте блоков.

- Используя данные таблицы 4.2, вычислить значение угловой скорости вращения  $\omega$  двигателя D1 по выражению:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} \quad (4.4)$$

и его электромагнитного момента  $M_1$  по формуле:

$$M_1 = \frac{60}{2\pi n} (U_1 - 65 \cdot I_1) \cdot I_1 \quad (4.5)$$

и занести полученные результаты в таблицу 4.3.

Таблица 4.3

$M_1, \text{Н}^*\text{м}$								
$\omega, \text{с}^{-1}$								

Привести пример расчета.

- По данным таблиц 4.2 и 4.3 построить электромеханическую  $\omega = f(I_1)$  и механическую  $\omega = f(M_1)$  характеристики двигателя D1.

#### 4.7.2. Снятие характеристик электропривода изменением напряжения питания $U_1$ якоря двигателя D1

Характеристики  $\omega = f(I)$  и  $\omega = f(M)$  снимают при различном напряжении питания  $U_1$  двигателя D1, устанавливаемых вращением виртуальной регулировочной рукоятки задания скорости.

- Подготовить стенд к работе по пункту 4.6.
- Вращая виртуальную регулировочную рукоятку, установить задание скорости вращения двигателя D1 74 рад/с. Электродвигатель D1 должен разогнаться.
- Вращая регулировочную рукоятку возбуждителя генератора GG, изменять ток якоря  $I_1$  (до 1А) двигателя D1 и заносить показания амперметра А и вольтметра V блока ВМ, а также указателя ИВ в таблицу, аналогичную таблице 4.2.
- Наблюдать механическую  $\omega = f(M)$  характеристику двигателя D1 на экране монитора компьютера.
- Проделать аналогичные опыты для уменьшенных напряжений питания якоря  $U_1$  двигателя D1.
- По завершении эксперимента повернуть регулировочную рукоятку источника GG против часовой стрелки до упора и нажать кнопку «ОТКЛ.». Отключить выключатель QA нажатием на кнопку «ОТКЛ.» и источник GA нажатием на кнопку – гриб и последую-

щим поворотом против часовой стрелки ключа выключателя. Отключить выключатели «СЕТЬ» всех задействованных в эксперименте блоков.

- Используя данные таблицы, аналогичной таблице 4.2, вычислить значение угловой скорости вращения  $\omega$  двигателя D1 по выражению (4.4) и его электромагнитного момента  $M_1$  по формуле (4.5) и занести полученные результаты в таблицу, аналогичную таблице 4.3.

Привести пример расчета.

- По данным таблиц, аналогичных таблицам 4.2 и 4.3, построить электромеханическую  $\omega = f(I_1)$  и механическую  $\omega = f(M)$  характеристики двигателя D1.

#### 4.8. Снятие динамических характеристик замкнутой системы

##### 4.8.1. Рекомендации по использованию программы «Многоканальный осциллограф» (рис.4.4)

Программа «Многоканальный осциллограф» является виртуальным аналогом реальных приборов и обладает широкими функциональными возможностями. Программа предназначена для регистрации и отображения различных аналоговых сигналов в удобной для пользователя форме. Виртуальная схема многоканального осциллографа приведена на рис.4.4.

