

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

Кафедра систем управления

**А. В. Марков, А. С. Шмарловский**

## **ЭЛЕМЕНТЫ И УСТРОЙСТВА СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ**

Практикум

для студентов специальности 1-53 01 07 «Информационные технологии  
и управление в технических системах»  
всех форм обучения

В 2-х частях

Часть 1

Минск БГУИР 2010

УДК 681.58(076.5)

ББК 32.96–04я73

М26

**Р е ц е н з е н т:**

заведующий кафедрой ВМиП,  
доктор технических наук А. А. Иванюк

**Марков, А. В.**

М26       Элементы и устройства систем управления: практ. для студ. спец. 1-53 01 07 «Информационные технологии и управление в технических системах». В 2-х ч. Ч. 1 / А. В. Марков, А. С. Шмарловский. – Минск : БГУИР, 2010. – 102 с.: ил.

ISBN 978-985-488-626-8.

Практикум содержит указания к выполнению лабораторных работ «Двигатель постоянного тока», «Асинхронный двигатель», «Система управления подъемным устройством» и материалы к практическим занятиям. Каждая лабораторная работа содержит краткие теоретические сведения, перечень вопросов, которые необходимо изучить в процессе подготовки к лабораторной работе, порядок выполнения, содержание отчета, контрольные вопросы и список литературных источников. Приведена практическая информация об устройстве, принципе действия, физических процессах работы, схемах включения и характеристиках исполнительных двигателей и преобразователей.

**УДК 681.58(076.5)**

**ББК 32.96–04я73**

**ISBN 978-985-488-626-8 (ч.1).**

**ISBN 978-985-488-627-5**

© Марков А. В., Шмарловский А. С., 2010

© УО «Белорусский государственный

университет информатики и

радиоэлектроники», 2010

## Содержание

Предисловие .....	5
1. Машины постоянного тока.....	6
1.1. Принцип действия генератора и двигателя постоянного тока.....	6
1.2. Способы возбуждения машин постоянного тока .....	9
1.3. Двигатель параллельного возбуждения.....	10
1.4. Двигатель последовательного возбуждения .....	13
1.5. Двигатель смешанного возбуждения .....	15
2. Двигатель постоянного тока.....	17
2.1. Режимы работы .....	17
2.2. Пуск двигателя .....	18
2.3. Коэффициент полезного действия .....	21
2.4. Работа от сети переменного тока .....	22
3. Коммутация в машинах постоянного тока .....	24
3.1. Коммутация в коллекторных машинах.....	24
3.2. Защита обмотки якоря .....	26
3.3. Радиопомехи и способы их подавления .....	26
4. Исполнительный двигатель постоянного тока.....	27
4.1. Назначение и предъявляемые требования.....	27
4.2. Якорное управление.....	29
4.3. Полюсное управление.....	33
4.4. Модель двигателя постоянного тока.....	36
5. Лабораторная работа «Двигатель постоянного тока» .....	38
5.1. Варианты заданий .....	38
5.2. Подготовка к лабораторной работе.....	40
5.3. Порядок выполнения работы .....	41
5.4. Методика выполнения работы.....	42
5.5. Содержание отчета.....	45
5.6. Контрольные вопросы .....	46
5.7. Литература к лабораторной работе .....	47
6. Асинхронный двигатель .....	47
6.1. Принцип действия трехфазного асинхронного двигателя.....	47
6.2. Режимы работы асинхронной машины.....	49
6.3. Устройство асинхронного двигателя .....	53
6.4. Рабочие характеристики асинхронного двигателя .....	54
6.5. Пуск двигателей с фазным ротором.....	57
6.6. Пуск двигателей с короткозамкнутым ротором .....	60
6.7. Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей.....	61
6.8. Параметры асинхронного двигателя.....	68
7. Настройка системы управления электроприводом переменного тока .....	71
7.1. Автоматическая настройка параметров системы управления .....	71
7.2. Процедура проведения автонастройки .....	73

7.3. Идентификация системы управления .....	75
8. Лабораторная работа «Асинхронный двигатель» .....	77
8.1. Варианты заданий .....	77
8.2. Описание лабораторного макета .....	78
8.3. Подготовка к лабораторной работе .....	78
8.4. Порядок выполнения работы .....	79
8.5. Методика выполнения работы .....	80
8.6. Содержание отчета .....	83
8.7. Контрольные вопросы.....	83
8.8. Литература к лабораторной работе .....	84
9. Система управления подъемным устройством .....	85
9.1. Описание системы.....	86
9.2. Основные виды движения .....	88
9.3. Принцип работы подъемного устройства.....	91
9.4. Микропроцессорные системы управления лифтами.....	92
10. Системные расчеты .....	93
10.1. Общие сведения.....	93
10.2. Расчет цикла движения .....	94
10.3. Подъемное устройство без противовеса .....	96
10.4. Подъемное устройство с противовесом .....	97
10.5. Результаты расчетов.....	102
10.6. Расчет и выбор основных функциональных элементов .....	103
11. Лабораторная работа «Система управления подъемным устройством» .....	108
11.1. Варианты заданий .....	108
11.2. Описание лабораторного макета .....	109
11.3. Подготовка к лабораторной работе .....	110
11.4. Порядок выполнения работы .....	110
11.5. Методика выполнения работы .....	111
11.6. Содержание отчета .....	114
11.7. Контрольные вопросы.....	115
11.8. Литература к лабораторной работе .....	116

## Предисловие

Практикум по дисциплине «Элементы и устройства систем управления» предназначен для студентов специальности 1-53 01 07 «Информационные технологии и управление в технических системах» всех форм обучения. Практикум содержит указания к выполнению лабораторных работ и материалы к практическим занятиям. Каждая лабораторная работа содержит краткие теоретические сведения, перечень вопросов, которые необходимо изучить в процессе подготовки к лабораторной работе, порядок выполнения, содержание отчета, контрольные вопросы и список литературных источников.

Первая часть практикума включает описание трех лабораторных работ: «Двигатель постоянного тока», «Асинхронный двигатель» и «Система управления подъемным устройством». Приведена практическая информация об устройстве, принципе действия, физических процессах работы, схемах включения и характеристиках силовых и исполнительных двигателей, а также рассмотрены вопросы расчета и выбора основных функциональных элементов на примере системы управления подъемным устройством.

Во второй части лабораторного практикума приводится практическая информация об устройстве, принципе действия, режимах работы и основных характеристиках синхронных двигателей, датчиков, преобразователей частоты, систем управления частотно-регулируемыми электроприводами и других элементов и устройств систем управления. Рассмотрены способы управления двигателями переменного тока и принципы настройки систем управления на их основе. Вторая часть практикума включает описание лабораторных работ, посвященных изучению этих вопросов на практике.

Лабораторные работы выполняются на современном оборудовании с применением системы Matlab (среда Simulink, библиотека элементов SimPowerSystems) и специализированного программного обеспечения Omron CX-One. Тематика лабораторных работ соответствует рабочей программе дисциплины и направлена на приобретение студентами необходимых практических навыков.

В соответствии с **Положением** о порядке подготовки, выполнения, оформления и защиты лабораторных работ: подготовка к лабораторной работе осуществляется студентами самостоятельно заранее в качестве домашнего задания. В процессе такой подготовки студент должен усвоить теоретический материал, относящийся к данной лабораторной работе, изучить и ясно представить себе ее содержание и порядок выполнения, знать принципы действия и правила работы с измерительными приборами, методы измерений, особенности конструкции лабораторной установки и правила техники безопасности, знать ответы на приведенные в методическом руководстве контрольные вопросы, а также выполнить необходимый по заданию объем предварительных расчетов, заготовить необходимые таблицы и рисунки. Студент, не выполнивший такое домашнее задание, к выполнению лабораторной работы не допускается.

## 1. Машины постоянного тока

Электрические машины постоянного тока используются как в качестве генераторов, так и в качестве двигателей. Коллекторные машины обладают свойством обратимости, т. е. они могут работать как в режиме генератора, так и в режиме двигателя. Поэтому если машину постоянного тока подключить к источнику энергии постоянного тока, то в обмотке возбуждения и в обмотке якоря машины появятся токи. Взаимодействие тока якоря с полем возбуждения создает на якоре электромагнитный момент  $M$ , который является не тормозящим, как это имеет место в генераторе, а *вращающим*. Под действием электромагнитного момента якоря машина начнет вращаться, т. е. будет работать в режиме двигателя, потребляя из сети электрическую энергию и преобразуя ее в механическую.

Наибольшее применение имеют двигатели постоянного тока, области применения и диапазон мощности которых достаточно широки. Основные преимущества двигателей постоянного тока по сравнению с бесколлекторными двигателями переменного тока – хорошие пусковые и регулировочные свойства, возможность получения частоты вращения более 3000 об/мин, а недостатки – относительно высокая стоимость, некоторая сложность в изготовлении и пониженная надежность. Все эти недостатки машин постоянного тока обусловлены наличием в них щеточно-коллекторного узла, который к тому же является источником радиопомех и пожароопасности. Эти недостатки ограничивают применение машин постоянного тока.

### 1.1. Принцип действия генератора и двигателя постоянного тока

Характерным признаком коллекторных машин является наличие у них *коллектора* – механического преобразователя переменного тока в постоянный и наоборот. Необходимость в таком преобразователе объясняется тем, что в обмотке якоря коллекторной машины должен протекать переменный ток, поскольку только в этом случае в машине происходит непрерывный процесс электромеханического преобразования энергии.

Рассмотрим принцип действия коллекторного генератора постоянного тока. На рис. 1.1 изображена упрощенная модель такого генератора: между полюсами  $N$  и  $S$  постоянного магнита находится вращающаяся часть генератора – якорь, вал которого посредством шкива и ременной передачи механически связан с приводным двигателем (на рисунке не показан) – источником механической энергии. В двух продольных пазах на сердечнике якоря расположена обмотка в виде одного витка  $a, b, c, d$ , концы которого присоединены к двум медным изолированным друг от друга полукольцам, образующим простейший коллектор. На поверхность коллектора наложены щетки  $A$  и  $B$ , осуществляющие скользящий контакт с коллектором и связывающие генератор с внешней цепью, куда включена нагрузка сопротивлением  $R$ .

Предположим, что приводной двигатель вращает якорь генератора против часовой стрелки, тогда в витке на якоре, вращающемся в магнитном поле постоянного магнита, наводится ЭДС, мгновенное значение которой  $e = 2Blv$ , а направление для положения якоря, изображенного на рис. 1.1, указано стрелками.

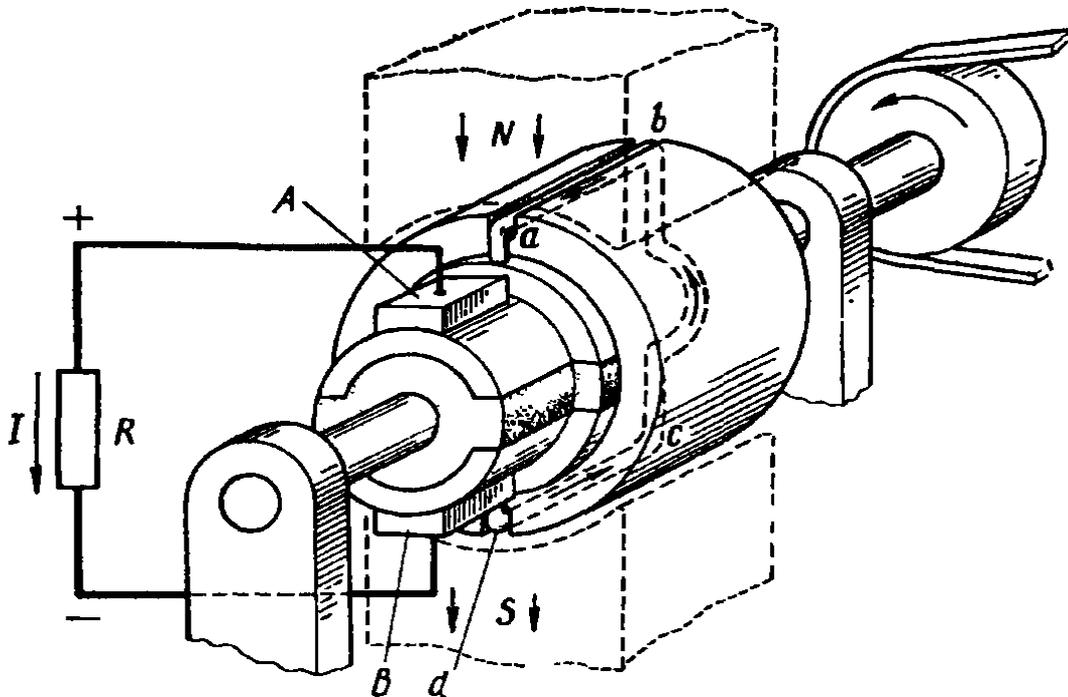


Рис. 1.1. Упрощенная модель коллекторной машины

В процессе работы генератора якорь вращается и виток  $a, b, c, d$  занимает разное пространственное положение, поэтому в обмотке якоря наводится переменная ЭДС. Если бы в машине не было коллектора, то ток во внешней цепи (в нагрузке  $R$ ) был бы переменным, но посредством коллектора и щеток переменный ток обмотки якоря преобразуется в пульсирующий ток во внешней цепи генератора, т. е. ток, неизменный по направлению. При положении витка якоря, показанном на рис. 1.1, ток во внешней цепи (в нагрузке) направлен от щетки  $A$  к щетке  $B$ ; следовательно, щетка  $A$  является положительно заряженной, а щетка  $B$  – отрицательно. После поворота якоря на  $180^\circ$  (рис. 1.2,  $a$ ) направление тока в витке якоря изменится на обратное, однако полярность щеток, а следовательно, и направление тока во внешней цепи (в нагрузке) останутся неизменными (рис. 1.2,  $b$ ). Объясняется это тем, что в тот момент, когда ток в витке якоря меняет свое направление, происходит смена коллекторных пластин под щетками. Таким образом, под щеткой  $A$  всегда находится пластина, соединенная с проводником, расположенным под северным магнитным полюсом, а под щеткой  $B$  – пластина, соединенная с проводником, расположенным под южным полюсом. Благодаря этому полярность щеток генератора остается неизменной независимо от положения витка якоря. Что же касается пульсаций тока во внешней

цепи, то они намного ослабятся, если увеличить число витков в обмотке якоря, равномерно распределив их по поверхности, и, соответственно, увеличить число пластин в коллекторе.

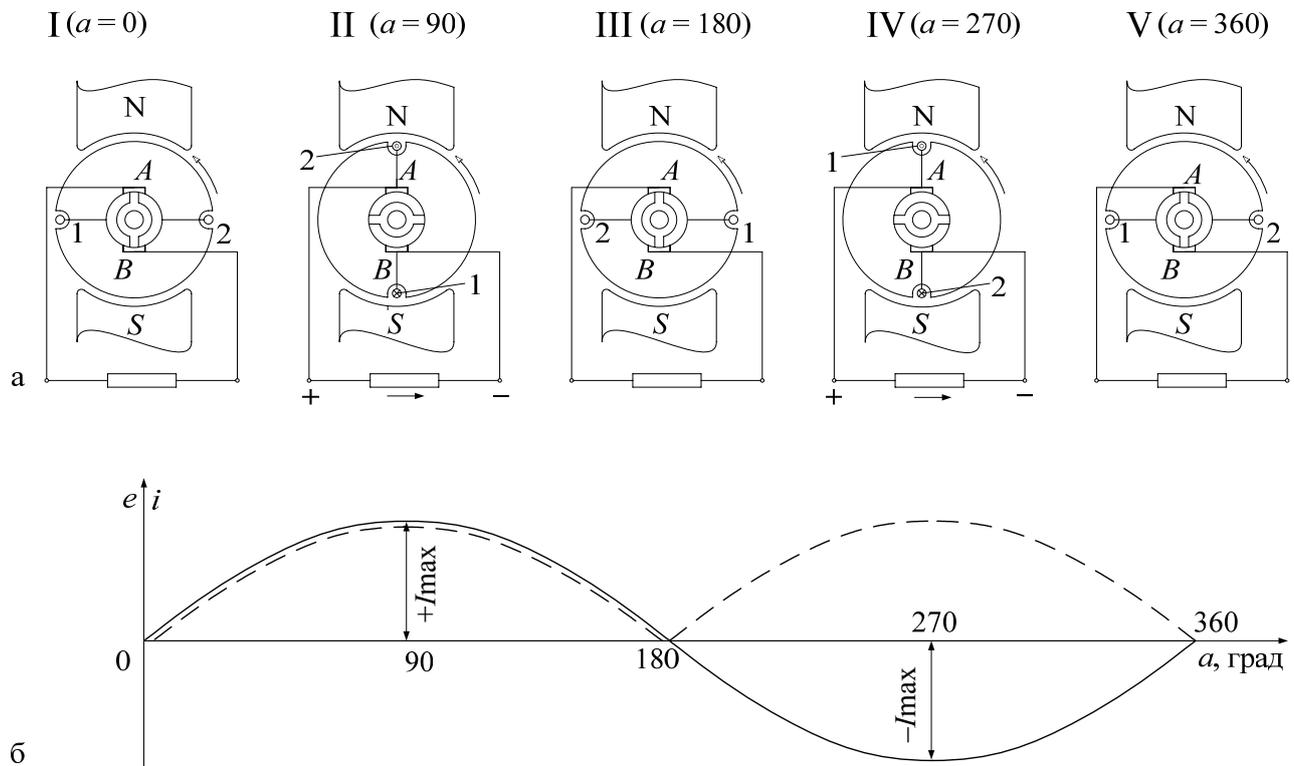


Рис. 1.2. Принцип действия генератора постоянного тока:  
 $a$  – ЭДС и ток в обмотке якоря;  $b$  – ЭДС и ток во внешней цепи генератора

В соответствии с принципом обратимости электрических машин упрощенная модель машины постоянного тока может быть использована в качестве двигателя постоянного тока. Для этого необходимо отключить нагрузку генератора  $R$  и подвести к щеткам машины напряжение от источника постоянного тока. Например, если к щетке  $A$  подключить зажим «плюс», а к щетке  $B$  «минус», то в обмотке якоря появится ток  $I$ , направление которого показано на рис. 1.3. В результате взаимодействия этого тока с магнитным полем постоянного магнита (полем возбуждения) появятся электромагнитные силы  $F_{ЭМ}$ , создающие на якоре электромагнитный момент  $M$  и вращающие его против часовой стрелки. После поворота якоря на  $180^\circ$  электромагнитные силы не изменят своего направления, поскольку одновременно с переходом каждого проводника обмотки якоря из зоны одного магнитного полюса в зону другого полюса в этих проводниках меняется направление тока.

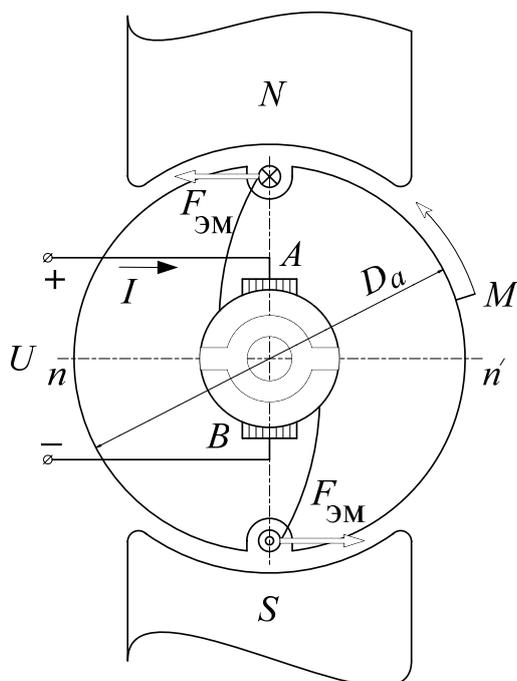


Рис. 1.3. Принцип действия двигателя постоянного тока

Таким образом, назначение коллектора и щеток в двигателе постоянного тока – изменять направление тока в проводниках обмотки якоря при их переходе из зоны магнитного полюса одной полярности в зону полюса другой полярности.

Рассмотренная упрощенная модель машины постоянного тока не обеспечивает двигателю устойчивой работы, поскольку при прохождении проводниками обмотки якоря геометрической нейтрали  $nn'$  (рис. 1.3) электромагнитные силы  $F_{ЭМ} = 0$  (магнитная индукция в середине межполюсного пространства равна нулю). Однако с увеличением числа проводников в обмотке якоря (при равномерном их распределении на поверхности якоря) и числа пластин коллектора вращение якоря двигателя становится устойчивым и равномерным.

Из рассмотрения принципа действия и устройства коллекторной машины постоянного тока следует, что неизменным элементом этой машины, включенным между обмоткой якоря и внешней сетью, является щеточно-коллекторный механический преобразователь рода тока. Таким образом, коллекторные машины сложнее бесколлекторных машин переменного тока (асинхронной и синхронной) и, следовательно, уступают им (особенно асинхронной машине) в надежности, имея при этом более высокую стоимость.

## 1.2. Способы возбуждения машин постоянного тока

Для работы электрической машины необходимо наличие магнитного поля. В большинстве машин постоянного тока это поле создается обмоткой возбуждения, питаемой постоянным током. Свойства машин постоянного тока в значительной степени определяются способом включения обмотки возбуждения, т. е. *способом возбуждения*.

По способам возбуждения машины постоянного тока можно классифицировать следующим образом:

*машины независимого возбуждения*, в которых обмотка возбуждения (ОВ) питается постоянным током от источника, электрически не связанного с обмоткой якоря (рис. 1.4, а);

*машины параллельного возбуждения* (шунтовые), в которых обмотка возбуждения и обмотка якоря соединены параллельно (рис. 1.4, б);

*машины последовательного возбуждения* (серийные) (обычно применяемые в качестве двигателей), в которых обмотка возбуждения и обмотка якоря соединены последовательно (рис. 1.4, в);

*машины смешанного возбуждения* (компаундные), в которых имеются две обмотки возбуждения – параллельная ОВ1 и последовательная ОВ2 (рис. 1.4, г);

*машины с возбуждением постоянными магнитами* (рис. 4, д).

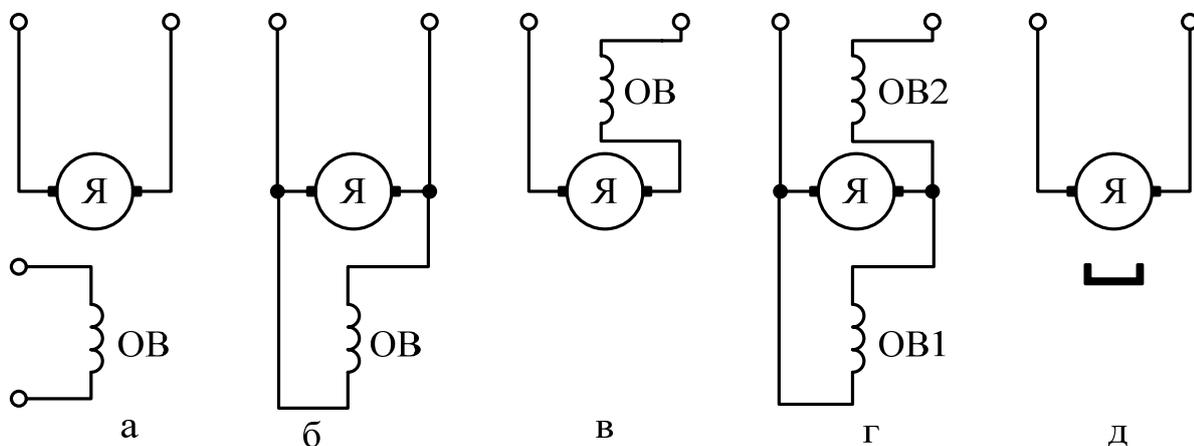


Рис. 1.4. Способы возбуждения машин постоянного тока

Все указанные машины (кроме последних) относятся к машинам с *электромагнитным возбуждением*, поскольку магнитное поле в них создается электрическим током, проходящим в обмотке возбуждения.

### 1.3. Двигатель параллельного возбуждения

Схема включения в сеть двигателя параллельного возбуждения показана на рис. 1.4, б. Характерной особенностью этого двигателя является то, что ток в обмотке возбуждения (ОВ) не зависит от тока нагрузки (тока якоря). Эксплуатационные свойства двигателя определяются его *рабочими характеристиками*, под которыми понимают зависимость частоты вращения  $n$ , тока  $I$ , полезного момента  $M_2$ , вращающего момента  $M$  от мощности на валу двигателя  $P_2$  при  $U = \text{const}$  и  $I_b = \text{const}$  (рис. 1.5).

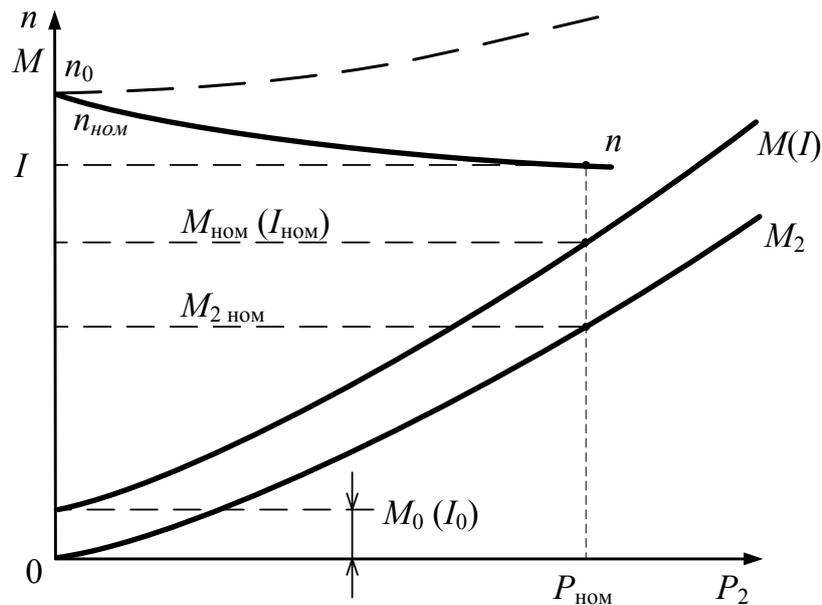


Рис. 1.5. Рабочие характеристики двигателя параллельного возбуждения

Изменение частоты вращения двигателя при переходе от номинальной нагрузки к холостому ходу (х.х.), выраженное в процентах, называют *номинальным изменением частоты вращения*:

$$\Delta n_{\text{НОМ}} = \frac{n_0 - n_{\text{НОМ}}}{n_{\text{НОМ}}} \cdot 100, \quad (1.1)$$

где  $n_0$  – частота вращения двигателя в режиме х.х.

Обычно для двигателей параллельного возбуждения  $\Delta n_{\text{НОМ}} = 2 \dots 8\%$ , поэтому характеристику частоты вращения двигателя параллельного возбуждения называют *жесткой*.

Зависимость полезного момента  $M_2$  от нагрузки установлена формулой  $M_2 = 9,55 P_2 / n$ . При  $n = \text{const}$  график  $M_2 = f(P_2)$  имел бы вид прямой. Однако с увеличением нагрузки частота вращения двигателя снижается, и поэтому зависимость  $M_2 = f(P_2)$  криволинейна.

При  $n = \text{const}$  вращающий момент двигателя  $M = M_0 + M_2$ . Поскольку рабочие характеристики двигателя строят при условии  $I_b = \text{const}$ , что обеспечивает постоянство магнитных потерь в двигателе, то момент х.х.  $M_0 = \text{const}$ . Поэтому график зависимости  $M = f(P_2)$  проходит параллельно кривой  $M_2 = f(P_2)$ . Если принять поток  $\Phi = \text{const}$ , то график  $M_2 = f(P_2)$  является в то же время выражением зависимости  $I = f(P_2)$ , т. к.  $M = c_M \Phi I_a$ .

Частота вращения двигателя прямо пропорциональна напряжению и обратно пропорциональна магнитному потоку возбуждения:

$$n = \frac{U - I_a \sum r}{c_e \Phi}. \quad (1.2)$$

Для получения аналитического выражения *механической характеристики*  $n = f(M)$  преобразуем выражение (1.2):

$$n = \frac{U}{c_e \Phi} - \frac{I_a \sum r}{c_e \Phi}. \quad (1.3)$$

Подставив значение тока якоря

$$I_a = M / (c_M \Phi), \quad (1.4)$$

получим

$$n = \frac{U}{c_e \Phi} - \frac{M \sum r}{c_e c_M \Phi^2} = n_0 - \Delta n, \quad (1.5)$$

где  $n_0$  – частота вращения в режиме х.х.;

$\Delta n$  – изменение частоты вращения, вызванное изменением нагрузки на валу двигателя.

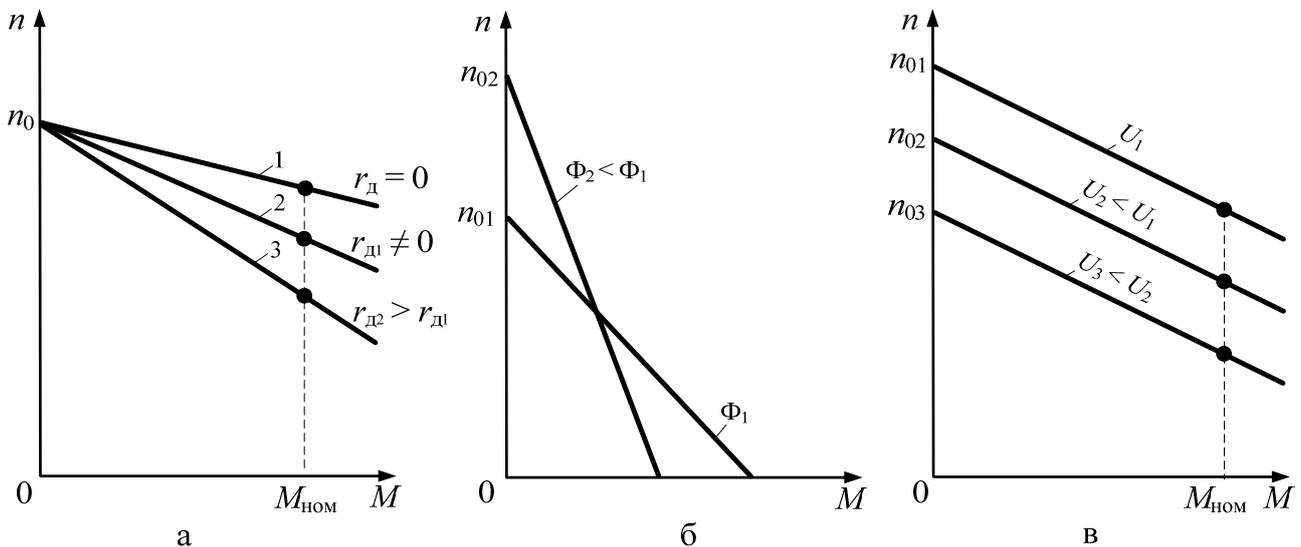


Рис. 1.6. Механические характеристики двигателя параллельного возбуждения: *а* – при введении в цепь якоря добавочного сопротивления; *б* – при изменении основного магнитного потока; *в* – при изменении напряжения в цепи якоря

Если пренебречь реакцией якоря, то (т. к.  $I_B = \text{const}$ ) можно принять  $\Phi = \text{const}$ . Тогда механическая характеристика двигателя параллельного возбуждения представляет собой прямую линию, несколько наклоненную к оси абсцисс (рис. 1.6, *а*). Угол наклона механической характеристики тем больше, чем больше значение сопротивления, включенного в цепь якоря. Механическую характеристику двигателя при отсутствии дополнительного сопротивления в цепи якоря называют *естественной* (прямая 1). Механические характеристики двигателя, полученные при введении дополнительного сопротивления в цепь якоря, называют *искусственными* (прямые 2 и 3).

Вид механической характеристики зависит также и от значения основного магнитного потока  $\Phi$ . Так, при уменьшении  $\Phi$  увеличивается частота вращения х.х.  $n_0$  и одновременно увеличивается  $\Delta n$ , т. е. увеличиваются оба слагаемых уравнения (1.5). Это приводит к резкому увеличению наклона механической характеристики, т. е. к уменьшению ее жесткости (рис. 1.6, б).

При изменении напряжения на якоре  $U$  меняется частота вращения  $n_0$ , а  $\Delta n$  остается неизменной. В итоге жесткость механической характеристики (если пренебречь влиянием реакции якоря) не меняется (рис. 1.6, в), т. е. характеристики смещаются по высоте, оставаясь параллельными друг другу.

Из (1.2) следует, что регулировать частоту вращения двигателя параллельного возбуждения можно изменением сопротивления в цепи якоря, изменением основного магнитного потока  $\Phi$  и изменением напряжения в цепи якоря.

Жесткие механические характеристики и возможность плавного регулирования частоты вращения в широком диапазоне определили области применения двигателей параллельного возбуждения в станочных приводах, вентиляторах, а также во многих других случаях регулируемого электропривода, где требуется устойчивая работа при колебаниях нагрузки.

#### 1.4. Двигатель последовательного возбуждения

В этом двигателе обмотка возбуждения включена последовательно в цепь якоря (см. рис. 1.4, в), поэтому магнитный поток  $\Phi$  в нем зависит от тока нагрузки  $I = I_a = I_b$ . При небольших нагрузках магнитная система машины не насыщена и зависимость магнитного потока от тока нагрузки прямо пропорциональна, т. е.  $\Phi = k_\Phi I_a$ . В этом случае электромагнитный момент

$$M = c_M k_\Phi I_a I_a = c'_M I_a^2.$$

Формула частоты вращения (1.2) примет вид

$$n = \frac{U - I_a \sum r}{c_e k_\Phi I_a} = \frac{U - I_a \sum r}{c'_e I_a}.$$

Здесь  $k_\Phi$  – коэффициент пропорциональности.

На рис. 1.7, а представлены рабочие характеристики  $M = f(I)$  и  $n = f(I)$  двигателя последовательного возбуждения. При больших нагрузках наступает насыщение магнитной системы двигателя. В этом случае магнитный поток при возрастании нагрузки практически не изменяется и характеристики двигателя приобретают почти прямолинейный характер. Характеристика частоты вращения двигателя последовательного возбуждения показывает, что частота вращения двигателя значительно меняется при изменениях нагрузки. Таковую характеристику принято называть *мягкой*.

При уменьшении нагрузки двигателя последовательного возбуждения частота вращения резко увеличивается и при нагрузке меньше 25 % от номинальной может достигнуть опасных для двигателя значений («разнос»). Поэтому

му работа двигателя последовательного возбуждения или его пуск при нагрузке на валу меньше 25 % от номинальной недопустима.

Для более надежной работы вал двигателя последовательного возбуждения должен быть жестко соединен с рабочим механизмом посредством муфты и зубчатой передачи. Применение ременной передачи недопустимо, поскольку при обрыве или сбросе ремня может произойти «разнос» двигателя.

Механические характеристики двигателя последовательного возбуждения  $n = f(M)$  представлены на рис. 1.7, б. Резко падающие кривые механических характеристик (естественная 1 и искусственная 2) обеспечивают двигателю последовательного возбуждения устойчивую работу при любой механической нагрузке. Свойство этих двигателей развивать большой вращающий момент, пропорциональный квадрату тока нагрузки, имеет важное значение, особенно в тяжелых условиях пуска и при перегрузках, поскольку с постепенным увеличением нагрузки двигателя мощность на его входе растет медленнее, чем вращающий момент. Эта особенность двигателей последовательного возбуждения является одной из причин их широкого применения в качестве тяговых двигателей на транспорте, а также в качестве крановых двигателей в подъемных установках, т. е. во всех случаях электропривода с тяжелыми условиями пуска и сочетания значительных нагрузок на вал двигателя с малой частотой вращения.

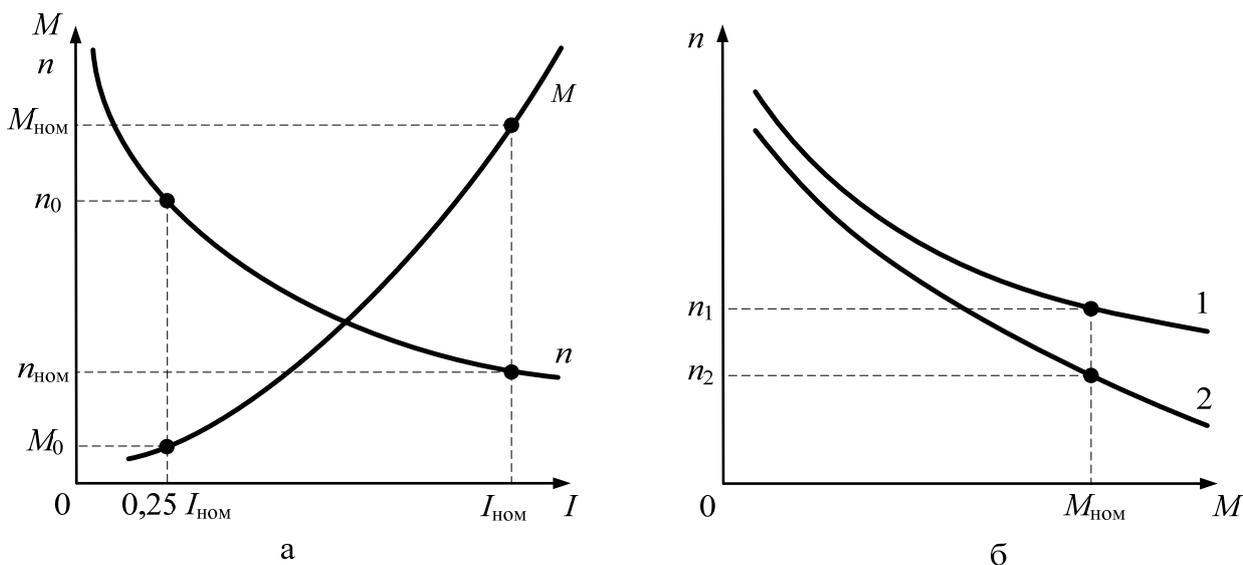


Рис. 1.7. Двигатель последовательного возбуждения:  
 а – рабочие характеристики; б – механические характеристики;  
 1 – естественная характеристика; 2 – искусственная характеристика

Частоту вращения двигателей последовательного возбуждения можно регулировать изменением либо напряжения  $U$ , либо магнитного потока обмотки возбуждения. В первом случае в цепь якоря последовательно включают регулировочный реостат  $R_{\text{рр}}$ . С увеличением сопротивления этого реостата уменьшаются напряжение на входе двигателя и частота его вращения. Этот метод регулирования применяют главным образом в двигателях небольшой мощности.

В случае значительной мощности двигателя этот способ неэкономичен из-за больших потерь энергии в  $R_{\text{рr}}$ . Кроме того, реостат  $R_{\text{рr}}$ , рассчитываемый на рабочий ток двигателя, получается громоздким и дорогостоящим.

Изменение подводимого к двигателю напряжения возможно при питании двигателя от источника постоянного тока с регулируемым напряжением. При уменьшении подводимого к двигателю напряжения его механические характеристики смещаются вниз, практически не меняя своей кривизны (рис. 1.8).

Регулировать частоту вращения двигателя изменением магнитного потока можно тремя способами: шунтированием обмотки возбуждения реостатом  $R_{\text{рr}}$ , секционированием обмотки возбуждения и шунтированием обмотки якоря реостатом  $R_{\text{ш}}$ .

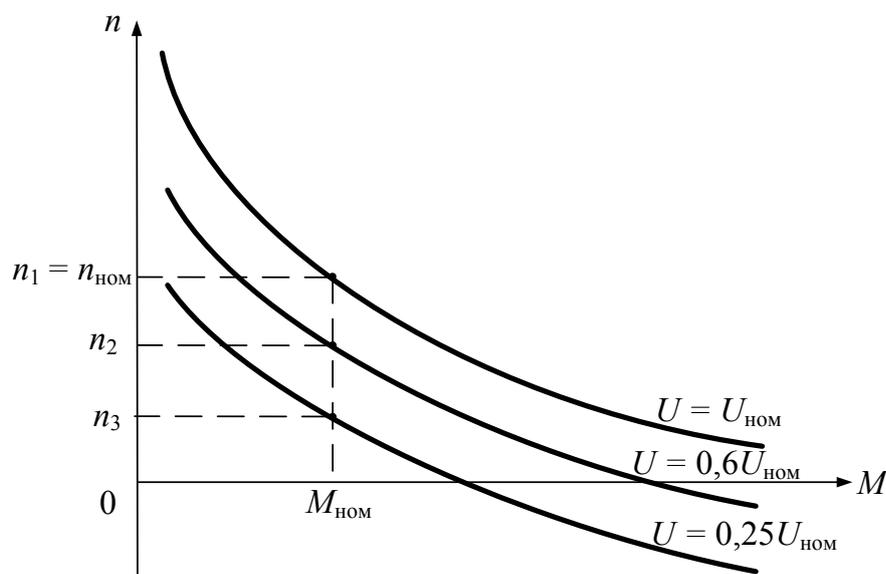


Рис. 1.8. Механические характеристики двигателя последовательного возбуждения при уменьшении подводимого напряжения

### 1.5. Двигатель смешанного возбуждения

Двигатель смешанного возбуждения имеет две обмотки возбуждения: параллельную и последовательную (см. рис. 1.4, з). Частота вращения этого двигателя

$$n = \frac{U - I_a \sum r}{c_e (\Phi_1 \pm \Phi_2)},$$

где  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  — потоки параллельной и последовательной обмоток возбуждения.

Знак плюс соответствует *согласованному* включению обмоток возбуждения (МДС обмоток складываются). В этом случае с увеличением нагрузки общий магнитный поток возрастает (за счет потока последовательной обмотки  $\Phi_2$ ), что ведет к уменьшению частоты вращения двигателя. При *встречном* включении обмоток поток  $\Phi_2$  в случае увеличения нагрузки размагничивает машину (знак минус), что, наоборот, повышает частоту вращения. Работа двигателя при этом становится неустойчивой, поскольку с увеличением нагрузки

частота вращения неограниченно растет. Однако при небольшом числе витков последовательной обмотки с увеличением нагрузки частота вращения не возрастает и во всем диапазоне нагрузок остается практически неизменной.

На рис. 1.9, *а* показаны рабочие характеристики двигателя смешанного возбуждения при согласованном включении обмоток возбуждения, а на рис. 1.9, *б* – механические характеристики. В отличие от механических характеристик двигателя последовательного возбуждения последние имеют более пологий вид.

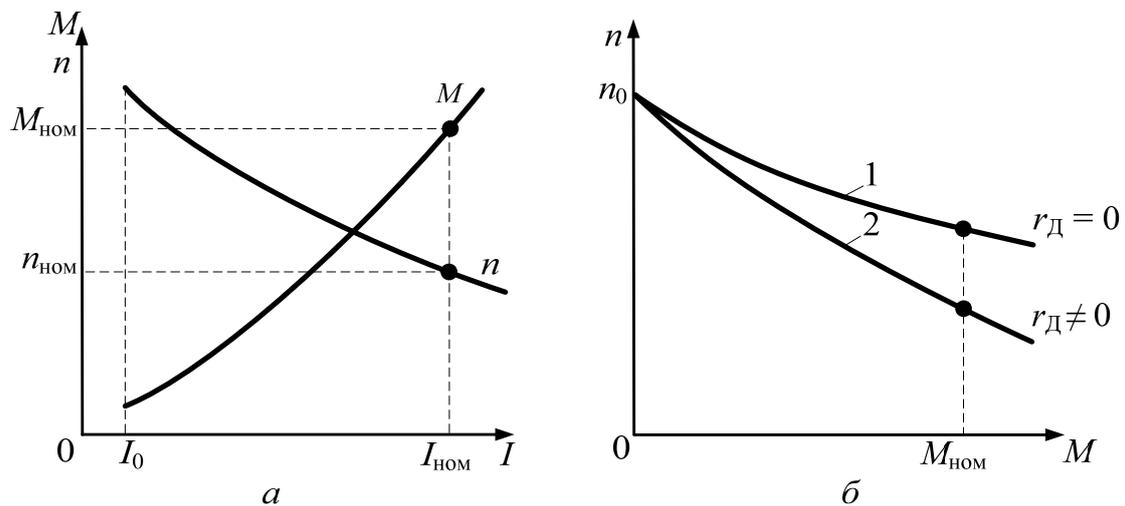


Рис. 1.9. Характеристики двигателя смешанного возбуждения:  
*а* – рабочие; *б* – механические; 1 – естественная характеристика;  
 2 – искусственная характеристика

Следует отметить, что по своей форме характеристики двигателя смешанного возбуждения занимают промежуточное положение между соответствующими характеристиками двигателей параллельного и последовательного возбуждения в зависимости от того, в какой из обмоток возбуждения (параллельной или последовательной) преобладает МДС.