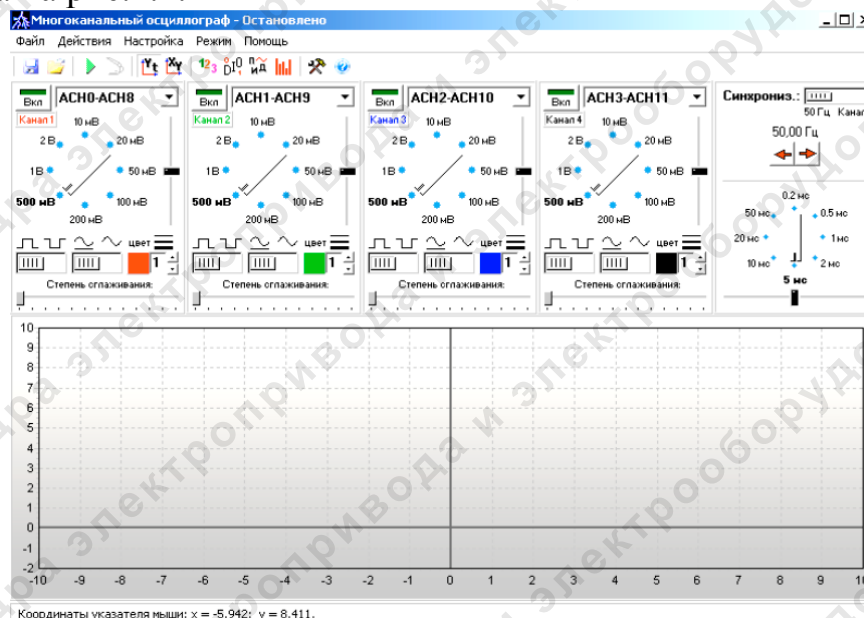


Рис.4.4. Многоканальный осциллограф



Ниже перечислены возможности интерфейса программы, а также некоторые замечания по этому поводу.

- Включить компьютер ИМВ > пуск > программы > многоканальный осциллограф.
- Двойным щелчком мыши можно устанавливать в нуль регуляторы смещения картинки по горизонтали и по вертикали.
- Щелчок мыши на осях графика вызывает окно настройки соответствующей оси.
- В этом окне, помимо всего прочего, можно включить или отключить отображение нулевых линий.
- Масштабирование осциллограмм производится путем нажатия на графике левой клавиши мыши и, не отпуская ее, перемещения манипулятора слева направо и сверху вниз. Возврат к начальному масштабу осуществляется обратным перемещением манипулятора – справа налево и снизу вверх.
- Двигать график осциллограмм относительно осей координат можно путем нажатия и удержания на нем правой кнопки мыши и ее одновременного перемещения в нужную сторону.
- Для удобства определения значений величин на экране отображаются текущие координаты указателя мыши.
- Регулятор уровня синхронизации проградуирован *в единицах графика*.
- Делители напряжения каналов и временной делитель проградуированы по отношению *к одной единице* графика (например, положение 500 мВ означает, что одна единица (не клетка!) графика соответствует 500 мВ).
- Параметры сканирования по умолчанию можно установить, выбрав соответствующий пункт меню «Настройка».
- Аналогичным образом можно зарегистрировать расширение «\*.osc».
- Таким же образом можно вернуть все органы управления в исходное положение.
- Цвет того или иного графика можно выбрать, щелкнув «мышкой» по соответствующей кнопке выбора цвета.
- Отображение интегральных (средних, действующих, средневыпрямленных, максимальных, минимальных, амплитудных) значений сигналов можно включить, нажав на соответствующую кнопку.
- В режиме запоминания осциллограммы можно сглаживать, причем существуют два режима сглаживания - обычное, предназначенное

для сглаживания случайных помех, и сильное ( $\times 10$ ), предназначенное для сглаживания частот, сравнимых с 50 Гц. Следует помнить, что *любое сглаживание в общем случае искажает форму снятых зависимостей*.

- В режиме запоминания можно также менять порядок отображения графиков (т.е. вывести какую-либо кривую поверх остальных).