Двигатель смешанного возбуждения имеет преимущества по сравнению с двигателем последовательного возбуждения. Этот двигатель может работать вхолостую, поскольку поток параллельной обмотки  $\Phi_1$  ограничивает частоту вращения двигателя в режиме х.х. и устраняет опасность «разноса». Регулировать частоту вращения этого двигателя можно реостатом в цепи параллельной обмотки возбуждения. Однако наличие двух обмоток возбуждения делает двигатель смешанного возбуждения более дорогостоящим по сравнению с двигателями рассмотренных выше типов, что несколько ограничивает его применение. Двигатели смешанного возбуждения применяют обычно там, где требуются значительные пусковые моменты, быстрое ускорение при разгоне, устойчивая работа и допустимо лишь небольшое снижение частоты вращения при увеличении нагрузки на вал (прокатные станы, грузовые подъемники, насосы, компрессоры).

## 2. Двигатель постоянного тока

### 2.1. Режимы работы

В двигателях параллельного возбуждения при неизменном токе в обмотке возбуждения ( $I_B = \text{const}$ ) магнитный поток изменяется при нагрузке весьма незначительно, поэтому с некоторым приближением можно принять  $\Phi = \text{const}$ . В этом случае электромагнитный момент пропорционален току в цепи якоря и механическая характеристика  $n = f(M)$  может быть представлена зависимостью  $n = f(I_a)$  (рис. 2.1). Если эту характеристику продолжить в обе стороны за пределы осей координат (прямая 1), то можно показать, что электрическая машина в зависимости от величины и знака внешнего момента, действующего на ее вал со стороны связанного с ним механизма, может работать в трех режимах: двигательном, тормозном и генераторном.

При работе двигателя без нагрузки ток в цепи якоря  $I_{a0}$  небольшой. При этом частота вращения  $n = n_0$  (точка А). Затем с появлением на валу двигателя нагрузочного момента, противодействующего вращающему, ток в цепи якоря возрастает, а частота вращения уменьшается. Если увеличить противодействующий момент до значения, при котором якорь двигателя остановится (точка В), то ЭДС  $E_a = 0$  и ток двигателя достигает значения  $I_{ак} = U / \sum r$ . Если двигатель применяют для привода механизма, нагрузочный момент которого может быть больше вращающегося (например, для привода барабана, на который наматывается трос с грузом), то при последующем увеличении нагрузочного момента этого механизма якорь машины вновь начнет вращаться, но теперь уже в другую сторону. Теперь момент, действующий на вал электрической машины со стороны нагрузочного механизма, будет вращающим, а электромагнитный момент машины – тормозящим, т. е. электрическая машина перейдет в тормозной режим. При работе машины в этом режиме ЭДС якоря действует согласованно с напряжением, т. е.  $I_a = (U + E_a) / \sum r$ .

При использовании машины в тормозном режиме необходимо принять меры для ограничения тока якоря. С этой целью в цепь якоря включают дополнительное сопротивление, величина которого обеспечивает получение искусственной характеристики двигателя, пересекающейся с осью абсцисс при токе якоря  $I_{а\text{ном}} < I_{ак}$  (штриховая прямая).

Если при работе двигателя в режиме х.х. к его валу приложить момент, направленный в сторону вращения якоря, то частота вращения, а следовательно, и ЭДС  $E_a$  начнут возрастать. Когда ЭДС  $E_a = U$ , машина не будет потреблять тока из сети (точка С) и частота вращения якоря достигает значения, называемого *пограничной частотой вращения*  $n_{х.х.}$

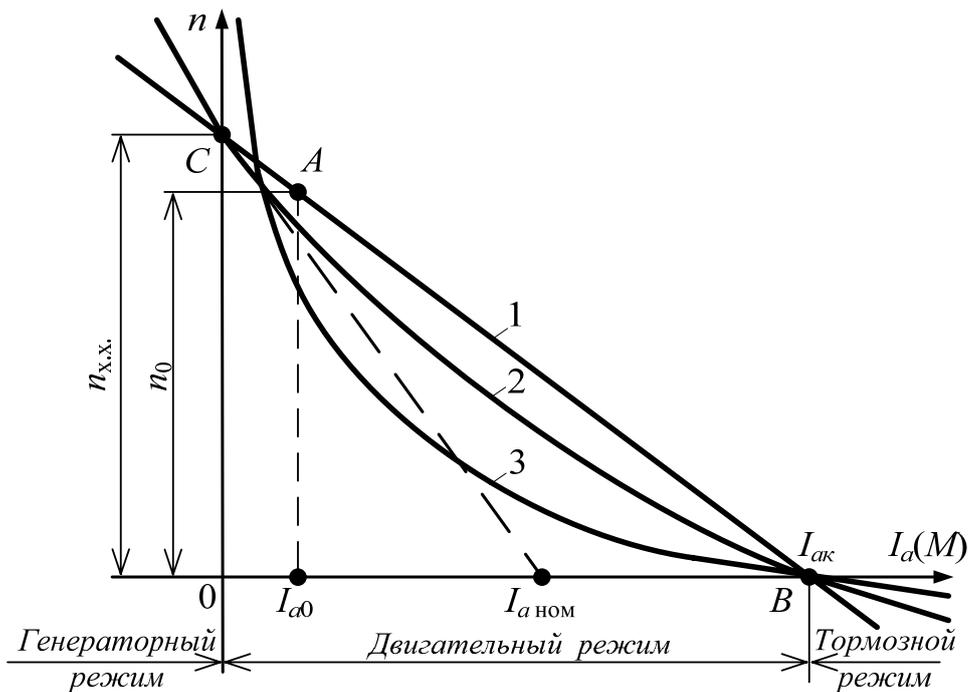


Рис. 2.1. Режимы работы машины постоянного тока:  
 1 – с параллельным (независимым) возбуждением; 2 – со смешанным возбуждением; 3 – с последовательным возбуждением

При дальнейшем увеличении внешнего момента на валу машины ЭДС  $E_a$  станет больше напряжения, а в цепи якоря опять возникает ток, но другого направления. При этом машина перейдет в *генераторный* режим: механическая энергия, затрачиваемая на вращение якоря, будет преобразовываться в электрическую и поступать в сеть.

Перевод машины из двигательного в генераторный режим используют для торможения двигателя, поскольку в генераторном режиме электромагнитный момент является тормозящим (рекуперативное торможение).

## 2.2. Пуск двигателя

В процессе работы двигателя постоянного тока его якорь вращается в магнитном поле. В обмотке якоря индуцируется ЭДС  $E_a$ , направление которой можно определить по правилу «правой руки». По своей природе она не отличается от ЭДС, наводимой в обмотке якоря генератора. В двигателе же ЭДС направлена против тока якоря  $I_a$ , и поэтому ее называют *противоэлектродвижущей* силой (противо-ЭДС) якоря.

Для двигателя, работающего с постоянной частотой вращения,

$$U = E_a + I_a \sum r. \quad (2.1)$$

Из (2.1) следует, что подведенное к двигателю напряжение уравновешивается противо-ЭДС обмотки якоря и падением напряжения в цепи якоря. На основании (2.1) ток якоря определяется как

$$I_a = \frac{U - E_a}{\sum r}.$$

Если принять  $U$  и  $\sum r$  неизменными, то ток  $I_a$  зависит от противо-ЭДС  $E_a$ . Наибольшего значения ток  $I_a$  достигает при пуске двигателя в ход. В начальный момент пуска якорь двигателя неподвижен ( $n = 0$ ) и в его обмотке не индуцируется ЭДС ( $E_a = 0$ ). Поэтому при непосредственном подключении двигателя к сети в обмотке его якоря возникает пусковой ток

$$I'_a = U / \sum r.$$

Обычно сопротивление  $\sum r$  невелико, поэтому значение пускового тока  $I_{\text{п}}$  достигает больших значений по сравнению с номинальным током двигателя ( $I_{\text{п}} / I_{\text{ном}} = 3 \dots 15$ ). Меньшая кратность пускового тока относится к двигателям малой мощности (до 600–1000 Вт), большая – к двигателям средней мощности.

Такой большой пусковой ток весьма опасен для двигателя. Во-первых, он может вызвать в машине круговой огонь, а во-вторых, при таком токе в двигателе развивается чрезмерно большой пусковой момент, который оказывает ударное действие на вращающиеся части двигателя и может механически их разрушить. И наконец, этот ток вызывает резкое падение напряжения в сети, что неблагоприятно отражается на работе других потребителей, включенных в эту сеть. Поэтому пуск двигателя непосредственным подключением в сеть (*безреостатный пуск*) обычно применяют для двигателей мощностью не более 0,7–1,0 кВт. В этих двигателях благодаря повышенному сопротивлению обмотки якоря и небольшим вращающимся массам значение пускового тока лишь в 3–5 раз превышает номинальный, что не представляет опасности для двигателя. Что же касается двигателей большей мощности, то при их пуске для ограничения пускового тока используют пусковые реостаты (ПР), включаемые последовательно в цепь якоря (*реостатный пуск*).

В начальный момент времени цепь якоря двигателя подключают к сети через наибольшее сопротивление реостата  $r_{\text{п.р}} = r_1 + r_2 + r_3$ . Одновременно к сети подключается и обмотка возбуждения, напряжение на которой во время пуска не меняют.

Пусковой ток якоря при полном сопротивлении пускового реостата равен

$$I_{\text{п}} = \frac{U - E_a}{\sum r + r_{\text{п.р}}}.$$

С появлением тока в цепи якоря  $I_{\text{п max}}$  возникает пусковой момент  $M_{\text{п max}}$ , под действием которого начинается вращение якоря. По мере нарастания частоты вращения увеличивается противо-ЭДС  $E_a = c_e \Phi n$ , что ведет к уменьшению пускового тока и пускового момента.

По мере разгона якоря двигателя сопротивление пускового реостата уменьшают. При  $r_{п.р} = 0$  пуск двигателя заканчивается. Сопротивление пускового реостата выбирают обычно таким, чтобы наибольший пусковой ток превышал номинальный не более чем в 2–3 раза.

На рис. 2.2 показана модель системы, обеспечивающей пуск двигателя с помощью трехступенчатого пускового устройства (схема блока *Motor Starter* представлена на рис. 2.3). На рис. 2.4 показаны графики изменения скорости и электромагнитного момента двигателя в функции времени и динамическая механическая характеристика машины, построенная с помощью блока *XY-Graph*. В рассматриваемой системе момент сопротивления движению пропорционален скорости вращения вала двигателя (задается с помощью усилителя *Gain*, блок *BL* на рис. 2.2).

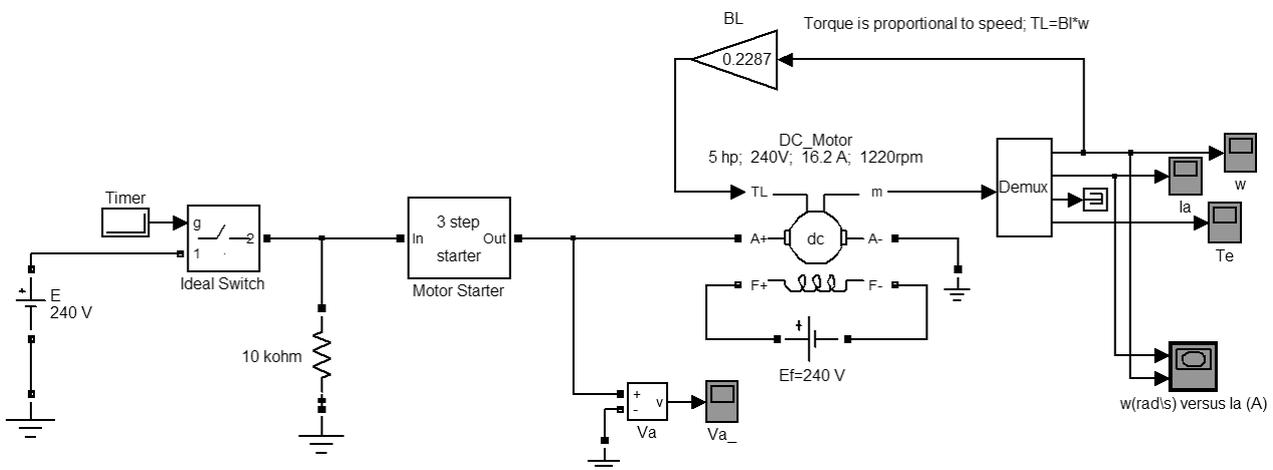


Рис. 2.2. Схема, обеспечивающая пуск двигателя с помощью трехступенчатого пускового устройства

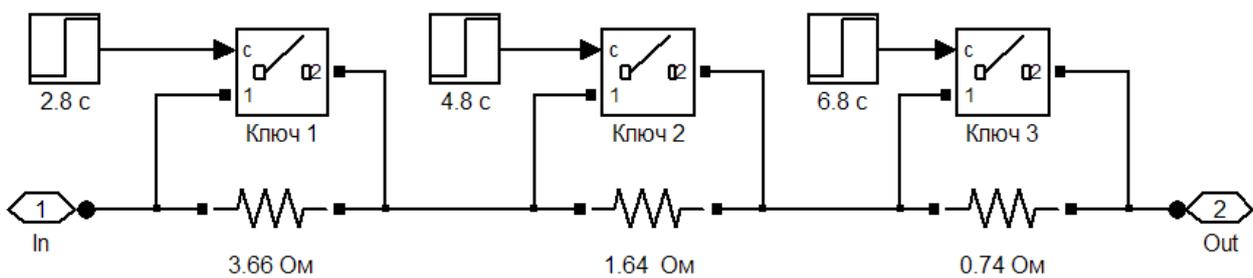


Рис. 2.3. Схема трехступенчатого пускового устройства

Для настройки пускового устройства (рис. 2.3) можно воспользоваться следующей методикой. Сначала подбирается такое суммарное добавочное сопротивление  $r_{\Sigma} = r_1 + r_2 + r_3$ , при котором ток якоря достигает значения в 2–3 раза больше номинального (рис. 2.4, а). Затем выбирается время срабатывания  $t_1$  первого ключа (например, в тот момент, когда ток якоря достигает номинального значения). После замыкания первого ключа пусковой ток снова воз-

растает, при этом следует подобрать такие значения  $r_1$  и  $r_2 + r_3$ , чтобы ток якоря достиг того же максимального значения. Значение  $r_\Sigma$  меняться не должно, а значит, следует *перераспределить* сопротивление между  $r_1$  и  $r_2 + r_3$ . После этого последовательно подбирается  $t_2$ , перераспределяется сопротивление между  $r_2$  и  $r_3$  и подбирается  $t_3$ .

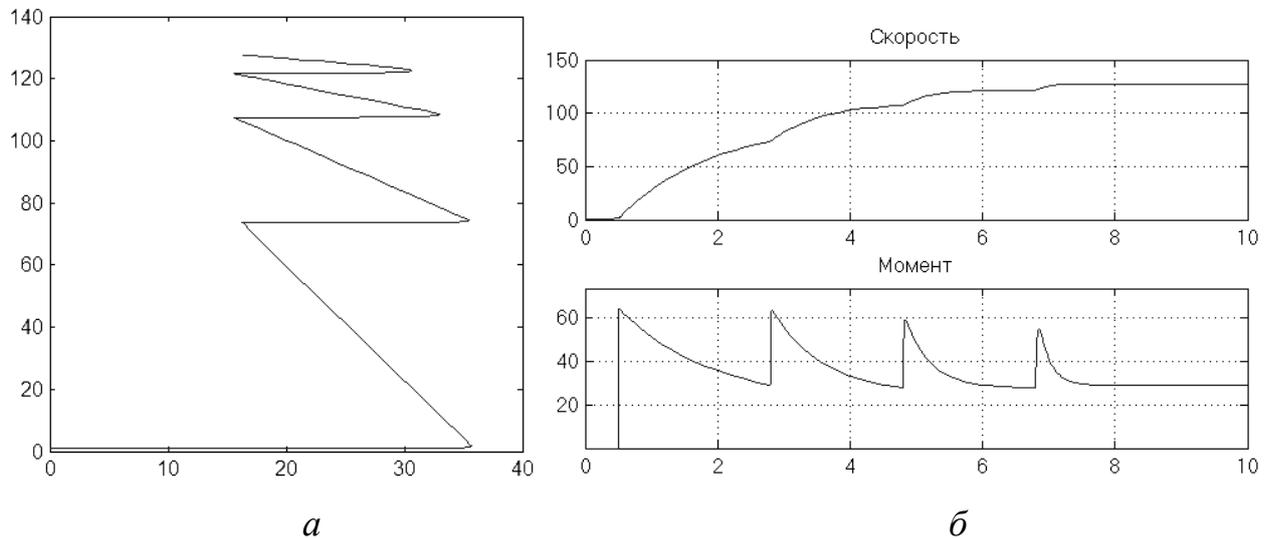


Рис. 2.4. Динамическая механическая характеристика ИД (а) и графики изменения скорости и электромагнитного момента двигателя (б) во время пуска

Для пуска двигателей большей мощности применять пусковые реостаты нецелесообразно, поскольку это вызвало бы значительные потери энергии. Кроме того, пусковые реостаты были бы громоздкими. Поэтому в двигателях большой мощности применяют безреостатный пуск двигателя путем понижения напряжения. Примерами этого являются пуск тяговых двигателей электроваза их переключением с последовательного соединения при пуске на параллельное при нормальной работе или пуск двигателя в схеме «генератор–двигатель».

### 2.3. Коэффициент полезного действия

Коэффициент полезного действия электрической машины представляет собой отношение мощностей: отдаваемой (полезной)  $P_2$  к подводимой (потребляемой)  $P_1$ :

$$\eta = P_2 / P_1, \quad (2.2)$$

Полезная мощность (*мощность на выходе машины*) определяется по формуле

$$P_2 = M_2 \cdot \omega, \quad (2.3)$$

где  $M_2$  – момент нагрузки (момент на валу), Нм;

$\omega$  – скорость двигателя, рад/с.

Потребляемая двигателем с независимым возбуждением мощность (*мощность на входе машины*) рассчитывается по формуле

$$P_1 = U_{\text{я}} \cdot I_{\text{я}} + U_{\text{оп}} \cdot I_{\text{оп}}, \quad (2.4)$$

Здесь и далее индекс Я соответствует цепи якоря, а индекс ОП – обмотке полюсов электрической машины.

Обычно КПД машин постоянного тока составляет 0,75–0,90 для машин мощностью от 1 до 100 кВт и 0,9–0,97 для машин мощностью свыше 100 кВт. Намного меньше КПД машин постоянного тока малой мощности. Например, для машин мощностью от 5 до 50 Вт  $\eta = 0,15 \dots 0,50$ . КПД двигателей мощностью от 100 до 1000 Вт составляет 0,50–0,80.

Указанные значения КПД соответствуют номинальной нагрузке машины. Зависимость КПД машины постоянного тока от нагрузки выражается графиком  $\eta = f(P_2)$ , форма которого характерна для электрических машин (рис. 2.5).

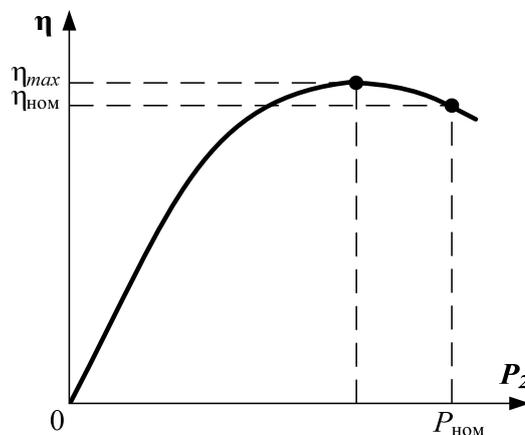


Рис. 2.5. Зависимость  $\eta = f(P_2)$

#### 2.4. Работа от сети переменного тока

Коллекторный двигатель постоянного тока может работать от сети переменного тока, поскольку при переходе от положительного полупериода переменного напряжения к отрицательному направление электромагнитного момента сохраняется неизменным. Объясняется это тем, что при переходе к отрицательному полупериоду почти одновременно с изменением направления тока в обмотке якоря меняется направление тока в обмотке возбуждения, т. е. меняется полярность полюсов (рис. 2.6).

Коллекторные двигатели, которые могут работать как от сети постоянного, так и от сети однофазного переменного тока, называют *универсальными*.

Однофазные коллекторные двигатели имеют преимущественно последовательное возбуждение. Применение параллельного возбуждения (рис. 2.6, а) в данном случае ограничивается значительной индуктивностью параллельной обмотки возбуждения, имеющей большое число витков. Это создает значительный фазовый сдвиг между током якоря  $\dot{I}_a$  и током возбуждения  $\dot{I}_b$  на угол  $\psi$  (рис. 2.6, б).

В двигателе последовательного возбуждения (рис. 2.6, в) ток якоря  $\dot{I}_a$  и ток возбуждения  $\dot{I}_b$  совпадают по фазе:  $\psi = 0$  (рис. 2.6, з). Поэтому среднее значение электромагнитного вращающего момента в двигателе последовательного возбуждения  $M_{\text{посл}}$  больше, чем в двигателе параллельного возбуждения.

Электромагнитный момент двигателя последовательного возбуждения при работе от сети переменного тока имеет постоянную составляющую  $M_{\text{пост}}$  (рис. 2.6, д) и переменную составляющую  $M_{\text{пер}}$ , изменяющуюся с частотой, равной удвоенной частоте сети  $f_1$  (рис. 2.6, е). Результирующий момент этого двигателя является пульсирующим  $M_{\sim} = M_{\text{посл}}$  (рис. 2.6, ж):  $M_{\sim} = M_{\text{пост}} + (-M_{\text{пер}})$ . Небольшие участки графика  $M = f(t)$  с отрицательным (тормозящим) моментом обусловлены фазовым сдвигом между векторами магнитного потока  $\dot{\Phi}_{\text{max}}$  и током  $\dot{I}_1$  (рис. 2.6, з). Пульсации момента  $M_{\sim}$  практически не нарушают работу двигателя, включенного в сеть переменного тока, поскольку сглаживаются за счет момента инерции вращающегося якоря.