#### **4.8.2. Рекомендации по использованию программы «Источник ЭДС – двигатель постоянного тока - Опыт 3.1.1»**

- Для активации режима ограничения тока якоря двигателя D1 в программе «...- Опыт 3.1.1.» установить соответствующую галочку.
- Задать значение ограничения тока якоря двигателя D1 вращением соответствующей рукоятки.
- Для определения координат точек на графиках использовать отображаемые на экране текущие координаты указателя мыши.
- Масштабирование производить путем нажатия на графике левой клавиши мыши и, не отпуская ее, перемещения манипулятора слева направо и сверху вниз. Возврат к начальному масштабу осуществлять обратным перемещением манипулятора – справа налево и снизу вверх.
- Графики относительно осей координат двигать путем нажатия и удержания на соответствующем объекте правой кнопки мыши и ее одновременного перемещения в нужную сторону.
- Очищать область построения механической характеристики нажатием на соответствующую виртуальную кнопку  или клавишу «Пробел».
- Изменять коэффициенты усиления ПИД-регуляторов, а также интенсивность изменения уставки скорости вращения, варьируя соответствующие параметры на закладке «Управление» в окне «Параметры».
- Окно «Параметры» отображать нажатием на виртуальную кнопку .

#### **4.8.3. Исследование процесса пуска двигателя D1 в замкнутой системе электропривода на естественной характеристике**

Характеристики  $\omega = f(t)$ ,  $I = f(t)$  и  $M = f(t)$  снимаются при номинальных параметрах двигателя D1.

- Подготовить стенд к работе по пункту 4.6.


- Вращая регулировочную рукоятку возбуждателя GG, установить ток якоря двигателя D1 равным 0,5 А.
- Отключить двигатель D1 нажатием на кнопку «ОТКЛ.» источника питания GA.
- При дальнейшей работе использовать рекомендации пунктов 4.8.1 и 4.8.2.
- Организовать переходный процесс пуска, для чего нажать кнопку «ВКЛ.» источника питания GA.
- Наблюдать на экране компьютера изменение координат  $\omega = f(t)$ ,  $I = f(t)$  и  $M = f(t)$  электропривода в реальном времени.
- Сразу после завершения переходного процесса нажать виртуальную кнопку «Остановить» .
- Запустить из меню «Пуск > Программы > Стандартные» графический редактор «Paint» и поместить в него содержимое буфера обмена (меню «Правка > Вставить») или Shift-Ins (или Ctrl-V). Сохранить полученную информацию на Flash-памяти;
- По завершении экспериментов у возбуждателя GG повернуть регулировочную рукоятку против часовой стрелки до упора и нажать кнопку «ОТКЛ.». Отключить источник GA нажатием на кнопку-гриб и последующим поворотом против часовой стрелки ключа выключателя. Отключить выключатели «СЕТЬ» всех используемых в эксперименте блоков.
- Анализировать запомненные временные зависимости координат и параметров электропривода. Результаты анализа занести в таблицу 4.4.


Таблица 4.4

№п. п.	Параметр переходного процесса								Название переходного процесса (пуск, торможение и т.д.)
	$t_{пп}$ , мс	$\omega_{уст}$ , с <sup>-1</sup>	$\omega_{нач}$ , с <sup>-1</sup>	$I_{нач}$ , мА	$I_{уст}$ , мА	$\delta I_{уст}$ , %	$\delta I_{макс}$ , %	$I_{макс}$ , мА	
1									
2									
3									
4									
5									
6									



#### 4.8.4. Исследование процесса пуска электропривода при пониженном напряжении питания


Характеристики  $\omega = f(t)$ ,  $I = f(t)$  и  $M = f(t)$  снимают при различном напряжении питания  $U_I$  двигателя D1, устанавливаемом вращением виртуальной регулировочной рукоятки задания скорости.

- Подготовить стенд к работе по пункту 4.6.
- Вращая виртуальную регулировочную рукоятку, установите задание скорости вращения двигателя D1 150 рад/с. Электродвигатель D1 должен разогнаться.
- Вращая регулировочную рукоятку возбуждателя GG, установить ток якоря двигателя D1 равным 0,5 А.
- Отключить двигатель D1 нажатием на кнопку «ОТКЛ.» источника питания GA.
- При дальнейшей работе использовать рекомендации пункта 4.8.1 и 4.8.2.
- Организовать переходный процесс пуска, для чего нажать кнопку «ВКЛ.» источника питания GA.
- Наблюдать на экране компьютера изменение координат  $\omega = f(t)$ ,  $I = f(t)$  и  $M = f(t)$  электропривода в реальном времени.
- Сразу после завершения переходного процесса нажать виртуальную кнопку «Остановить» .
- Запустить из меню «Пуск > Программы > Стандартные» графический редактор «Paint» и поместить в него содержимое буфера обмена (меню «Правка > Вставить» или Shift-Ins (или Ctrl-V)). Сохранить полученную информацию на Flash-памяти;
- По завершении экспериментов у возбуждателя GG повернуть регулировочную рукоятку против часовой стрелки до упора и нажать кнопку «ОТКЛ.». Отключить источник GA нажатием на кнопку-гриб и последующим поворотом против часовой стрелки ключа выключателя. Отключить выключатели «СЕТЬ» всех используемых в эксперименте блоков.
- Анализировать запомненные временные зависимости координат и параметров электропривода. Результаты анализа занести в таблицу, аналогичную таблице 4.4.



#### 4.8.4. Исследование процесса останова двигателя D1 в замкнутой системе электропривода с естественной характеристики

Характеристики  $\omega = f(t)$ ,  $I = f(t)$  и  $M = f(t)$  снимаются при номинальных параметрах двигателя D1.

- Подготовить стенд к работе по пункту 4.6.
- Вращая регулировочную рукоятку возбуждателя GG, установить ток якоря двигателя D1 равным 0,5 А.
- При дальнейшей работе использовать рекомендации пункта 4.8.1 и 4.8.2.
- Организовать переходный процесс останова, для чего нажать кнопку «ОТКЛ.» источника питания GA.
- Наблюдать на экране компьютера изменение координат  $\omega = f(t)$ ,  $I = f(t)$  и  $M = f(t)$  электропривода в реальном времени.
- Сразу после завершения переходного процесса нажать виртуальную кнопку «Остановить» .
- Запустить из меню «Пуск > Программы > Стандартные» графический редактор «Paint» и поместить в него содержимое буфера обмена (меню «Правка > Вставить» или Shift-Ins (или Ctrl-V)). Сохранить полученную информацию на Flash-памяти;
- По завершении экспериментов у возбуждателя GG повернуть регулировочную рукоятку против часовой стрелки до упора и нажать кнопку «ОТКЛ.». Отключить источник GA нажатием на кнопку-гриб и последующим поворотом против часовой стрелки ключа выключателя. Отключить выключатели «СЕТЬ» всех используемых в эксперименте блоков.
- Анализировать запомненные временные зависимости координат и параметров электропривода. Результаты анализа занести в таблицу, аналогичную таблице 4.4.

#### 4.8.5. Исследование переходного процесса электропривода в режиме сброс-наброс нагрузки

Характеристики  $\omega = f(t)$ ,  $I = f(t)$  и  $M = f(t)$  снимаются при номинальных параметрах двигателя D1.

- Подготовить стенд к работе по пункту 4.6.
- Вращая регулировочную рукоятку возбуждателя GG, установить ток якоря двигателя D1 равным 0,5 А.
- При дальнейшей работе использовать рекомендации пункта 4.8.1 и 4.8.2.

- Организовать переходный процесс сброс-наброс нагрузки двигателя D1. Для чего нажать кнопку «ОТКЛ.» и спустя 5 с – кнопку «ВКЛ.» возбудителя GG.
- Наблюдать на экране компьютера изменение координат  $\omega = f(t)$ ,  $I = f(t)$  и  $M = f(t)$  электропривода в реальном времени.
- Сразу после завершения переходного процесса нажать виртуальную кнопку «Остановить» ■■.
- Запустить из меню «Пуск > Программы > Стандартные» графический редактор «Paint» и поместить в него содержимое буфера обмена (меню «Правка > Вставить» или Shift-Ins (или Ctrl-V). Сохранить полученную информацию на Flash-памяти;
- По завершении экспериментов у возбудителя GG повернуть регулировочную рукоятку против часовой стрелки до упора и нажать кнопку «ОТКЛ.». Отключить источник GA нажатием на кнопку-гриб и последующим поворотом против часовой стрелки ключа выключателя. Отключить выключатели «СЕТЬ» всех используемых в эксперименте блоков.
- Анализировать запомненные временные зависимости координат и параметров электропривода. Результаты анализа занести в таблицу, аналогичную таблице 4.4.