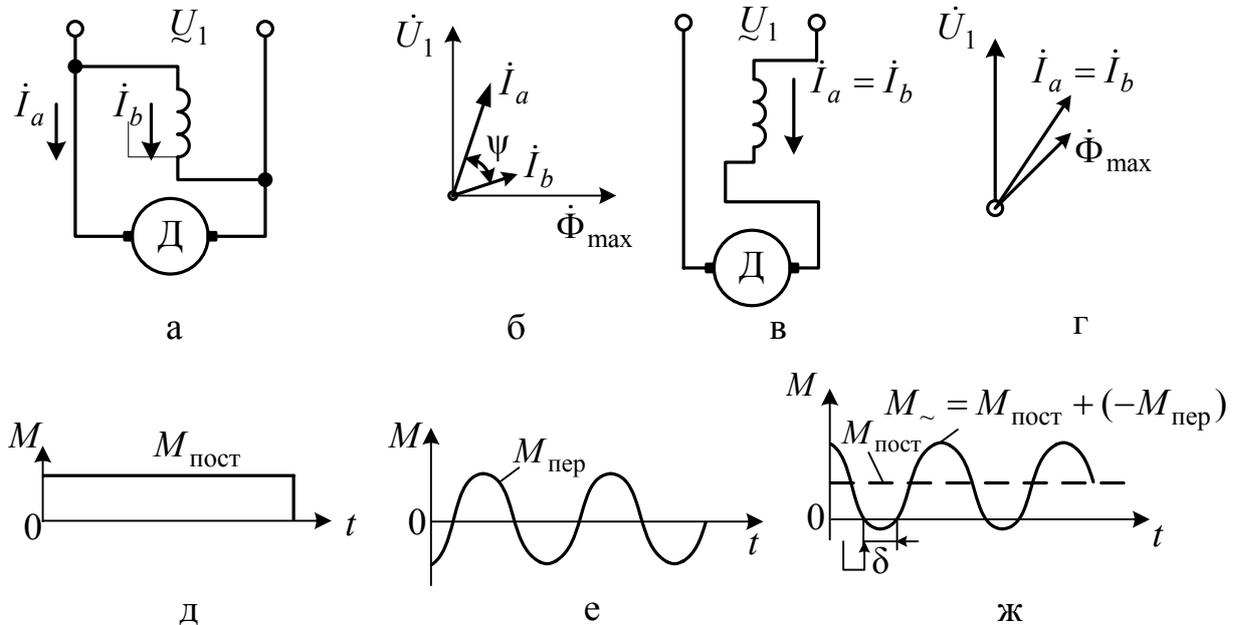


Рис. 2.6. Принцип работы универсального коллекторного двигателя

Основной недостаток однофазных коллекторных двигателей – тяжелые условия коммутации. Дело в том, что в коммутирующих секциях помимо реактивной ЭДС и ЭДС внешнего поля наводится трансформаторная ЭДС  $e_{\text{тр}}$ , действующее значение которой  $E_{\text{мп}} = 4,4 f_1 w_c \Phi_{\text{max}}$ . Данная ЭДС наводится переменным магнитным потоком возбуждения, сцепленным с коммутирующими секциями. Для уменьшения трансформаторной ЭДС необходимо уменьшить поток  $\Phi_{\text{max}}$ , а чтобы мощность двигателя при этом осталась прежней, следует увеличить число полюсов в двигателе.

В универсальном коллекторном двигателе стремятся получить примерно одинаковые частоты вращения при номинальной нагрузке как на постоянном, так и на переменном токе. Достигается это тем, что обмотку возбуждения двигателя выполняют с ответвлениями: при работе двигателя от сети постоянного тока обмотка возбуждения используется полностью, а при работе от сети переменного тока – частично.

Расхождения в характеристиках двигателя постоянного и переменного тока объясняются тем, что при работе от сети переменного тока на величину и фазу тока оказывают влияние индуктивные сопротивления обмоток якоря и возбуждения. Однако уменьшение числа витков обмотки возбуждения обеспечивает сближение характеристик лишь при нагрузке, близкой к номинальной.

Наличие щеточно-коллекторного узла является причиной ряда недостатков универсальных коллекторных двигателей, особенно при их работе на переменном токе (искрение на коллекторе, радиопомехи, повышенный шум, невысокая надежность). Однако эти двигатели по сравнению с асинхронными и синхронными при частоте питающего напряжения  $f_1 = 50$  Гц позволяют получать частоту вращения до 10000 об/мин и более (наибольшая синхронная частота вращения при  $f_1 = 50$  Гц равна 3000 об/мин).

Потребляемый двигателем ток при работе от сети переменного тока больше, чем при работе этого же электродвигателя от сети постоянного тока, поскольку переменный ток помимо активной имеет еще и реактивную составляющую. Коэффициент полезного действия универсальных двигателей при переменном токе ниже, чем при постоянном, что вызвано повышенными магнитными потерями. Области применения универсальных коллекторных двигателей достаточно широки: их применяют в автоматике, для привода различного электроинструмента, бытовых электроприборов и др.

### **3. Коммутация в машинах постоянного тока**

#### **3.1. Коммутация в коллекторных машинах**

При работе машины постоянного тока щетки и коллектор образуют скользящий контакт. Площадь контакта щетки выбирают по значению рабочего тока машины, приходящегося на одну щетку, в соответствии с допустимой плотностью тока для выбранной марки щеток. Если по какой-то причине щетка прилегает к коллектору не всей поверхностью, то возникают чрезмерные местные плотности тока, приводящие к искрению на коллекторе.

При вращении якоря машины постоянного тока коллекторные пластины поочередно вступают в соприкосновение со щетками. При этом переход щетки с одной пластины (сбегающей) на другую (набегающую) сопровождается переключением секции обмотки из одной параллельной ветви в другую и изменением как значения, так и направления тока в этой секции. Процесс переключения секции из одной параллельной ветви в другую и сопровождающие его явления называются *коммутацией*.

Работа двигателя постоянного тока обычно сопровождается искрением между коллектором и щетками. Если искрение слишком интенсивное, то это вызывает подгорание пластин коллектора и щеток; эксплуатация двигателя при интенсивном искрении создает пожароопасность.

В двигателях постоянного тока мощностью до 600 Вт процесс коммутации не сопровождается значительным искрением, поэтому специальных мер для улучшения коммутации в таких двигателях не применяют. В двигателях большой мощности (до 1 кВт) для улучшения коммутации щетки смещают с геометрической нейтрали в направлении, встречном вращению якоря, на угол, при котором искрение минимально. Такой способ неприменим для реверсируемых двигателей, которые работают с изменением направления вращения. В двигателях мощностью 1 кВт и более для улучшения коммутации применяют добавочные полюсы, расположенные между главными полюсами. Обмотку добавочных полюсов включают последовательно с обмотками якоря, это обеспечивает удовлетворительную коммутацию в широком диапазоне нагрузки двигателя.

При выпуске готовой машины с завода в ней настраивают *темную коммутацию*, исключаящую какое-либо искрение. Однако в процессе эксплуатации машины, по мере износа коллектора и щеток, возможно появление искрения. Обычно небольшое искрение в машинах общего назначения допустимо.

Согласно установленным требованиям, искрение на коллекторе оценивается степенью искрения (классом коммутации) под сбегаящим краем щетки.

Степень 1 – искрения нет (темная коммутация).

Степень 1¼ – слабое искрение под небольшой частью щетки, не вызывающее почернения коллектора и появления нагара на щетках.

Степень 1½ – слабое искрение под большей частью щетки, приводящее к появлению следов почернения на коллекторе, легко устранимого протиранием поверхности коллектора бензином, и следов нагара на щетках.

Степень 2 – искрение под всем краем щетки. Допускается только при кратковременных толчках нагрузки и при перегрузке. Приводит к появлению следов почернения на коллекторе, не устранимых протиранием поверхности коллектора бензином, а также следов нагара на щетках.

Степень 3 – значительное искрение под всем краем щетки с появлением крупных вылетающих искр, приводящее к значительному почернению коллектора, не устранимому протиранием поверхности коллектора бензином, а также к подгару и разрушению щеток. Допускается только для моментов прямого (безреостатного) включения или реверсирования машин, если при этом коллектор и щетки остаются в состоянии, пригодном для дальнейшей работы.

Если допустимая степень искрения в паспорте электрической машины не указана, то при номинальной нагрузке она не должна превышать 1½.

### 3.2. Защита обмотки якоря

При значительных перегрузках или внезапном коротком замыкании машины постоянного тока коммутация приобретает резко замедленный характер. В этом случае между сбегавшей коллекторной пластиной и сбегавшим краем щетки возникает электрическая дуга. Т. к. коллектор вращается, то дуга механически растягивается. Наряду с этим перегрузка машины сопровождается усилением реакции якоря, под действием которой распределение индукции в воздушном зазоре машины становится неравномерным. В результате напряжение между соседними коллекторными пластинами увеличивается, превышая допустимые пределы. Это, с одной стороны, может привести к возникновению электрических дуг между смежными пластинами, а с другой стороны, появление высокого потенциала на некоторых пластинах вызывает резкое повышение напряжения между щеткой и коллекторными пластинами по мере их удаления от сбегавшего края щетки. Все это создает условия для возникновения электрической дуги между щеткой и коллекторными пластинами.

Таким образом, в условиях значительной перегрузки в машине постоянного тока появляются коммутационные и потенциальные причины для возникновения электрической дуги на коллекторе. При этом электрические дуги, вызванные коммутационными причинами, сливаются с дугами, вызванными потенциальными причинами, образуя вокруг коллектора мощную электрическую дугу, которая может перекинуться также и на корпус машины. Описанное явление называется *круговым огнем* по коллектору. Круговой огонь очень опасен, поскольку может привести к тяжелой аварии машины, включая возникновение в машине пожара.

Для защиты обмотки якоря от повреждения электрической дугой в случае возникновения кругового огня в электрических машинах, работающих в условиях частых перегрузок, между коллектором и обмоткой на якоре устанавливают изолирующий экран. В некоторых машинах применяют воздушное дутье, сдувающее дугу в сторону подшипника, защищенного теплостойкой изоляционной перегородкой. Для создания препятствия на пути распространения дуги между щетками разной полярности устанавливают барьеры из изоляционного материала.

### 3.3. Радиопомехи и способы их подавления

При неудовлетворительной коммутации коллекторная машина становится источником радиопомех, ухудшающих качество радиоприема, а иногда делающих его невозможным, поэтому уровень промышленных радиопомех не должен превышать значений, определяемых действующими нормами.

Радиопомехи распространяются двумя путями: по эфиру (электромагнитное излучение) и через электросеть. Для подавления помех, распространяемых по эфиру, электрические машины экранируют. В качестве экрана используют заземленный корпус машины. Если со стороны коллектора в машине имеются

окна, то их следует закрыть металлическим колпаком или сеткой, обеспечив им надежный контакт с корпусом машины.

Для подавления помех, проникающих от машины в сеть, применяют симметрирование обмоток и включение фильтров. Симметрирование обмоток состоит в том, что каждую обмотку, включенную последовательно в цепь якоря, разделяют на две равные части и присоединяют симметрично к щеткам разной полярности.

Применение фильтров – основной способ подавления радиопомех. Для большинства машин достаточно установить емкостный фильтр в виде конденсаторов, включаемых между каждым токнесущим проводом и корпусом машины (рис. 3.1).

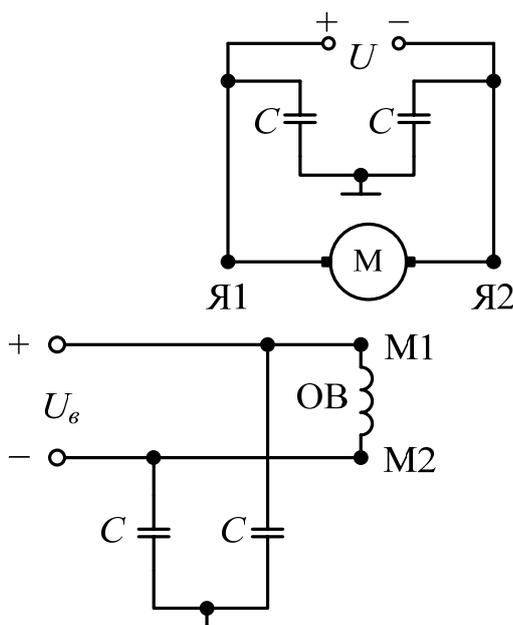


Рис. 3.1. Схема включения помехозащитного фильтра

Значение емкости конденсаторов подбирают опытным путем, при этом они должны быть рассчитаны на рабочее напряжение машины. Для фильтров предпочтительны конденсаторы, у которых одним из зажимов является металлическая оболочка, прикрепляемая непосредственно к корпусу машины.

## 4. Исполнительный двигатель постоянного тока

### 4.1. Назначение и предъявляемые требования

*Исполнительные двигатели постоянного тока (ИДПТ)* предназначены для преобразования электрического сигнала (напряжения управления) в угловое механическое перемещение вала в системах автоматики. Помимо обычных требований, предъявляемых к электродвигателям общего назначения, к исполнительным двигателям предъявляется ряд специфических требований, из которых основными являются отсутствие самохода и малоинерционность.

Почти все исполнительные двигатели (исключение составляют лишь двигатели с постоянными магнитами) имеют две обмотки. Одна из них постоянно подключена к сети и называется *обмоткой возбуждения*, на другую – *обмотку управления* – электрический сигнал подается лишь тогда, когда необходимо вызвать вращение вала. От напряжения управления зависят частота вращения и вращающий момент исполнительного двигателя, а, следовательно, и развиваемая им механическая мощность.

Исполнительные двигатели постоянного тока по конструкции отличаются от двигателей постоянного тока общего назначения только тем, что имеют шихтованные (набранные из листов электротехнической стали) якорь, станину и полюсы, что необходимо для работы исполнительных двигателей в переходных режимах. Магнитная цепь исполнительных двигателей не насыщена, поэтому реакция якоря практически не влияет на их рабочие характеристики.

В качестве исполнительных двигателей постоянного тока в настоящее время используют чаще всего двигатели с независимым возбуждением, реже – двигатели с постоянными магнитами. У двигателей с независимым возбуждением в качестве обмотки управления используют либо обмотку якоря – двигатели с *якорным управлением* (рис. 4.1, а), либо обмотку полюсов – двигатели с *полюсным управлением* (рис. 4.1, б).

В современных автоматических устройствах чаще используется якорное управление. Полюсное управление имеет ограниченное распространение – только лишь для двигателей весьма малой мощности.

При анализе работы исполнительных двигателей постоянного тока (ИДПТ), вследствие особенностей их конструкции, насыщением магнитной цепи и размагничивающим действием реакции якоря пренебрегают и считают, что магнитный поток полюсов пропорционален току в полюсной обмотке и не зависит от нагрузки двигателя.

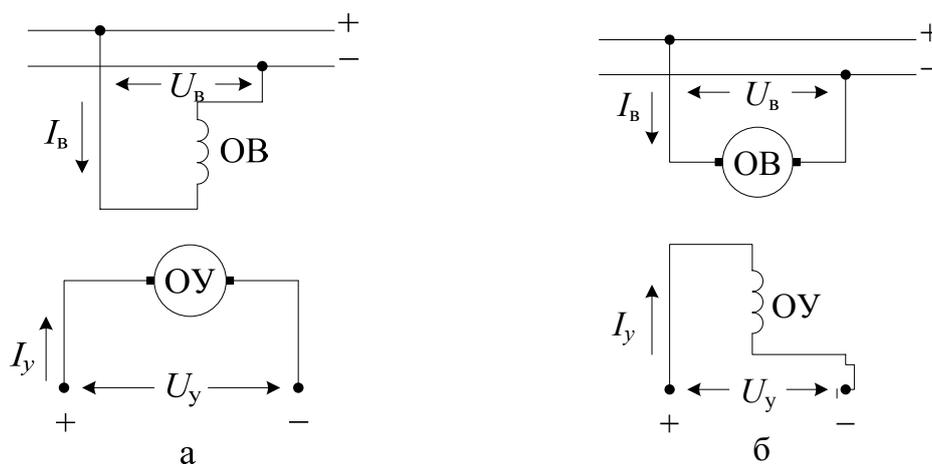


Рис. 4.1. Схемы управления исполнительным двигателем постоянного тока:  
а – якорное управление; б – полюсное управление

При математическом описании рабочих свойств исполнительных двигателей обычно пользуются системой относительных единиц. В этой системе действительные величины: момент, мощность, скорость вращения и напряжение управления – выражают через отношения их к некоторым постоянным величинам, принятым за единичные. В случае применения относительных единиц характеристики исполнительных двигателей становятся универсальными. Они не зависят от номинальных величин двигателей и их конструктивных особенностей.

При оценке эксплуатационных свойств исполнительных двигателей непрерывного действия используют следующие характеристики.

*Механические характеристики* – зависимость электромагнитного момента от частоты вращения  $m = f(v)$  при напряжении управления (коэффициенте сигнала)  $\alpha = \text{const}$ ; обычно эти характеристики строят для ряда значений коэффициента сигнала  $\alpha = 0,25; 0,50; 0,75$  и  $1,0$ , получая, таким образом, семейство механических характеристик, построенных в одних осях координат.

*Регулировочные характеристики* – зависимости частоты вращения от напряжения управления (коэффициент сигнала)  $v = f(\alpha)$  при электромагнитном моменте  $m = \text{const}$ ; построив эти характеристики для ряда значений момента  $m = 0; 0,25; 0,50$  и  $0,75$  получают семейство регулировочных характеристик.

Зависимость полной механической мощности от частоты вращения  $p_2 = f(v)$  при  $\alpha = \text{const}$ ; построив эти характеристики для значений коэффициента сигнала  $\alpha = 0,25; 0,50; 0,75$  и  $1,0$ , получают семейство характеристик механической мощности.

## 4.2. Якорное управление

У исполнительных двигателей с якорным управлением обмоткой возбуждения является обмотка полюсов, а обмоткой управления – обмотка якоря (рис. 4.1, а). Обмотку возбуждения подключают к сети с постоянным напряжением  $U_B = U_{B.H}$  (номинальное напряжение на обмотке возбуждения) на все время работы автоматического устройства. На обмотку управления подают сигнал (напряжение управления) лишь тогда, когда необходимо вызвать вращение якоря двигателя. От напряжения управления зависят вращающий момент и частота вращения двигателя. При отсутствии напряжения управления якорь двигателя неподвижен. При изменении полярности напряжения управления меняется направление вращения якоря.

Для исполнительного двигателя постоянного тока с якорным управлением можно получить следующее уравнение механической характеристики в относительных единицах:

$$v = \alpha - m, \quad (4.1)$$

где  $v$  – скорость двигателя в относительных единицах;

$\alpha$  – напряжение управления в относительных единицах;

$m$  – вращающий момент двигателя в относительных единицах.

Коэффициент управляющего сигнала (напряжение управления) представляет собой отношение напряжения управления  $U_y$  к напряжению возбуждения  $U_B$  в относительных единицах и определяется по формуле

$$\alpha = \frac{u_y}{u_B} = \frac{U_y / U_{y.H}}{U_B / U_{B.H}}, \quad (4.2)$$

где  $u_y$  и  $u_B$  – напряжение управления и напряжение возбуждения в относительных единицах;

Здесь и далее индекс «н» означает номинальные значения.

Момент двигателя определяется по формуле

$$m = \frac{M}{M_{\Pi}},$$

где  $M_{\Pi}$  – пусковой момент двигателя при  $U_y = U_{y.H}$ ,  $U_B = U_{B.H}$  ( $\alpha = 1$ ).

Скорость двигателя определяется по формуле

$$v = \frac{n}{n_0},$$

где  $n_0$  – скорость идеального холостого хода при  $m = 0$  и  $\alpha = 1$ .

Механические характеристики исполнительного двигателя с якорным управлением являются линейными. На рис. 4.2, а представлено семейство относительных механических характеристик  $v = f(m)$  при  $\alpha = \text{const}$ , построенных на основании уравнения (4.1) для различных значений коэффициента сигнала  $\alpha$ .

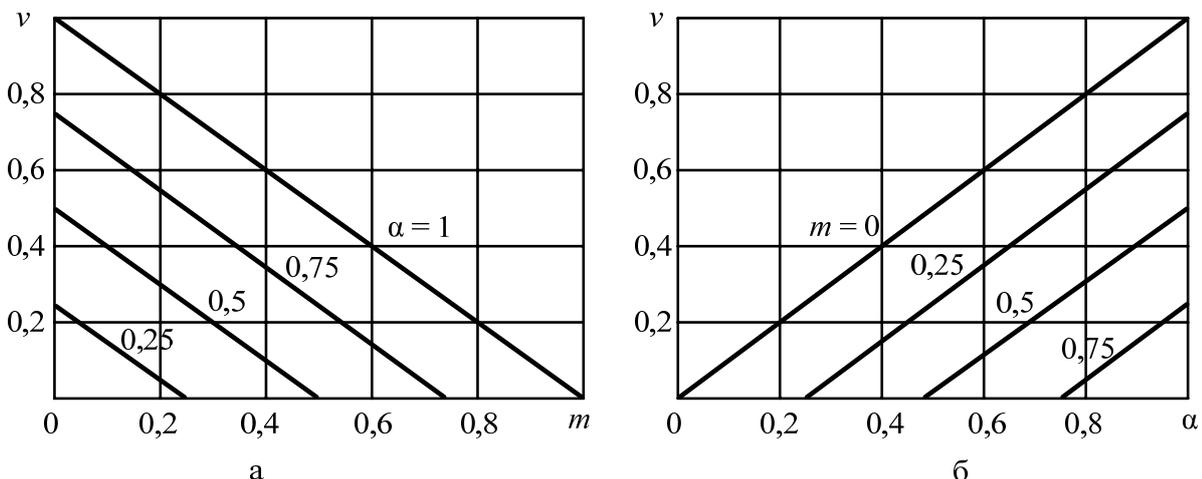


Рис. 4.2. Характеристики двигателя при якорном управлении:  
а – механические; б – регулировочные

Скорость идеального холостого хода двигателя  $n_0$  определить опытным путем невозможно, поскольку нельзя разгрузить двигатель до момента, равного нулю. При холостом ходе двигателя существуют потери, покрываемые за

счет хотя и малого, но все же конечного по величине электромагнитного момента. Эту скорость можно рассчитать по формуле (4.3), используя экспериментальные данные:

$$n_0 = n \frac{U_{y.н}}{U_{y.н} - I_y R_y}, \quad (4.3)$$

где  $R_y$  – сопротивление цепи управления (цепи якоря двигателя);

$n$  и  $I_y$  – скорость вращения и ток якоря, измеренные при некоторой нагрузке двигателя и  $\alpha = 1$ .

Регулировочной характеристикой исполнительного двигателя является зависимость  $v = f(\alpha)$  при  $m = \text{const}$ .

Уравнение регулировочной характеристики при якорном управлении двигателя  $v = f(\alpha)$  при  $m = \text{const}$  является линейным. Линейность регулировочных и механических характеристик является ценным преимуществом якорного управления исполнительными двигателями постоянного тока.

На рис. 4.2, б показано семейство регулировочных характеристик для различных значений относительного момента.

Мощность возбуждения исполнительного двигателя с якорным управлением равна электрическим потерям в сопротивлении обмотки возбуждения  $R_B$

$$P_B = I_B^2 R_B = \frac{U_B^2}{R_B}. \quad (4.4)$$

Эта мощность при неизменном напряжении возбуждения  $U_B$  постоянна, она не зависит от нагрузки, а величина ее незначительна по сравнению с мощностью, потребляемой якорем.

Номинальная мощность возбуждения в относительных единицах

$$p_{B.н} = \frac{P_B}{P_{B.н}} = \frac{U_B I_B}{U_{B.н} I_{B.н}}, \quad (4.5)$$

где  $P_{B.н} = I_{B.н}^2 R_B = U_{B.н}^2 / R_B$  – номинальная мощность возбуждения;

За единицу мощности исполнительного двигателя постоянного тока принимается мощность якоря при  $\alpha = 1$  и  $v = 0$ :

$$P_{y.п} = \frac{U_{y.н}^2}{R_y}. \quad (4.6)$$

Мощность управления для двигателя с якорным управлением

$$P_y = P_2 + I_y^2 R_y + P_m + P_{\text{мех}},$$

где  $P_m$  – мощность магнитных потерь в сердечнике якоря;

$P_{\text{мех}}$  – мощность механических потерь.

По экспериментальным данным мощность управления определяется по формуле

$$P_y = U_y \cdot I_y. \quad (4.7)$$

С учетом формул (4.1) и (4.3) мощность управления

$$P_y = U_y \cdot I_y = \frac{U_{y.н}^2}{R_y} (\alpha - \alpha v).$$

Эта мощность в относительных единицах равна

$$p_y = \frac{P_y}{P_{y.п}} = \alpha(1 - v). \quad (4.8)$$

Мощность управления равна полной механической мощности, развиваемой двигателем (включая потери на трение и вентиляционные потери), плюс потери в якоре (в обмотке и стали якоря). Эта мощность является, по существу, полной мощностью, потребляемой двигателем, за исключением мощности возбуждения  $P_B$ :

$$P_1 = P_y + P_B.$$

Мощность возбуждения в двигателе с якорным управлением составляет от 5 % (в двигателях мощностью 250 Вт) до 30 % (в двигателях мощностью до 7 Вт). Таким образом, мощность управления исполнительных двигателей с якорным управлением равна соответственно 95 – 70 % от всей подводимой к двигателю мощности. Значительная мощность управления является серьезным недостатком двигателя с якорным управлением, поскольку в случае питания обмотки управления от усилителя приходится значительно увеличивать габариты последнего.

Характеристики  $P_y = f(v)$  при  $\alpha = \text{const}$  являются линейными. Семейство этих характеристик при различных значениях коэффициента сигнала показано на рис. 4.3, а.

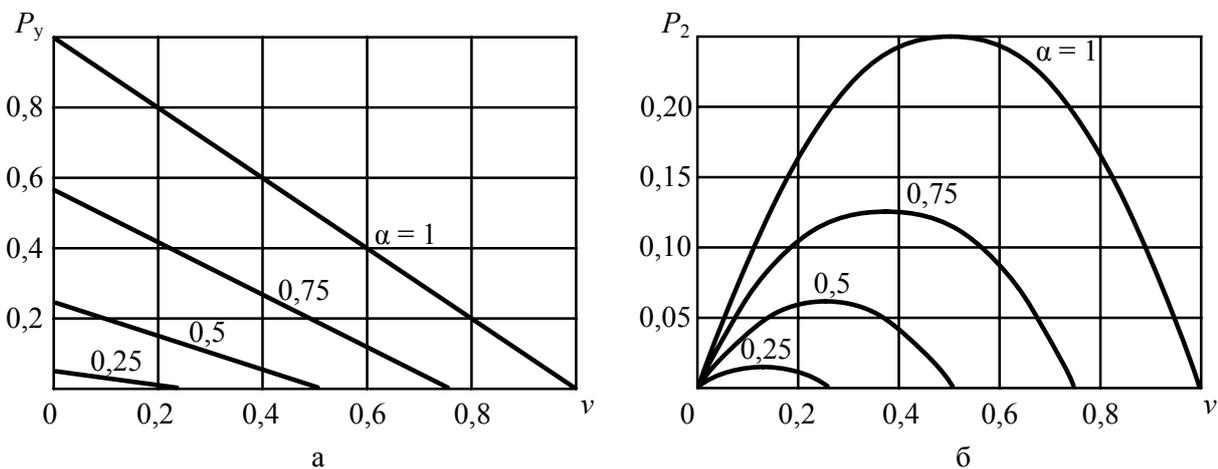


Рис. 4.3. Зависимости мощностей от относительной скорости вращения при якорном управлении:  
а – мощности управления; б – механической мощности

Полная механическая мощность якоря  $P_2'$ , равная сумме полезной мощности  $P_2$  двигателя на его валу, а также механических и вентиляционных потерь

$P_{\text{мех}}$ , определяется по формуле

$$P_2' = P_y - I_y^2 R_y. \quad (4.9)$$

Относительное значение этой мощности

$$p_2' = \frac{P_2'}{P_{y,п}}. \quad (4.10)$$

Механическая мощность ИД определяется по формуле (2.3), а в относительных единицах с учетом формулы (4.1):

$$p_2 = mv = \alpha v - v^2. \quad (4.11)$$

При пуске ( $v = 0$ ) и холостом ходе ( $m = 0$ ) полная механическая мощность равна нулю. Она достигает максимума при скорости

$$v_m = \frac{\alpha}{2}.$$

Максимальное значение полной механической мощности в относительных единицах

$$p_{2m} = \frac{\alpha^2}{4}.$$

Семейство характеристик  $P_2 = f(v)$  при различных значениях коэффициентов сигнала показано на рис. 4.3, б.

Как видно из рис. 4.3, б, при снижении коэффициента сигнала, т. е. напряжения управления, резко уменьшается максимальное значение полной механической (и, следовательно, полезной) мощности двигателя.

### 4.3. Полюсное управление

В исполнительных двигателях с полюсным управлением обмоткой управления является обмотка полюсов, а обмоткой возбуждения – обмотка якоря (рис. 4.1, б). Якорь двигателя постоянно подключен к сети с напряжением  $U_B = \text{const}$ , что при неподвижном якоре приводит к подгоранию контактов щеток с коллектором. Для ограничения тока иногда последовательно с якорем включают добавочное (балластное) сопротивление  $R_d$ . На обмотку полюсов напряжение управления  $U_y$  (сигнал) подают лишь тогда, когда необходимо вызвать вращение якоря.

Существенный недостаток полюсного управления – возможность самохода исполнительного двигателя. Это объясняется тем, что после прекращения сигнала управления двигатель остается возбужденным за счет небольшого магнитного потока остаточного магнетизма  $\Phi_{\text{ост}}$  и на якорь продолжает действовать небольшой электромагнитный момент, Н·м:

$$M = c_M \Phi_{\text{ост}} I_B,$$

который при небольшой нагрузке на валу двигателя может вызвать самопроизвольное вращение якоря при  $\alpha = 0$ . Для устранения самохода двигатель должен иметь на валу постоянно действующую механическую нагрузку  $M_H > M_{ост}$ .

Для исполнительного двигателя с полюсным управлением уравнение механической характеристики в относительных единицах  $v = f(m)$  при  $\alpha = \text{const}$  имеет следующий вид:

$$v = \frac{\alpha - m}{\alpha^2}, \quad (4.12)$$

где относительные значения  $m$ ,  $\alpha$  и  $v$  определяются так же, как и для двигателя с якорным управлением.

Механические характеристики  $v = f(m)$  при  $\alpha = \text{const}$  для двигателя с полюсным управлением являются линейными. Они приведены на рис. 4.4, а. В отличие от двигателя с якорным управлением жесткость механических характеристик при изменении коэффициента сигнала  $\alpha$  здесь не остается постоянной.

Чем меньше  $\alpha$ , тем меньше жесткость характеристик, т.е. тем больше изменение скорости вращения двигателя, соответствующее некоторым изменениям момента сопротивления на валу.

Скорость идеального холостого хода двигателя с полюсным управлением обратно пропорциональна коэффициенту сигнала

$$v_0 = \frac{1}{\alpha}.$$

Это означает, что при уменьшении напряжения управления скорость холостого хода увеличивается.

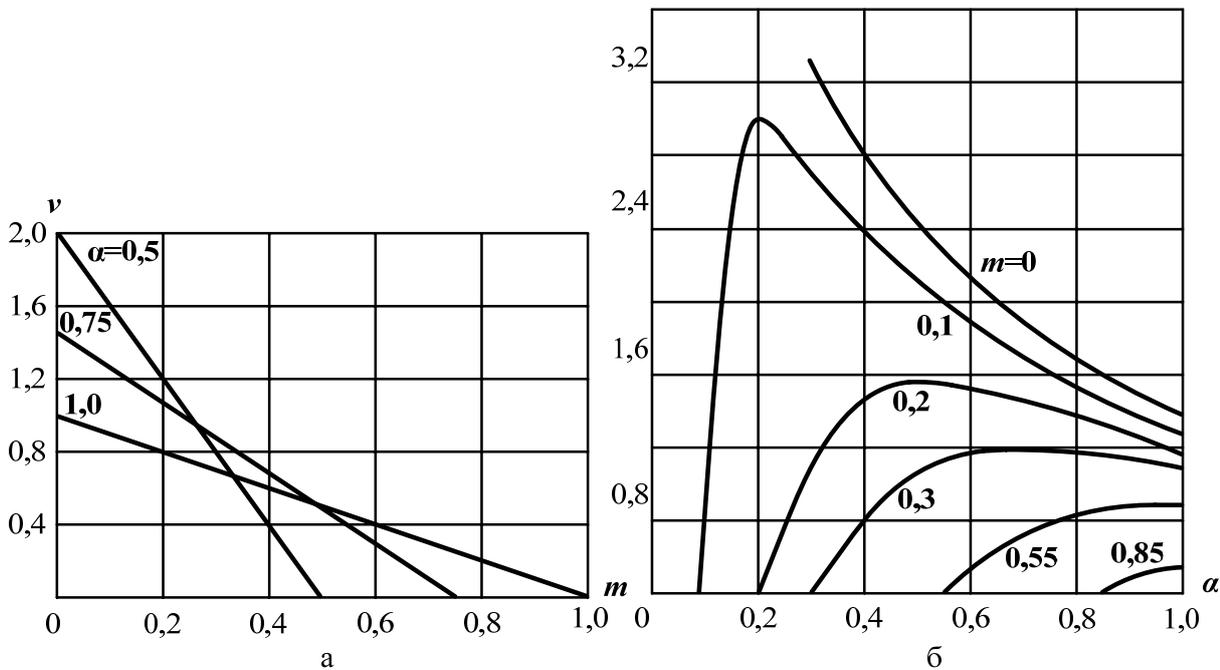


Рис. 4.4. Характеристики двигателя при полюсном управлении:  
а – механические; б – регулировочные

Для двигателей малой мощности такое влияние  $\alpha$  на частоту вращения не опасно, поскольку механическая нагрузка на якорь таких двигателей, вызванная трением в подшипниках и вращающегося якоря о воздух, достаточна для ограничения частоты вращения двигателя. Но в двигателях мощностью в несколько десятков и более ватт при отсутствии нагрузки на валу и малых значениях сигнала управления, а тем более после прекращения подачи сигнала частота вращения ротора может достигнуть опасного значения для механической прочности двигателя. Для предотвращения этого необходимо создать на валу двигателя постоянно действующий момент нагрузки такой величины, чтобы частота вращения якоря не достигла опасного значения.

Как следует из выражения (4.12), уравнение регулировочной характеристики  $\nu = f(\alpha)$  при  $m = \text{const}$  нелинейно, что является недостатком полюсного управления. Другим недостатком полюсного управления, ограничивающим область его применения, является неоднозначность регулировочных характеристик при малых моментах нагрузки ( $m < 0,5$ ). Под неоднозначностью регулировочных характеристик понимается то обстоятельство, что одна и та же скорость вращения может быть получена при двух различных по величине напряжениях управления (рис. 4.4, б).

Обычно исполнительные двигатели с полюсным управлением применяются лишь в тех случаях, когда момент сопротивления на валу двигателя не опускается ниже  $0,5 M_{\Pi}$ . Этим исключаются неоднозначность регулировочных характеристик и возможность разноса двигателя при отсутствии напряжения управления.

Мощностью возбуждения двигателя с полюсным управлением является мощность, подведенная к якорю:

$$P_{\text{в}} = U_{\text{в}} I_{\text{в}}. \quad (4.13)$$

Эта мощность составляет преобладающую часть мощности, потребляемой двигателем. Мощность управления двигателя при полюсном управлении идет лишь на покрытие электрических потерь в обмотках полюсов:

$$P_{\text{у}} = I_{\text{у}}^2 R_{\text{у}} = \frac{U_{\text{у}}^2}{R_{\text{у}}}. \quad (4.14)$$

Величина мощности управления  $P_{\text{у}}$  по сравнению с мощностью возбуждения  $P_{\text{в}}$  весьма незначительна, особенно при малых напряжениях управления. Малая величина мощности управления является по существу единственным преимуществом полюсного управления перед якорным.

Полная механическая мощность на валу двигателя в относительных единицах выражается следующим уравнением:

$$p_2 = m\nu = \alpha\nu - \alpha^2\nu^2, \quad (4.15)$$

где  $m = \alpha - \alpha^2\nu$  из формулы (4.12).

Приведение значений других мощностей к относительным единицам осуществляется по тем же формулам, что и при якорном управлении. При этом следует учитывать, что управляющей является обмотка полюсов.

Максимум этой мощности достигается при скорости:

$$v_m = \frac{1}{2\alpha} = \frac{v_0}{2},$$

где  $v_0$  – скорость идеального холостого хода двигателя, соответствующая данному значению  $\alpha$ .

Максимальная величина полной механической мощности не зависит от коэффициента сигнала  $\alpha$ . В относительных единицах при любом значении  $\alpha$

$$p_{2m} = 0,25.$$

Семейство кривых  $P_2 = f(v)$  при  $\alpha = \text{const}$  представлено на рис. 4.5.

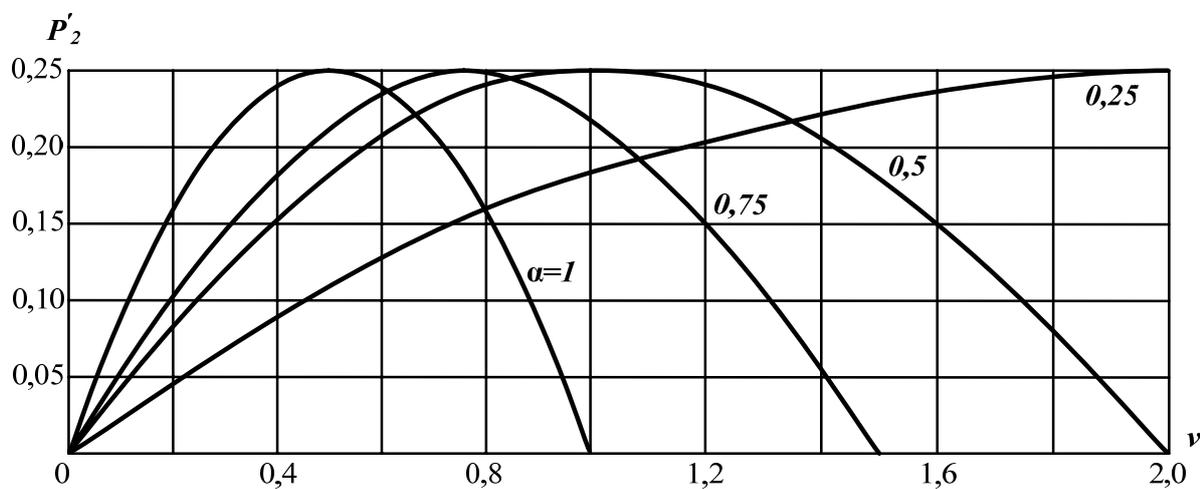


Рис. 4.5. Зависимость полной механической мощности от скорости вращения при полюсном управлении

#### 4.4. Модель двигателя постоянного тока

SimPowerSystems в составе Matlab, Simulink считается одним из лучших пакетов для моделирования электротехнических устройств и систем. Библиотека блоков SimPowerSystems является одной из множества дополнительных библиотек Simulink, ориентированных на моделирование конкретных устройств. SimPowerSystems содержит набор блоков для имитационного моделирования электротехнических устройств. В состав библиотеки входят модели пассивных и активных электротехнических элементов, источников энергии, электродвигателей, трансформаторов и пр.

Для запуска системы Simulink необходимо сначала запустить Matlab, после чего либо нажать кнопку  (Simulink) на панели инструментов, либо ввести в командном окне слово *simulink*. В открывшемся окне библиотеки блоков можно создать новую модель (кнопка  на панели инструментов или команда меню File → New → Model).

Используя специальные возможности Simulink и SimPowerSystems,

можно не только имитировать работу устройств во временной области, но и выполнять различные виды анализа таких устройств. Используя блоки библиотек Simulink и SimPowerSystems, можно за короткое время создать полноценную модель достаточно сложной электротехнической системы. Для этого необходимо в созданную модель перетащить выбранные блоки из окна библиотеки и соединить их между собой. Соединять блоки можно либо с помощью мыши (режим рисования линий), либо используя клавишу Ctrl. В последнем случае необходимо сначала щелкнуть левой клавишей мыши по блоку-источнику сигнала, а затем, нажав клавишу Ctrl, щелкнуть по блоку-приемнику сигнала. У многих блоков есть как входные, так и выходные порты. В этом случае соединять можно только выход со входом. Два входа (или два выхода) соединить между собой невозможно.

В созданной модели следует избегать русских наименований, в некоторых версиях Matlab может возникнуть проблема сохранения такой модели. Проблема может также возникнуть, если работа ведется под учетной записью пользователя, имя которого содержит символы кириллицы. Описанную проблему можно решить переименованием расширения сохраненного файла в *mdl* и удалением с помощью текстового редактора русских символов в тексте файла. В некоторых версиях Matlab могут возникнуть сложности с открытием ранее сохраненного файла в Simulink. Эта проблема решается созданием новой пустой модели и открытием файла из ее окна (Simulink → □ → 📁 или последовательно *simulink*, Ctrl+N и Ctrl+O).

Модель ДПТ представлена блоком *DCMachine* (рис. 4.6). Порты модели A+ и A– этого блока являются выводами обмотки якоря машины, а порты F+ и F– представляют собой выводы обмотки полюсов. Порт TL предназначен для подачи момента сопротивления движению. На выходном порту m формируется векторный сигнал, состоящий из четырех элементов: скорости, тока якоря, тока возбуждения и электромагнитного момента машины.

Для исследования двигателя постоянного тока можно использовать схему Simulink, изображенную на рис. 4.6. При этом в блоке *DCMachine* необходимо указать следующие параметры ДПТ:

- $R_a$  – активное сопротивление цепи якоря, Ом;
- $L_a$  – индуктивность цепи якоря, Гн;
- $R_f$  – активное сопротивление обмотки полюсов, Ом;
- $L_f$  – индуктивность обмотки полюсов, Гн;
- $L_{af}$  – взаимная индуктивность между обмотками якоря и полюсов двигателя, Гн;
- $J$  – момент инерции двигателя, кг·м<sup>2</sup>;
- $B_m$  – коэффициент вязкого трения, Н·м·с;
- $T_f$  – реактивный момент сопротивления (коэффициент сухого трения), Н·м;
- $\omega_0$  – начальная скорость машины, рад/с;



Варианты заданий

Таблица 5.1

Вариант	$P_{\text{НОМ}}$	$n_{\text{НОМ}}$	$M_{\text{НОМ}}$	$I_{\text{Я}}$	$U_{\text{Я}}$	$U_{\text{ОП}}$	$R_{\text{Я}}$	$L_{\text{Я}}$	$R_{\text{ОП}}$	$L_{\text{ОП}}$	$L_{\text{В}}$	$J$	$B_m$	$T_f$	Мех. хар-ка
	кВт	об/мин	Н·м	А	В	В	Ом	мГн	Ом	Гн	Гн	кг·м <sup>2</sup> ·10 <sup>-3</sup>	Н·м·с ·10 <sup>-3</sup>	Н·м	
1	3,7	1750	20,4	16,4	240	150	0,64	16	123	112,5	1,234	50	10	0	1-2-3
2	3,7	1220	29,2	16,2	240	240	0,49	12	197,4	120	1,800	1000	0	0	3-3-2
3	3,7	1750	20,4	19,7	240	300	2,123	28	231,4	156	0,9483	22,15	2,953	0,5161	2-1-2
4	3,7	1750	20,4	9,5	500	300	9,21	121,5	231,4	156	1,976	22,15	2,953	0,5161	3-1-1
5	7,5	1750	40,7	37,4	240	300	0,893	12,16	148	71,47	0,6458	42,51	3,406	1,046	3-1-2
6	7,5	1750	40,7	18,0	500	300	3,876	51,77	148	71,47	1,345	42,51	3,406	1,046	2-2-3
7	14,9	1750	81,4	70,8	240	300	0,3384	4,895	87,1	27,65	0,4038	83,21	4,313	2,105	3-1-3
8	14,9	1750	81,4	34,0	500	300	1,468	21,24	87,1	27,65	0,8413	83,21	4,313	2,105	2-1-1
9	22,4	1750	122,2	103,4	240	300	0,1871	2,866	84,15	20,82	0,401	123,9	5,219	3,164	3-2-1
10	22,4	1750	122,2	49,6	500	300	0,8123	12,44	84,15	20,82	0,8355	123,9	5,219	3,164	1-3-3
11	29,8	1750	162,9	136,0	240	300	0,1245	2,012	76,32	16,23	0,369	164,6	6,126	4,223	2-3-2
12	29,8	1750	162,9	65,3	500	300	0,54035	8,734	76,32	16,23	0,7688	164,6	6,126	4,223	1-3-1
13	37,3	1750	203,6	168,6	240	300	0,09155	1,558	69,845	13,39	0,3406	205,3	7,032	5,282	2-1-3
14	37,3	1750	203,6	81,0	500	300	0,3975	6,763	69,845	13,39	0,7096	205,3	7,032	5,282	2-2-1
15	56,0	1750	305,4	120,1	500	300	0,2326	4,453	57,39	9,413	0,5899	307,1	9,298	7,929	2-3-3
16	74,6	1750	407,2	159,2	500	300	0,1619	3,442	48,384	7,267	0,5003	408,9	11,56	10,58	1-1-3
17	93,3	1750	509,0	198,3	500	300	0,1233	2,884	42,07	5,968	0,4365	510,6	13,83	13,22	2-3-1
18	111,9	1750	610,8	237,5	500	300	0,0993	2,533	37,205	5,073	0,387	612,4	16,1	15,87	1-1-2
19	130,6	1750	712,6	276,6	500	300	0,0830	2,293	33,20	4,396	0,3459	714,2	18,36	18,52	3-2-3
20	149,2	1184	1203,7	361,8	440	310	0,0625	1,57	255	232,5	3,320	2200	320	0	1-2-2
21	149,2	1750	814,4	310,0	500	150	0,0491	0,9	123	112,5	2,621	2500	272	0	1-3-2
22	149,2	1750	814,4	315,7	500	300	0,07117	2,118	30,10	3,896	0,314	815,9	20,63	21,17	1-2-1
23	167,9	1750	916,2	354,9	500	300	0,06228	1,986	27,52	3,499	0,2874	917,7	22,89	23,81	3-2-2
24	186,6	1750	1018,0	394,0	500	300	0,055335	1,882	25,27	3,166	0,2641	1019	25,16	26,46	3-3-1

## 5.2. Подготовка к лабораторной работе

1. Изучить разделы 1–4 данного практикума. Ознакомиться с основными свойствами исполнительного двигателя постоянного тока при якорном и полюсном управлениях [1, с. 138–157; 2, гл. 11].