#### 4.9. Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Принципиальная электрическая схема стенда с краткими пояснениями.
3. Таблицы опытных данных и характеристики  $\omega=f(I_1)$  для всех опытов на одном графике;  $\omega=f(M_1)$  для всех опытов на другом графике.
4. Показатели регулирования скорости вращения двигателя D1 (диапазон, точность, плавность).
5. Графики переходных процессов скорости  $\omega = f(t)$ , тока  $I = f(t)$  и момента  $M = f(t)$  при пуске, останове, сбросе и набросе нагрузки на соответствующих характеристиках.
6. Краткие выводы.

#### 4.10. Контрольные вопросы

4.10.1. Изобразить графики переходных процессов  $\omega=f(t)$  и  $I=f(t)$  в замкнутой системе электропривода:

- при пуске;
- при торможении (останове);
- при сбросе и набросе нагрузки.

4.10.2. Назвать причину отсутствия перерегулирования на графике переходного процесса по скорости.

4.10.3. По какой траектории изменяются значения скорости и тока во время переходного процесса?

4.10.4. Назвать способы определения времени переходного процесса.

4.10.5. Как определить электромеханическую постоянную времени переходного процесса?

4.10.6. От каких параметров зависит постоянная времени электропривода постоянного тока?

### Литература

1. Москаленко В.В. Автоматизированный электропривод: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 416 с.
2. Ильинский Н.Ф., Козаченко В.Ф. Общий курс электропривода: Учеб. для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 544 с.
3. Москаленко В.В. Электрический привод: Учеб. пособие для студ. Учреждений сред. проф. образования. – М.: Мастерство: Высшая школа, 2000. – 368 с.
4. Электротехника: Учебное пособие для вузов. В 3-х книгах. Книга 3. Электроприводы. Электроснабжение / Под ред. П.А. Бутырина, Р.Х. Гафиятуллина, А.А. Шестакова. – Челябинск: Изд-во Ю УрГУ, 2005. – 639 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ЧАСТЬ 1</b>	
1. Описание лабораторного стенда.....	3
<b>ЧАСТЬ 2</b>	
<b>Лабораторная работа №1</b>	
Динамические характеристики и режимы работы электропривода с электродвигателем постоянного тока независимого возбуждения .....	15
<b>Лабораторная работа №2</b>	
Динамические характеристики и режимы работы электропривода с электродвигателем асинхронного двигателя с фазным ротором.....	39
<b>Лабораторная работа №3</b>	
Динамические характеристики электропривода системы «тиристорный преобразователь – двигатель постоянного тока независимого возбуждения.....	60
<b>Лабораторная работа № 4</b>	
Статические и динамические характеристики и режимы работы замкнутого электропривода.....	78

Учебное издание

ОДНОКОПЫЛОВ Иван Георгиевич

СЕМЕНОВ Сергей Михайлович

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИВОД. ДИНАМИКА

### ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

Учебное пособие

Научный редактор  
доктор технических наук,  
профессор

*Р.Ф. Бекишев*

Верстка

*О.А. Гречко*

Подписано к печати 00.00.2009. Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».

Печать XEROX. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. .

Заказ . Тираж экз.



Томский политехнический университет  
Система менеджмента качества

Томского политехнического университета сертифицирована  
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту ISO 9001:2000



ИЗДАТЕЛЬСТВО ТПУ . 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.