2. Ознакомиться со средой моделирования Simulink [3, с. 11–31] и библиотекой блоков для имитационного моделирования электротехнических устройств SimPowerSystems [4, разд. 1].

3. Используя элементы из библиотек Simulink и SimPowerSystems в Simulink Library Browser, собрать схему, представленную на рис. 4.6. При этом следует обратить внимание, что вектор выходных сигналов двигателя  $m$  разбивается на 4 элемента. Используя исходные данные своего варианта (табл. 5.1), ввести параметры ДПТ (см. подразд. 4.4). Учитывая, что значения сопротивлений  $R_{я}$  и  $R_{оп}$  приводятся при температуре окружающей среды ( $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), ввести в модель ДПТ значения, пересчитанные для рабочей температуры двигателя  $75\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $R_{я75}$ ,  $R_{оп75}$ ) по формуле

$$R_{75} = \frac{235 + 75}{235 + \theta} R, \quad (5.1)$$

где  $\theta$  – температура обмотки двигателя до ее нагрева ( $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

Здесь и далее следует учитывать, что в инженерных расчетах точность (количество цифр после запятой после округления в ближайшую сторону) полученных значений должна соответствовать точности исходных данных.

4. Подать на обмотки якоря и полюсов номинальные напряжения, подать номинальный момент сопротивления (блок *Constant* на рис. 4.6) и проверить правильность работы созданной схемы по отображаемому на дисплее *Скорость* установившемуся значению скорости (оно должно соответствовать номинальному значению – см. табл. 5.1). Если значения различаются, проверить правильность введенных величин и соответствие единиц измерений в модели и в таблице (см. вторую строку табл. 5.1).

5. Рассчитать скорость идеального холостого хода (при  $\alpha = u_y / u_b = 1$ ):

$$n_0 = n_n \frac{U_{я.н}}{U_{я.н} - I_{я.н} R_{я75}}, \text{ (об/мин)} \quad (5.2)$$

где  $n_n$  – номинальная скорость вращения двигателя, об/мин;

$I_{я.н}$  – номинальный ток якоря двигателя, А;

$R_{я75}$  – сопротивление цепи якоря двигателя при температуре  $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ , Ом;

$U_{я.н}$  – номинальное напряжение в цепи якоря, В.

Определить величину пускового момента двигателя  $M_{п}$  при  $\alpha = 1$  и  $n = 0$ :

$$M_{п} = M_n \frac{I_{я.п}}{I_{я.н}} = M_n \frac{U_{я.н}}{I_{я.н} R_{я75}} \text{ (Н}\cdot\text{м)}, \quad (5.3)$$

где  $M_n$  – номинальный момент двигателя, Нм.

Заполнить теоретическую часть таблицы 5.2.

6. Запустить в среде Matlab модель системы управления ДПТ с трехступенчатым пусковым устройством (Matlab → Help → Demos → Simulink → SimPowerSystems → Machine models → Starting a DC Motor → Open this model). Разобраться в ее структуре и алгоритме работы (см. рис. 2.2).

7. Разработать и собрать схемы для исследования ДПТ параллельного, последовательного и смешанного возбуждения (рис. 1.4, б, в, г) с целью получения механических характеристик в соответствии с вариантом (рис. 1.6–1.9).

Для того чтобы собрать схему со смешанным возбуждением, необходимо войти внутрь модели ДПТ (пункт *Look Under Mask* в контекстном меню) и разбить обмотку полюсов (блок *Rf\_Lf*) на две части: добавить последовательно еще одну обмотку и ввести в обе обмотки такие значения активного сопротивления и индуктивности, чтобы их суммарные величины соответствовали исходным значениям. Долю каждой части обмотки полюсов выбрать в соответствии с теорией (подразд. 1.5). В модели ДПТ подключить среднюю точку обмотки полюсов к дополнительному порту подсистемы, а в схеме для исследования ДПТ подключить двигатель к источнику питания и другим элементам схемы.

### 5.3. Порядок выполнения работы

В данном подразделе описан порядок выполнения лабораторной работы. Методика выполнения работы с подробным описанием всех действий приведена в следующем подразделе.

1. По стендам, находящимся в лаборатории, ознакомиться с устройством исполнительных двигателей постоянного тока. Заполнить экспериментальную часть табл. 5.2.

2. Снять механические характеристики двигателя  $n = f(m)$  при якорном управлении для четырех значений напряжения управления ( $U_y = U_{я}$ ).

3. Снять регулировочные характеристики двигателя при якорном управлении  $n = f(U_y)$  для четырех значений момента на валу двигателя.

4. Снять механические характеристики двигателя  $n = f(m)$  при полюсном управлении для четырех значений напряжения управления ( $U_y = U_{оп}$ ).

5. Снять регулировочные характеристики двигателя при полюсном управлении  $n = f(U_y)$  для четырех значений момента на валу двигателя.

6. Настроить схему (рис. 2.2), обеспечивающую пуск двигателя с помощью трехступенчатого пускового устройства, и снять графики изменения тока якорной цепи, скорости и электромагнитного момента двигателя.

7. Снять механические характеристики ДПТ с параллельным, последовательным и смешанным возбуждением (подразд. 1.3–1.5).

#### На основании результатов опытов:

1. Сравнить экспериментальные и теоретические значения в таблице 5.2. Здесь и далее при значительных расхождениях теоретических и опытных данных проверить расчеты и/или повторить эксперименты.

2. Рассчитать (табл.5.3 и 5.4 для якорного управления) и построить в относительных единицах по экспериментальным данным механические ( $v = f(m)$  при  $\alpha = \text{const}$ ) и регулировочные ( $v = f(\alpha)$  при  $m = \text{const}$ ) характеристики двигателя при якорном управлении и сравнить их с характеристиками, приведенными на рис. 4.2.

3. Для механических характеристик двигателя при якорном управлении, полученных опытным путем, рассчитать

- мощность управления  $P_y$ , формулы (4.7) и (4.8);
- мощность возбуждения  $P_b$ , формулы (4.4) и (4.5);
- полную механическую мощность якоря  $P_2'$ , формулы (4.9) и (4.10);
- механическую мощность ИД  $P_2$ , формулы (2.3) и (4.11);
- входную мощность двигателя  $P_1$ , формула (2.4);
- коэффициент полезного действия  $\eta$ , формула (2.2).

Полученные значения занести в табл. 5.3 для якорного управления.

4. Построить зависимости мощности управления и механической мощности от относительной скорости вращения при якорном управлении. Сравнить полученные характеристики с теоретическими, приведенными на рис. 4.3.

5. Рассчитать (табл. 5.3 и 5.4 для полюсного управления) и построить в относительных единицах механические ( $v = f(m)$  при  $\alpha = \text{const}$ ) и регулировочные ( $v = f(\alpha)$  при  $m = \text{const}$ ) характеристики двигателя при полюсном управлении и сравнить их с характеристиками, приведенными на рис. 4.4.

6. Для механических характеристик двигателя при полюсном управлении, полученных опытным путем, рассчитать мощность управления  $P_y$ , мощность возбуждения  $P_b$ , полную механическую мощность якоря  $P_2'$ , механическую мощность ИД  $P_2$ , входную мощность двигателя  $P_1$  и КПД  $\eta$ , воспользовавшись формулами (4.13), (4.14), (4.15) и перечисленными выше (пункт 3) с учетом изменения способа управления. Полученные значения занести в табл. 5.3 для полюсного управления.

7. Построить семейство характеристик полной механической мощности для полюсного управления  $P_2 = f(v)$ . Сравнить полученные характеристики с теоретическими (см. рис. 4.5).

8. Построить графики зависимости КПД двигателя от нагрузки  $\eta = f(P_2)$  при якорном и полюсном управлении.

9. Построить семейства механических характеристик ДПТ с параллельным, последовательным и смешанным возбуждением (рис. 1.6–1.9) в соответствии с вариантом. При необходимости провести требуемые расчеты.

#### 5.4. Методика выполнения работы

1. Установить в собранной схеме (рис. 4.6) в цепи якоря и на обмотке полюсов исполнительного двигателя (ИД) номинальные напряжения.

2. Определить скорость идеального холостого хода (при  $\alpha = 1$ ). Точность (количество цифр после запятой) экспериментальных значений, определяемых

в ходе выполнения работы (в этом и последующих пунктах), должна соответствовать точности исходных данных (табл. 5.1).

3. Определить пусковой момент ИД. Для этого необходимо постепенно повышать момент сопротивления  $Constant$  до полной остановки вала ИД ( $n = 0$ ) – на дисплее *Скорость* будет отображаться отрицательное значение.

4. Определить КПД при номинальной нагрузке, номинальную потребляемую и номинальную выходную мощности ИД (см. формулы 2.2–2.4). Заполнить экспериментальную часть табл. 5.2.

5. Снять механические характеристики при якорном управлении. Рекомендуемые значения момента на валу двигателя:  $m = 0,1; 0,2; 0,4$ . Данные экспериментов при снятии механических характеристик заносятся в табл. 5.3. Значение коэффициента управляющего сигнала  $\alpha$  задается формулой (4.2), в которой следует обратить внимание на различие  $u_y, u_B$  и  $U_y, U_B$ .

6. Снять регулировочные характеристики при якорном управлении. Рекомендуемые значения  $\alpha$ : 0,25; 0,5; 0,75; 1. Опытные данные при снятии регулировочных характеристик заносятся в табл. 5.4.

7. Снять механические и регулировочные характеристики при полюсном управлении. Методика снятия характеристик при полюсном управлении соответствует методике для якорного управления. Данные экспериментов при полюсном управлении заносятся в соответствующие табл. 5.3 и 5.4.

8. Запустить в среде Matlab модель системы управления ДПТ с трехступенчатым пусковым устройством (Matlab → Help → Demos → Simulink → SimPowerSystems → Machine models → Starting a DC Motor → Open this model). Для того чтобы двигатель по окончании разгона вышел в номинальный режим работы, принять

$$k_{BL} = \frac{M_{\text{НОМ}}}{\omega_{\text{НОМ}}},$$

где  $k_{BL}$  – коэффициент сопротивления движению (блок BL на рис. 2.2), Н·м·с/рад;

$\omega_{\text{НОМ}}$  – номинальная скорость двигателя, рад/с.

Ввести параметры своего ИД, подать номинальные напряжения и настроить пусковое устройство (*Motor Starter*): подобрать параметры  $r_1, r_2, r_3, t_1, t_2, t_3$  (рис. 2.3, изменять настроечные параметры блоков, а не только подписи к ним). Наибольший ток во время пуска не должен превышать номинальный более чем в 2–3 раза (см. подразд. 2.2). Снять графики переходных процессов в системе с помощью соответствующих блоков *Scope*.

Для ускорения процесса моделирования может потребоваться уменьшить время замыкания ключа *Ideal Switch* (см. рис. 2.1). Для этого необходимо изменить параметр *Time* блока *Timer* (например, задать  $Time = [0 \ 0.01]$ ).

9. Снять механические характеристики ДПТ с параллельным, последовательным и смешанным возбуждением (см. вариант). Характер экспериментов, вид таблиц опытных и расчетных данных определить самостоятельно.

Основные параметры ИД

Таблица 5.2

Параметр		$R_{я75^\circ}$	$R_{оп75^\circ}$	$n_{ном}$	$P_{ном}$	$I_{я.ном}$	$I_{оп.ном}$	$n_0$	$M_{п}$	$P_{1ном}$	$P_{2ном}$	$\eta_{ном}$	Якорное управление		Полосное управление	
													$P_{в.п}$	$P_{в.н}$	$P_{в.п}$	$P_{в.н}$
Ед. изм.		Ом	Ом	об/мин	Вт	А	А	об/мин	Н·м	Вт	Вт	%	Вт	Вт	Вт	Вт
Теоретические данные	Формула	5.1	5.1	–	–	–	$U_{оп}/R_{оп}$	5.2	5.1	2.4	2.3	2.2	4.6	4.4	4.14	4.13
	Значение															
Опытные данные																

Механические характеристики

Таблица 5.3

Опытные данные						Расчетные данные											
$U_{я}$	$U_{оп}$	$M$	$n$	$I_{я}$	$I_{оп}$	$m$	$\nu$	$P_2$	$p_2$	$P'_2$	$p'_2$	$P_{\gamma}$	$p_{\gamma}$	$P_{\beta}$	$p_{\beta}$	$P_1$	$\eta$
В	В	Н·м	об/мин	А	А	о.е.	о.е.	Вт	о.е.	Вт	о.е.	Вт	о.е.	Вт	о.е.	Вт	%
$\alpha=1$																	
$\alpha=0,75$																	
$\alpha=0,5$																	
$\alpha=0,25$																	

Опытные данные			Расчетные данные		
$U_y, В$	$U_B, В$	$n, об/мин$	$\alpha$	$\nu$	$m$
$M_1 = 0$					
$M_2 = M_H$					
$M_3 = M_H / 4$					
$M_4 = M_H / 2$					

### 5.5. Содержание отчета

1. Основные технические данные испытуемого двигателя (табл. 5.1 и 5.2). Результаты расчетов.
2. Механические и регулировочные характеристики двигателя при якорном управлении (табл. 5.3, 5.4) и семейства характеристик (рис. 4.2). Здесь и далее приводятся экспериментальные характеристики.
3. Зависимости мощности управления и механической мощности от относительной скорости вращения при якорном управлении: (рис. 4.3).
4. Механические и регулировочные характеристики двигателя при полюсном управлении (табл. 5.3, 5.4) и семейства характеристик (рис. 4.4).
5. Семейство характеристик полной механической мощности для полюсного управления (рис. 4.5).
6. Графики зависимости КПД двигателя от нагрузки  $\eta = f(P_2)$  при якорном и полюсном управлении.
7. Схема трехступенчатого пускового устройства (рис. 2.3) с указанием ее параметров. Графики изменения электромагнитного момента, скорости и тока якорной цепи в системе управления ДПТ с пусковым устройством (рис. 2.4).
8. Разработанные схемы для исследования ДПТ с параллельным, последовательным и смешанным возбуждением с указанием значений основных элементов и параметров. Описание хода проведенных экспериментов. Таблицы опытных и расчетных данных. Механические характеристики ДПТ с параллельным, последовательным и смешанным возбуждением (рис. 1.6–1.9) в соответствии с вариантом.
9. Выводы.

## 5.6. Контрольные вопросы

1. Принцип действия двигателя постоянного тока (ДПТ).
2. Основные параметры ДПТ. Области применения. Режимы работы.
3. Конструкция двигателя постоянного тока (ДПТ). Способы регулирования скорости. Назначение и требования к исполнительному двигателю (ИД).
4. Якорное и полюсное управления. Преимущества и недостатки.
5. Система относительных единиц. Скорость идеального холостого хода.
6. Электромагнитный момент и момент на валу двигателя. Пусковой и номинальный моменты ДПТ.
7. Уравнение механической характеристики. Семейства характеристик. Якорное и полюсное управление.
8. Регулировочные характеристики ИД. Якорное и полюсное управление.
9. Механические характеристики ИД. Якорное и полюсное управление.
10. Семейства характеристик полной механической мощности. Якорное и полюсное управление.
11. Зависимость скорости холостого хода от напряжения управления. Якорное и полюсное управление.
12. Исключение неоднозначности регулировочных характеристик при полюсном управлении.
13. Соотношение мощности управления с мощностью возбуждения. Якорное и полюсное управление.
14. Зависимость максимальной величины полной механической мощности от коэффициента сигнала  $\alpha$  в относительных единицах. Якорное и полюсное управление.
15. Передаточные функции ДПТ.
16. ДПТ с последовательным возбуждением. Свойства и характеристики.
17. ДПТ с параллельным возбуждением. Свойства и характеристики.
18. ДПТ со смешанным возбуждением. Свойства и характеристики.
19. Включение ДПТ в сеть переменного тока. Универсальный двигатель.
20. Мощности ДПТ, потери, КПД. Расчетные формулы.
21. Пуск ДПТ. Пусковое устройство двигателя, расчет его элементов.
22. Составные элементы схем исследования ДПТ. Модель ДПТ.
23. Моделирование с использованием Simulink и SimPowerSystems.
24. Коммутация в коллекторных машинах. Степени искрения.
25. Защита обмотки якоря. Радиопомехи и способы их подавления.
26. Почему пусковые токи в ДПТ в несколько раз превышают номинальные?
27. Почему двигатели с последовательным возбуждением не могут работать без момента нагрузки на валу?
28. Что такое напряжение «трогания» и почему оно возрастает с ростом момента на валу двигателя?
29. Влияние реакции якоря на работу машины постоянного тока.

## 5.7. Литература к лабораторной работе

1. Чечет, Ю. С. Электрические микромашины автоматических устройств. М.: Энергия, 1964.
2. Юферов, Ф. М. Электрические машины автоматических устройств / Ю. С. Чечет. – М.: Высш. шк., 1988.
3. Черных, И. В. Simulink: Среда создания инженерных приложений. Под общ. ред. к.т.н. В. Г. Потемкина / И. В. Черных. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2003.
4. Черных, И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. 1-е издание, 2007.
5. Пиотровский, Л. М. Электрические машины / Л. М. Пиотровский. – М.: Энергия, 1982. Гл.9.
6. Кацман, М. М. Электрические машины автоматических устройств: Учеб. пособие / М. М. Кацман. – М.: ФОРУМ, ИНФРА-М, 2002.
7. Кацман, М.М. Электрические машины / М. М. Кацман. М.: Высш. шк., 2001.

## 6. Асинхронный двигатель

### 6.1. Принцип действия трехфазного асинхронного двигателя

Трехфазные асинхронные двигатели находят самое широкое применение в различных областях техники. Не менее 90 % всех электродвигателей являются асинхронными. Такое широкое использование эти двигатели получили благодаря простоте конструкции и надежности в работе. В устройствах автоматики они чаще применяются для привода механизмов, не требующих регулирования частоты вращения.

Принцип действия трехфазного асинхронного двигателя основан на способности трехфазной обмотки при включении ее в сеть трехфазного тока создавать вращающееся магнитное поле. Частота вращения этого поля  $n_1$ , или синхронная частота вращения (об/мин), прямо пропорциональна частоте переменного тока  $f_1$  и обратно пропорциональна числу пар полюсов  $p$  трехфазной обмотки:

$$n_1 = 60f_1 / p \quad (6.1)$$

Если необходимо изменить направление вращения магнитного поля, то изменяют порядок следования фаз трехфазной системы токов, подводимых к трехфазной обмотке. Число полюсов асинхронного двигателя определяется конструкцией обмотки статора, при этом число полюсов ротора равно числу полюсов статора.

Отличительный признак асинхронного двигателя состоит в том, что частота вращения  $n_2$  ротора меньше синхронной частоты вращения  $n_1$  магнитного поля статора.

Объясняется это тем, что ЭДС в стержнях обмотки ротора индуцируется только при неравенстве частот вращения  $n_2 < n_1$ . Частота вращения поля статора относительно ротора определяется частотой скольжения  $n_3 = n_1 - n_2$ . Отставание ротора от вращающегося поля статора характеризуется относительной величиной  $S$ , называемой скольжением:

$$S = (n_1 - n_2) / n_1 \quad (6.2)$$

Скольжение асинхронного двигателя может изменяться в диапазоне от 0 до 1, т. е. 0–100 %. Если  $S \approx 0$ , то это соответствует режиму холостого хода, когда ротор двигателя практически не испытывает противодействующего момента, если  $S \approx 1$  – режиму короткого замыкания, при котором ротор двигателя неподвижен ( $n_2 = 0$ ). Скольжение зависит от механической нагрузки на валу двигателя и с ее ростом увеличивается.

Частота вращения ротора асинхронного двигателя (об/мин) согласно (6.2)

$$n_2 = n_1(1 - S) = [(60f_1) / p](1 - S). \quad (6.3)$$

При изменениях нагрузки на валу двигателя частота вращения  $n_2$  изменяется пропорционально  $(1 - S)$ .

Если коробка выводов имеет шесть зажимов, обозначенных C1, C2 и C3 – начала обмоток фазы статора и C4, C5 и C6 – концы обмоток фазы статора (рис. 6.1, а), то такой двигатель можно включить в трехфазную сеть на два разных напряжения, отличающихся в  $\sqrt{3}$  раз, соединяя обмотку статора либо в звезду, либо в треугольник. Например, если в паспорте двигателя указаны напряжения питающей сети 220/380 В, то при напряжении сети 380 В обмотку статора соединяют в звезду, а при 220 В – в треугольник (рис. 6.1, б). В обоих случаях на каждую обмотку фазы приходится напряжение 220 В. Если двигатель рассчитан на включение в сеть с каким-либо одним напряжением, то в коробке выводов имеется только три зажима.

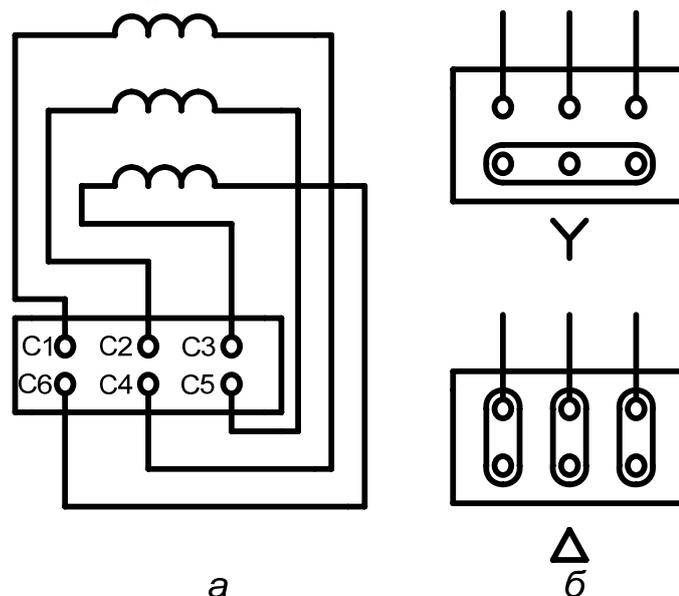


Рис. 6.1. Расположение выводов обмотки статора:  
а – на клеммной панели; б – способы соединения обмоток фаз статора

## 6.2. Режимы работы асинхронной машины

В соответствии с принципом обратимости электрических машин асинхронные машины могут работать как в двигательном, так и в генераторном режимах. Кроме того, возможен еще и режим электромагнитного торможения противовключением.

### 6.2.1. Двигательный режим

При включении обмотки статора в сеть трехфазного тока возникает вращающееся магнитное поле, которое, сцепляясь с короткозамкнутой обмоткой ротора, наводит в ней ЭДС. При этом в стержнях обмотки ротора появляются токи. В результате взаимодействия этих токов с вращающимся магнитным полем на роторе возникают электромагнитные силы. Совокупность этих сил создает электромагнитный вращающий момент, под действием которого ротор асинхронного двигателя приходит во вращение с частотой  $n_2 < n_1$  в сторону вращения поля статора. Если вал асинхронного двигателя механически соединить с валом какого-либо исполнительного механизма ИМ (станка, подъемного крана и т. п.), то вращающий момент двигателя  $M$ , преодолев противодействующий (нагрузочный) момент  $M_{\text{нагр}}$ , исполнительного механизма, приведет механизм во вращение. Следовательно, электрическая мощность  $P_1$ , поступающая в двигатель из сети, в основной своей части преобразуется в механическую мощность  $P_1$  и передается исполнительному механизму ИМ (рис. 6.2, б).

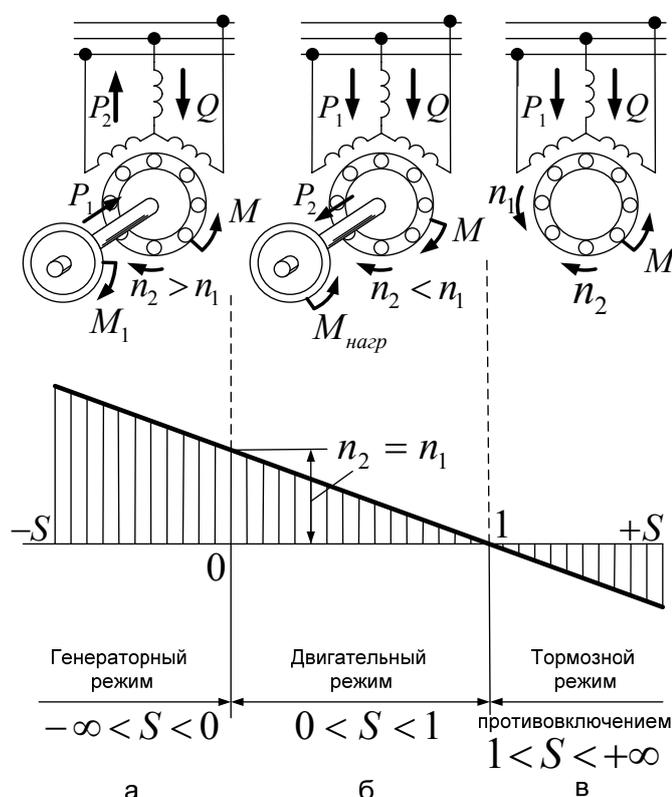


Рис. 6.2. Режимы работы асинхронной машины

С увеличением нагрузочного момента на валу асинхронного двигателя частота вращения ротора  $n_2$  уменьшается. Следовательно, скольжение асинхронного двигателя зависит от механической нагрузки на валу двигателя и может изменяться в диапазоне  $0 < S \leq 1$ . При включении асинхронного двигателя в сеть в начальный момент времени ротор под влиянием сил инерции неподвижен ( $n_2 = 0$ ). При этом скольжение  $S$  равно единице.

В режиме работы двигателя без нагрузки на валу (режим холостого хода) ротор вращается с частотой, лишь немного меньшей синхронной частоты вращения  $n_1$ , и скольжение весьма мало отличается от нуля ( $S \approx 0$ ). Скольжение, соответствующее номинальной нагрузке двигателя, называют номинальным скольжением  $S_{\text{ном}}$ . Для асинхронных двигателей общего назначения  $S_{\text{ном}} = 1 \dots 8\%$ , при этом для двигателей большой мощности  $S_{\text{ном}} = 1\%$ , а для двигателей малой мощности  $S_{\text{ном}} = 8\%$ .

Преобразовав выражение (6.2), получим формулу для определения асинхронной частоты вращения (об/мин):

$$n_2 = n_1(1 - S). \quad (6.4)$$

**Пример.** Трехфазный асинхронный двигатель с числом полюсов  $2p = 4$  работает от сети с частотой тока  $f_1 = 50$  Гц. Определить частоту вращения двигателя при номинальной нагрузке, если скольжение при этом составляет 6%.

Решение.

Синхронная частота вращения:

$$n_1 = 60 f_1 / p = 60 \cdot 50 / 2 = 1500 \text{ об/мин.}$$

Номинальная частота вращения по (6.4):

$$n_{\text{ном}} = n_1(1 - S_{\text{ном}}) = 1500 \cdot (1 - 0,06) = 1412 \text{ об/мин.}$$

### 6.2.2. Генераторный режим

Если обмотку статора включить в сеть, а ротор асинхронной машины посредством приводного двигателя ПД (двигатель внутреннего сгорания, турбина и т. п.), являющегося источником механической энергии, вращать в направлении вращения магнитного поля статора с частотой  $n_2 > n_1$ , то направление движения ротора относительно поля статора изменится на обратное, поскольку ротор будет обгонять поле статора. При этом скольжение станет отрицательным, а ЭДС, наведенная в обмотке ротора, изменит свое направление. Электромагнитный момент на роторе  $M$  также изменит свое направление, т. е. будет направлен навстречу вращающемуся магнитному полю статора и станет тормозящим по отношению к вращающемуся моменту приводного двигателя  $M_1$ . В этом случае механическая мощность приводного двигателя в основной своей части будет преобразована в электрическую активную мощность  $P_2$  переменного тока. Особенность работы асинхронного генератора состоит в том, что вращающееся магнитное поле в нем создается реактивной мощностью  $Q$  трехфазной сети, в которую включен генератор, и он отдает вырабатываемую активную

мощность  $P_2$ . Следовательно, для работы асинхронного генератора необходим источник переменного тока, при подключении к которому происходит возбуждение генератора, т. е. в нем возбуждается вращающееся магнитное поле.

Для работы асинхронной машины в генераторном режиме требуется источник реактивной мощности, создающий поток возбуждения. При отсутствии первоначального магнитного поля в обмотке статора поток возбуждения создают с помощью постоянных магнитов, либо при активной нагрузке за счет остаточной индукции машины и конденсаторов, параллельно подключенных к фазам обмотки статора (рис. 6.3).

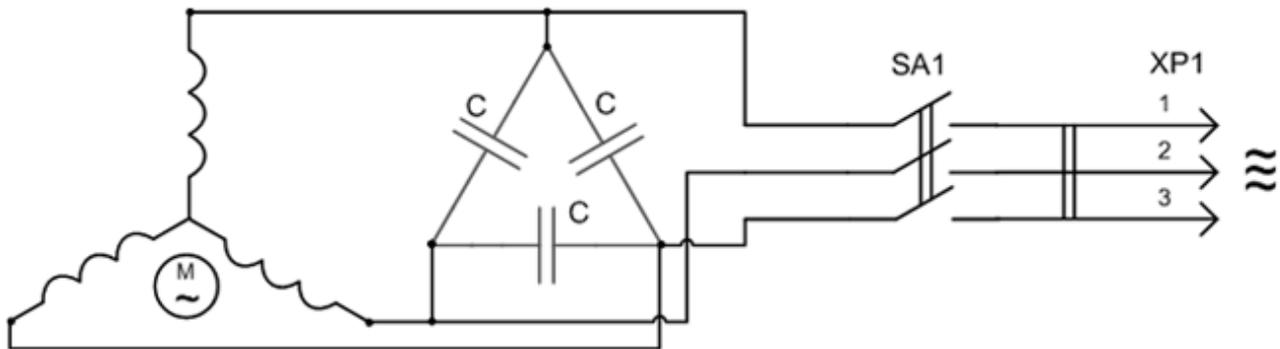


Рис. 6.3. Схема включения асинхронного генератора

В соответствии с принципом обратимости электрических машин при достижении синхронной частоты вращения на статоре под действием остаточного магнитного поля образуется некоторая ЭДС. При подключении конденсаторов  $C$  в обмотках статора потечет опережающий емкостный ток, являющийся в данном случае намагничивающим. Емкость конденсаторов  $C$  должна превышать некоторое критическое значение  $C_0$ , зависящее от параметров асинхронной машины: только в этом случае происходит самовозбуждение генератора и на обмотках статора устанавливается трехфазная симметричная система напряжений. Значение напряжения зависит, в конечном счете, от характеристики машины и емкости конденсаторов. Для поддержания напряжения постоянным с увеличением нагрузки необходимо увеличивать и емкость конденсаторов, т. е. подключать дополнительные конденсаторы. Это обстоятельство необходимо рассматривать как недостаток асинхронного генератора.

Скольжение асинхронной машины в генераторном режиме может изменяться в диапазоне  $-\infty < S < 0$ , т. е. оно может принимать любые отрицательные значения. Несмотря на простоту обслуживания, асинхронный генератор применяют сравнительно редко, в основном как вспомогательный источник небольшой мощности и как тормозное устройство.

### 6.2.3. Режим торможения противовключением

Если у работающего трехфазного асинхронного двигателя поменять местами любую пару подходящих к статору из сети присоединительных проводов, то вращающееся поле статора изменит направление вращения на обратное. При

этом ротор асинхронной машины под действием сил инерции будет продолжать вращение в прежнем направлении. Другими словами, ротор и поле статора асинхронной машины будут вращаться в противоположных направлениях. В этих условиях электромагнитный момент машины, направленный в сторону вращения поля статора, будет оказывать на ротор тормозящее действие (рис. 6.2, в). Этот режим работы асинхронной машины называется электромагнитным торможением противовключением. Активная мощность, поступающая из сети в машину при этом режиме, частично затрачивается на компенсацию механической мощности вращающегося ротора, т. е. на его торможение.

В режиме электромагнитного торможения частота вращения ротора является отрицательной, поэтому скольжение приобретает положительные значения больше единицы:

$$S = [n_1 - (-n_2)] / n_1 = (n_1 + n_2) / n_1 > 1 \quad (6.5)$$

Скольжение асинхронной машины в режиме торможения противовключением может изменяться в диапазоне  $1 < S < +\infty$ .

Обобщая изложенное о режимах работы асинхронной машины, можно сделать вывод: характерной особенностью работы асинхронной машины является неравенство частот вращения магнитного поля статора  $n_1$  и ротора  $n_2$ , т. е. наличие скольжения, поскольку только в этом случае вращающееся магнитное поле наводит в обмотке ротора ЭДС и на роторе возникает электромагнитный момент. При этом каждому режиму работы асинхронной машины соответствует определенный диапазон изменений скольжения, а, следовательно, и частоты вращения ротора.

На рис. 6.4 показана механическая характеристика асинхронной машины  $M = f(S)$  при  $U_1 = \text{const}$ . На графике этой характеристики указаны зоны, соответствующие различным режимам работы: двигательный режим ( $0 < S \leq 1$ ), когда электромагнитный момент  $M$  является вращающим; генераторный режим ( $-\infty < S < 0$ ) и тормозной режим противовключением ( $1 < S < +\infty$ ), когда электромагнитный момент  $M$  является тормозящим.

Из рассмотренных режимов работы наибольшее практическое применение получил двигательный режим асинхронной машины, т. е. чаще используют асинхронные двигатели, которые составляют основу современного электропривода, выгодно отличаясь от других электродвигателей простотой конструкции и высокой надежностью. Поэтому теорию асинхронных машин принято излагать применительно к асинхронным двигателям.

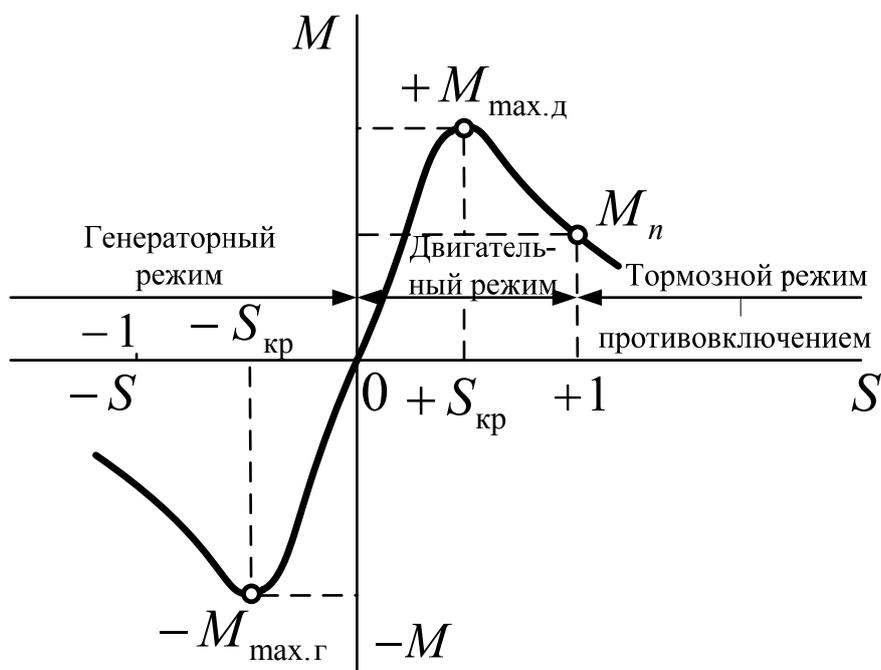


Рис. 6.4. Зависимость режимов работы асинхронной машины от скольжения

### 6.3. Устройство асинхронного двигателя

Асинхронный двигатель состоит из двух основных частей, разделенных воздушным зазором: неподвижного статора и вращающегося ротора. Каждая из этих частей имеет сердечник и обмотку. При этом обмотка статора включается в сеть и является как бы первичной, а обмотка ротора – вторичной, поскольку энергия в нее поступает из обмотки статора за счет магнитной связи между этими обмотками.

По своей конструкции асинхронные двигатели разделяются на два вида: двигатели с короткозамкнутым ротором и двигатели с фазным ротором. Трехфазные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором имеют наиболее широкое применение.

Асинхронные двигатели с фазным ротором имеют более сложную конструкцию и менее надежны, но они обладают лучшими регулировочными и пусковыми свойствами, чем двигатели с короткозамкнутым ротором. Обмотка ротора асинхронного двигателя с фазным ротором соединена с пусковым реостатом ПР, создающим в цепи ротора добавочное сопротивление.

Уравнениям напряжений и токов, а также векторной диаграмме асинхронного двигателя соответствует электрическая схема замещения асинхронного двигателя.

На рис. 6.5, а представлена Т-образная схема замещения, а на рис. 6.5, б Г-образная. Магнитная связь обмоток статора и ротора в асинхронном двигателе на схеме замещения заменена электрической связью цепей статора и ротора. Активное сопротивление можно рассматривать как внешнее сопротивление, включенное в обмотку неподвижного ротора. В этом случае асинхронный двигатель аналогичен трансформатору, работающему на активную нагрузку. Со-

противление – единственный переменный параметр схемы. Значение этого сопротивления определяется скольжением, а следовательно, механической нагрузкой на валу двигателя. Так, если нагрузочный момент на валу двигателя  $M_2 = 0$ , то скольжение  $S \approx 0$ . При этом  $r_2'(1 - S)/S = \infty$ , что соответствует работе двигателя в режиме х.х. Если же нагрузочный момент на валу двигателя превышает его вращающий момент, то ротор останавливается ( $S = 1$ ). При этом  $r_2'(1 - S)/S = 0$ , что соответствует режиму короткого замыкания (к.з.) асинхронного двигателя.

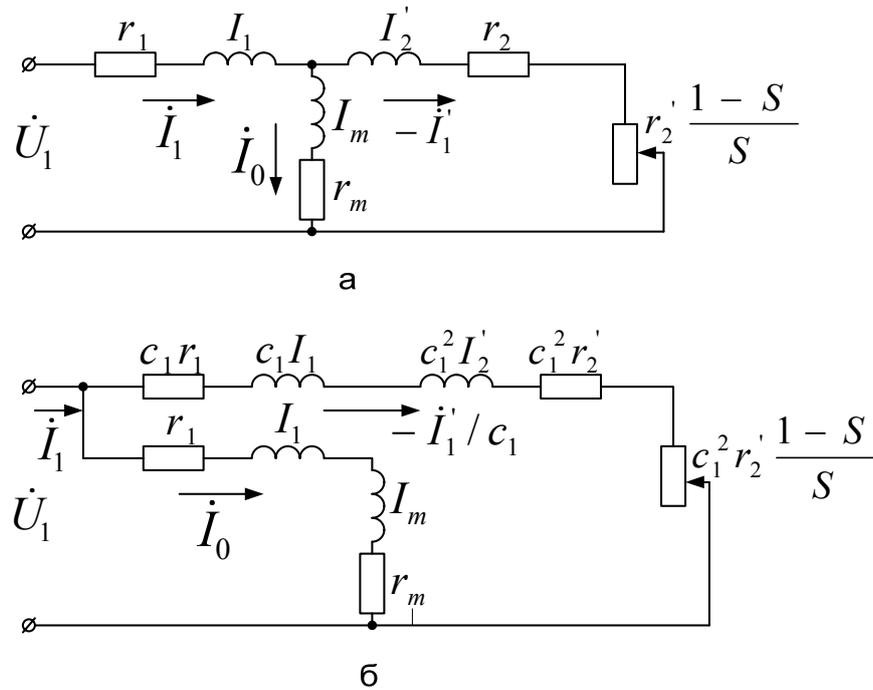


Рис. 6.5. Схемы замещения асинхронного двигателя:  
 а – Т-образная; б – Г-образная

#### 6.4. Рабочие характеристики асинхронного двигателя

Рабочие характеристики асинхронного двигателя (рис. 6.6) представляют собой графически выраженные зависимости частоты вращения  $n_2$ , КПД  $\eta$ , полезного момента (момента на валу)  $M_2$ , коэффициента мощности  $\cos \varphi$ , и тока статора  $I_1$  от полезной мощности  $P_2$  при  $U_1 = \text{const}$ ,  $f_1 = \text{const}$ .

Полная мощность двигателя:

$$P_S = \sqrt{3} \cdot U_1 \cdot I_1.$$

Активная мощность:

$$P_1 = P_S \cdot \cos \varphi.$$

Мощность на валу:

$$P_2 = P_1 \cdot \eta.$$

Скоростная характеристика  $n_2 = f(P_2)$ . Частота вращения ротора асинхронного двигателя  $n_2 = n_1(1 - S)$ .

## Скольжение

$$S = P_{\text{э2}} / P_{\text{эм}}, \quad (6.6)$$

т. е. скольжение двигателя, а следовательно, и его частота вращения определяются отношением электрических потерь в роторе к электромагнитной мощности  $P_{\text{эм}}$ . Пренебрегая электрическими потерями в роторе в режиме холостого хода, можно принять  $P_{\text{э2}} = 0$ , а поэтому  $S \approx 0$  и  $n_{20} \approx n_1$ . По мере увеличения нагрузки на валу двигателя отношение (6.6) растет, достигая значений 0,01–0,08 при номинальной нагрузке. В соответствии с этим зависимость  $n_2 = f(P_2)$  представляет собой кривую, слабо наклоненную к оси абсцисс. Однако при увеличении активного сопротивления ротора  $r_2'$  угол наклона этой кривой увеличивается. В этом случае изменения частоты вращения  $n_2$  при колебаниях нагрузки  $P_2$  возрастают. Объясняется это тем, что с увеличением  $r_2'$  возрастают электрические потери в роторе.

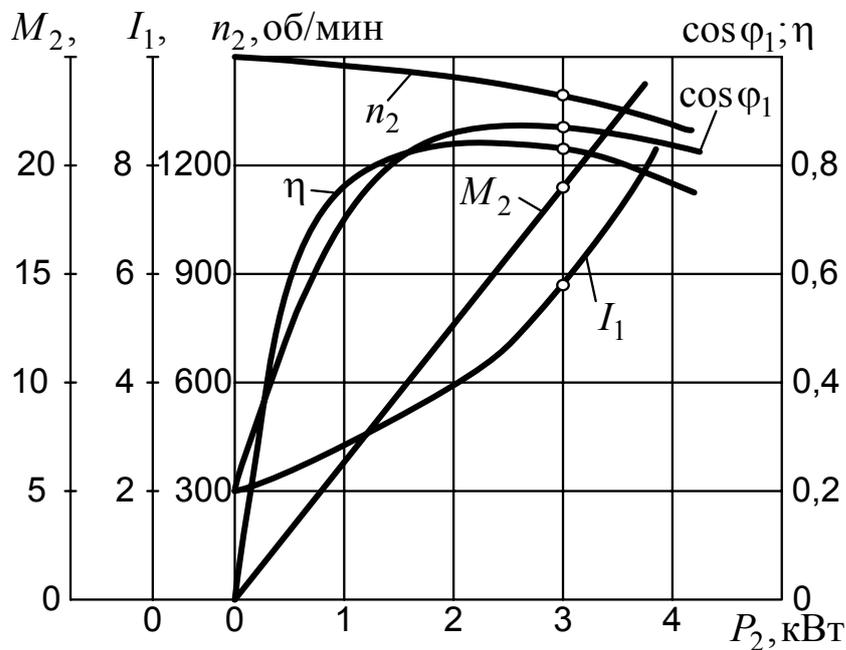


Рис. 6.6. Рабочие характеристики асинхронного двигателя

Зависимость  $M_2 = f(P_2)$ . Зависимость полезного момента на валу двигателя  $M_2$  от полезной мощности  $P_2$  определяется выражением

$$M_2 = P_2 / \omega_2 = 60P_2 / (2\pi n_2) = 9,55P_2 / n_2, \quad (6.7)$$

где  $P_2$  – полезная мощность, Вт;

$\omega_2 = 2\pi f_2 / 60$  – угловая частота вращения ротора.

Из этого выражения следует, что если  $n_2 = \text{const}$ , то график  $M_2 = f(P_2)$  представляет собой прямую линию. Но в асинхронном двигателе с увеличением нагрузки  $P_2$  частота вращения ротора уменьшается, а поэтому полезный мо-

мент на валу  $M_2$  с увеличением нагрузки возрастает несколько быстрее нагрузки, а, следовательно, график  $M_2 = f(P_2)$  имеет криволинейный вид.

Зависимость  $\cos \varphi_1 = f(P_2)$ . В связи с тем что ток статора  $I_1$  имеет реактивную (индуктивную) составляющую, необходимую для создания магнитного поля в статоре, коэффициент мощности асинхронных двигателей меньше единицы. Наименьшее значение коэффициента мощности соответствует режиму х.х. Объясняется это тем, что ток х.х.  $I_0$  при любой нагрузке остается практически неизменным. Поэтому при малых нагрузках двигателя ток статора невелик и в значительной части является реактивным ( $I_1 \approx I_0$ ). В результате сдвиг по фазе тока статора  $\dot{I}_1$  относительно напряжения  $\dot{U}_1$  получается значительным ( $\varphi_1 \approx \varphi_0$ ), лишь немногим меньше  $90^\circ$ . Коэффициент мощности асинхронных двигателей в режиме х.х. обычно не превышает 0,2. При увеличении нагрузки на валу двигателя растет активная составляющая тока  $I_1$  и коэффициент мощности возрастает, достигая наибольшего значения (0,80–0,90) при нагрузке, близкой к номинальной.

Дальнейшее увеличение нагрузки сопровождается уменьшением  $\cos \varphi_1$ , что объясняется возрастанием индуктивного сопротивления ротора ( $x_2$ ) за счет увеличения скольжения, а, следовательно, и частоты тока в роторе. В целях повышения коэффициента мощности асинхронных двигателей чрезвычайно важно, чтобы двигатель работал всегда или, по крайней мере, значительную часть времени с нагрузкой, близкой к номинальной. Это можно обеспечить лишь при правильном выборе мощности двигателя. Если же двигатель работает значительную часть времени недогруженным, то для повышения  $\cos \varphi_1$  целесообразно подводимое к двигателю напряжение  $U_1$  уменьшить. Например, в двигателях, работающих при соединении обмотки статора треугольником, это можно сделать, пересоединив обмотки статора в звезду, что вызовет уменьшение фазного напряжения в  $\sqrt{3}$  раз, во столько же раз уменьшится и ток в фазных обмотках двигателя. Кроме того, при соединении обмоток звездой линейный ток равен фазному, в то время как при соединении этих же обмоток треугольником линейный ток больше фазного в  $\sqrt{3}$  раз. Следовательно, переключив обмотки статора звездой, мы добиваемся уменьшения линейного тока в  $(\sqrt{3})^2 = 3$  раза. При этом магнитный поток статора, а, следовательно, и намагничивающий ток уменьшаются примерно в  $\sqrt{3}$  раз. Кроме того, активная составляющая тока статора несколько увеличивается. Все это способствует повышению коэффициента мощности двигателя. На рис. 6.7 представлены графики зависимости  $\cos \varphi_1$ , асинхронного двигателя от нагрузки при соединении обмоток статора звездой (кривая 1) и треугольником (кривая 2).

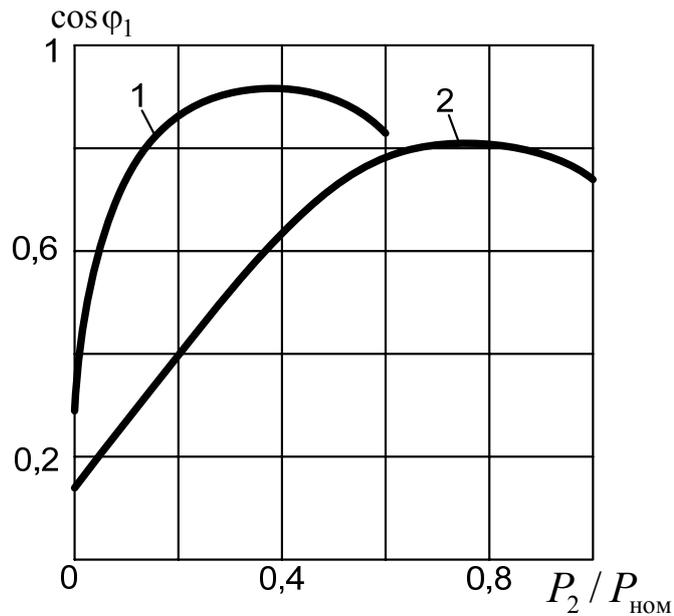


Рис. 6.7. Зависимость  $\cos \varphi_1$  от нагрузки при соединении обмотки статора звездой (1) и треугольником (2)

### 6.5. Пуск двигателей с фазным ротором

Пуск асинхронного двигателя сопровождается переходным процессом, обусловленным переходом ротора и механически связанных с ним частей исполнительного механизма из состояния покоя в состояние равномерного вращения, когда вращающий момент двигателя уравнивается суммой противодействующих моментов, действующих на ротор двигателя.

Пусковые свойства двигателя определяются в первую очередь значением пускового тока  $I_{\text{п}}$  или его кратностью  $I_{\text{п}} / I_{\text{ном}}$  и значением пускового момента  $M_{\text{п}}$  или его кратностью  $M_{\text{п}} / M_{\text{ном}}$ . Двигатель, обладающий хорошими пусковыми свойствами, развивает значительный пусковой момент при сравнительно небольшом пусковом токе. Однако получение такого сочетания пусковых параметров в асинхронном двигателе сопряжено с определенными трудностями, а иногда оказывается невозможным.

В начальный момент пуска скольжение  $S = 1$ , поэтому, пренебрегая током х.х., пусковой ток можно определить:

$$I_{\text{п}} = U_1 / \sqrt{(r_1 + r_2')^2 + (x_1 + x_2')^2}. \quad (6.8)$$

Пусковой момент

$$M_{\text{п}} = \frac{m_1 U_1^2 r_2' p}{2\pi f [(r_1 + r_2')^2 + (x_1 + x_2')^2]}. \quad (6.9)$$

Из (6.8) следует, что улучшить пусковые свойства двигателя можно увеличением активного сопротивления цепи ротора  $r_2'$ , поскольку в этом случае уменьшение пускового тока сопровождается увеличением пускового момента. В то же время напряжение  $U_1$  по-разному влияет на пусковые параметры дви-

гателя: с уменьшением  $U_1$  пусковой ток уменьшается, что благоприятно влияет на пусковые свойства двигателя, но одновременно уменьшается пусковой момент. Целесообразность применения того или иного способа улучшения пусковых свойств двигателя определяется конкретными условиями эксплуатации двигателя и требованиями, которые предъявляются к его пусковым свойствам.

Помимо пусковых значений тока  $I_{\text{п}}$  и момента  $M_{\text{п}}$  пусковые свойства двигателей оцениваются еще и такими показателями: продолжительность и плавность пуска, сложность пусковой операции, ее экономичность (стоимость и надежность пусковой аппаратуры и потерь энергии в ней). Пуск двигателей с фазным ротором. Наличие контактных колец у двигателей с фазным ротором позволяет подключить к обмотке ротора пусковой реостат (ПР). При этом активное сопротивление цепи ротора увеличивается до значения  $R_2 = r_2' + r_{\text{д}}'$ , где  $r_{\text{д}}'$  – электрическое сопротивление пускового реостата, приведенное к обмотке статора. Влияние возросшего значения активного сопротивления на пусковой момент двигателя  $M_{\text{п}}$  графически показано на рис. 6.8, из которого видно, что если при отсутствии ПР, т. е. при активном сопротивлении цепи ротора  $R_2 = r_2$ , пусковой момент  $M_{\text{п}} = M_{\text{п}0}$ , то при введении в цепь ротора добавочного активного сопротивления  $r_{\text{доб}}$ , когда  $R_2' = r_2' + r_{\text{доб}}'$ , пусковой момент возрастает и при  $R_2'' = r_2' + r_{\text{доб}}'' = x_1 + x_2$  достигает наибольшего значения  $M_{\text{п,max}}$ . При  $R_2' > x_1 + x_2$  пусковой момент уменьшается.

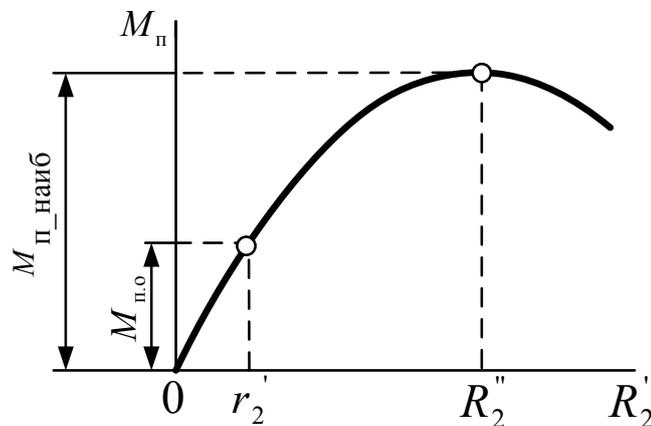


Рис. 6.8. Зависимость пускового момента от активного сопротивления цепи ротора

При выборе сопротивления пускового реостата  $r_{\text{доб}}$  исходят из условий пуска двигателя: если двигатель включают при значительном нагрузочном моменте на валу, сопротивление пускового реостата  $r_{\text{доб}}$  выбирают таким, чтобы обеспечить наибольший пусковой момент; если же двигатель включают при небольшом нагрузочном моменте на валу, когда пусковой момент не имеет решающего значения для пуска, оказывается целесообразным сопротивление ПР  $r_{\text{доб}}$  выбирать несколько больше значения, соответствующего наибольшему

пусковому моменту, т. е. чтобы  $R_2' > x_1 + x_2'$ . В этом случае пусковой момент оказывается несколько меньшим наибольшего значения  $M_{п.маx}$ , но зато пусковой ток значительно уменьшается.

На рис. 6.9, а показана схема включения ПР в цепь фазного ротора. В процессе пуска двигателя ступени ПР переключают таким образом, чтобы ток ротора оставался приблизительно неизменным, а среднее значение пускового момента было близко к наибольшему. На рис. 6.9, б представлен график изменения пускового момента асинхронного двигателя при четырех ступенях пускового реостата. Так, в начальный момент пуска (первая ступень реостата) пусковой момент равен  $M_{п.маx}$ . По мере разгона двигателя его момент уменьшается по кривой 1. Как только значение момента уменьшится до значения  $M_{п.мин}$  рычаг реостата переводят на вторую ступень и сопротивление реостата уменьшается. Теперь зависимость  $M = f(S)$  выражается кривой 2 и пусковой момент двигателя вновь достигает  $M_{п.маx}$ . Затем ПР переключают на третью и на четвертую ступени (кривые 3 и 4).

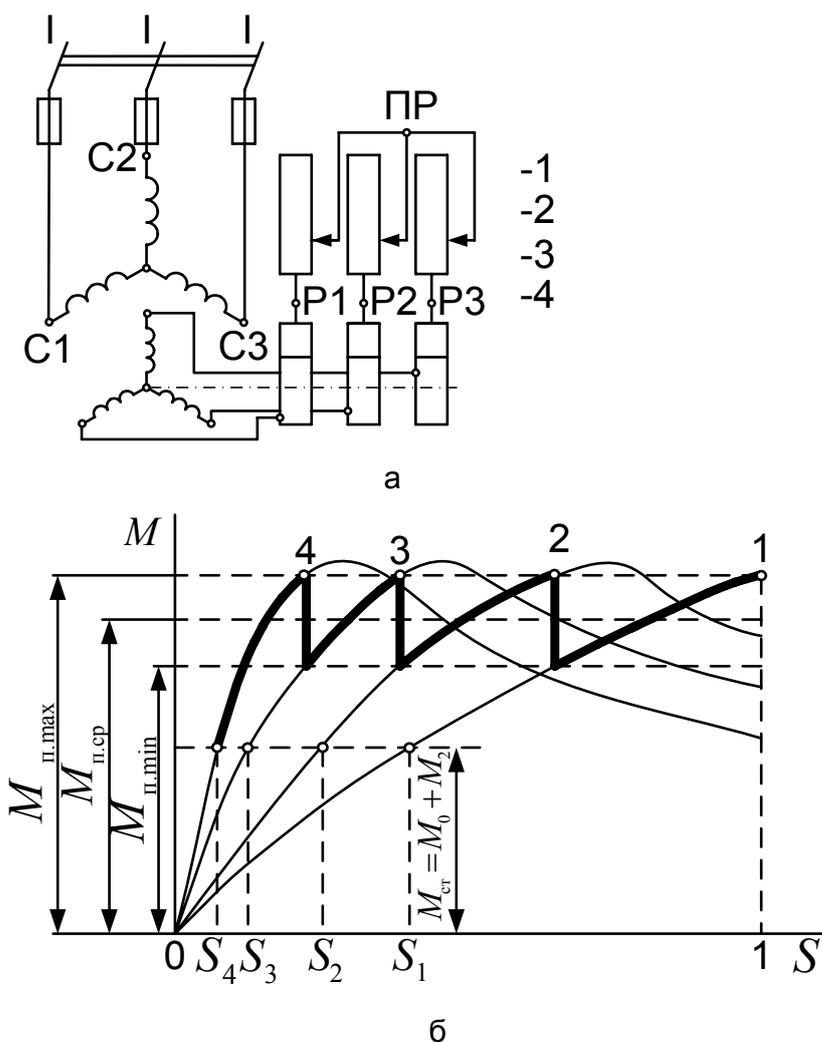


Рис. 6.9. Схема включения пускового реостата (а) и построение графика пускового момента (б) асинхронного двигателя с фазным ротором

После того как электромагнитный момент двигателя уменьшится до значения, равного значению противодействующего момента на валу двигателя, частота вращения ротора достигнет установившегося значения и процесс пуска двигателя будет закончен. Таким образом, в течение всего процесса пуска значение пускового момента остается приблизительно постоянным, равным  $M_{п.ср}$ . Следует иметь в виду, что при слишком быстром переключении ступеней реостата пусковой ток может достигнуть недопустимо больших значений.

В асинхронных двигателях с фазным ротором обеспечивается наиболее благоприятное соотношение между пусковым моментом и пусковым током: большой пусковой момент при небольшом пусковом токе (в 2–3 раза больше номинального). Недостатками пусковых свойств двигателей с фазным ротором являются некоторая сложность, продолжительность и неэкономичность пусковой операции. Последнее обусловлено необходимостью применения в схеме двигателя пускового реостата и непроизводительным расходом электроэнергии при его нагреве.

У трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором мощностью менее 1 кВт кратность пускового тока не превышает 2,5–4,5. Учитывая небольшое значение номинального тока статора, пусковой ток при такой кратности не достигает значений, способных вызывать нежелательные явления в питающей сети либо в двигателе. Поэтому при пуске асинхронных двигателей малой мощности обычно не применяют специальных мер для ограничения пускового тока. При пуске двигателей мощностью более 1 кВт, кратность пускового тока которых 5,5–7,5, иногда применяют меры по ограничению пускового тока путем снижения напряжения на время пуска двигателя при условии, что нагрузочный момент в этом интервале времени невелик.

При пуске двигателя с фазным ротором в каждую обмотку фазы ротора через контактные кольца и щетки включают добавочное сопротивление в виде пускового реостата ПР, что уменьшает пусковой ток и увеличивает пусковой момент. По мере разгона ротора переключают ступени реостата ПР и постепенно уменьшают его сопротивление. По окончании пуска сопротивление реостата ПР уменьшают до  $R_{доб} = 0$  и двигатель работает с короткозамкнутым ротором.

## 6.6. Пуск двигателей с короткозамкнутым ротором

Пуск непосредственным включением в сеть (рис. 6.10), отличаясь простотой, имеет существенный недостаток: в момент подключения двигателя к сети в обмотке статора возникает большой пусковой ток, в 5–7 раз превышающий номинальный ток двигателя.

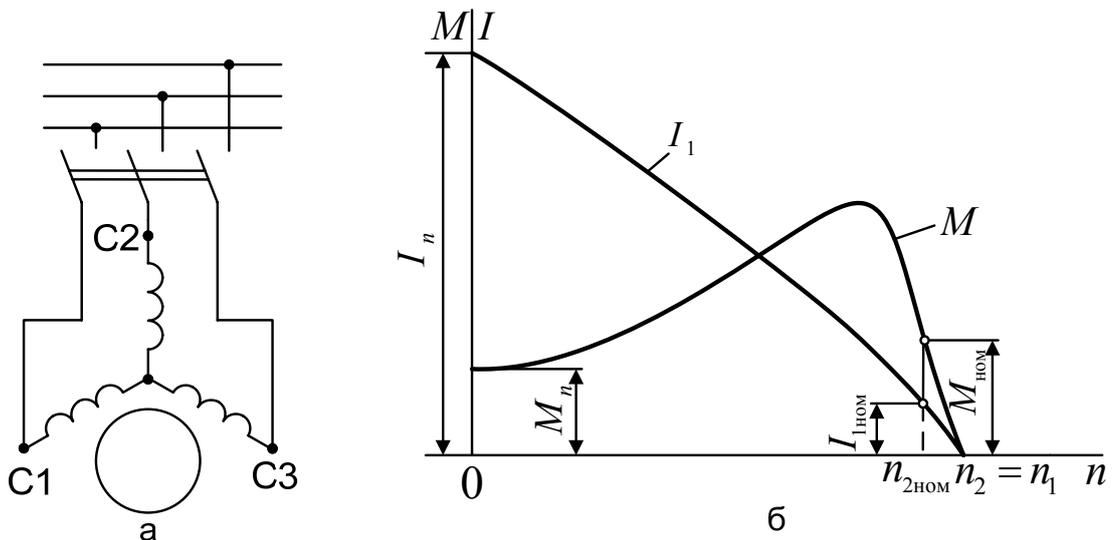


Рис. 6.10. Схема непосредственного включения в сеть (а) и графики изменения тока и момента при пуске (б) асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

При небольшой инерционности исполнительного механизма частота вращения двигателя быстро достигает установившегося значения и пусковой ток также быстро падает, не вызывая перегрева обмотки статора. Но такой значительный бросок тока в питающей сети может вызвать в ней заметное падение напряжения. Однако этот способ пуска благодаря своей простоте получил наибольшее применение для двигателей мощностью до 38–50 кВт и более (при достаточном сечении жил токоподводящего кабеля). При необходимости уменьшения пускового тока двигателя применяют какой-либо из способов пуска короткозамкнутых двигателей при пониженном напряжении.

### 6.7. Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей

Частота вращения ротора асинхронного двигателя

$$n_2 = n_1(1 - S) = (f_1 60 / p)(1 - S). \quad (6.10)$$

Из этого выражения следует, что частоту вращения ротора асинхронного двигателя можно регулировать изменением какой-либо из трех величин: скольжения  $S$ , частоты тока в обмотке статора  $f_1$  или числа полюсов в обмотке статора  $2p$ .

Регулирование частоты вращения изменением скольжения  $S$  возможно тремя способами: изменением подводимого к обмотке статора напряжения, нарушением симметрии этого напряжения и изменением активного сопротивления обмотки ротора.

Регулировка частоты вращения изменением скольжения происходит только в нагруженном двигателе. В режиме холостого хода скольжение, а, следовательно, и частота вращения остаются практически неизменными.

### **6.7.1. Регулирование частоты вращения изменением подводимого напряжения**

Возможность этого способа регулирования подтверждается графиками  $M = f(S)$ , построенными для разных значений  $U_1$ . При неизменной нагрузке на валу двигателя увеличение подводимого к двигателю напряжения вызывает рост частоты вращения. Однако диапазон регулирования частоты вращения получается небольшим, что объясняется узкой зоной устойчивой работы двигателя, ограниченным значением критического скольжения и недопустимостью значительного превышения номинального значения напряжения. Последнее объясняется тем, что с превышением номинального напряжения возникает опасность чрезмерного перегрева двигателя, вызванного резким увеличением электрических и магнитных потерь. В то же время с уменьшением напряжения  $U_1$  двигатель утрачивает перегрузочную способность, которая, как известно, пропорциональна квадрату напряжения сети.

Подводимое к двигателю напряжение изменяют либо регулировочным автотрансформатором, либо реакторами, включаемыми в разрыв линейных проводов.

Узкий диапазон регулирования и неэкономичность (потребность в дополнительных устройствах) ограничивают область применения этого способа регулирования частоты вращения.

### **6.7.2. Регулирование частоты вращения нарушением симметрии подводимого напряжения**

При нарушении симметрии подводимой к двигателю трехфазной системы напряжения вращающееся поле статора становится эллиптическим. При этом поле приобретает обратную составляющую (встречное поле), которая создает момент  $M_{обр}$ , направленный встречно вращающему моменту  $M_{пр}$ . В итоге результирующий электромагнитный момент двигателя уменьшается:  $(M = M_{пр} - M_{обр})$ .

Механические характеристики двигателя при этом способе регулирования располагаются в зоне между характеристикой при симметричном напряжении и характеристикой при однофазном питании двигателя – пределом несимметрии трехфазного напряжения.

Для регулировки несимметрии подводимого напряжения можно в цепь одной из фаз включить однофазный регулировочный автотрансформатор (АТ). При уменьшении напряжения па выходе АТ несимметрия увеличивается и частота вращения ротора уменьшается. Недостатками этого способа регулирования являются узкая зона регулирования и уменьшение КПД двигателя по мере увеличения несимметрии напряжения. Обычно этот способ регулирования частоты вращения применяют лишь в двигателях малой мощности.

### 6.7.3. Регулирование частоты вращения изменением активного сопротивления в цепи ротора.

Этот способ регулирования частоты вращения возможен лишь в двигателях с фазным ротором. Механические характеристики асинхронного двигателя, построенные для различных значений активного сопротивления цепи ротора, показывают, что с увеличением активного сопротивления ротора возрастает скольжение, соответствующее заданному нагрузочному моменту. Частота вращения двигателя при этом уменьшается. Зависимость скольжения (частоты вращения) от активного сопротивления цепи ротора выражается формулой

$$S = m_1 I_2'^2 r_2' / (\omega_1 M). \quad (6.11)$$

Практически изменение активного сопротивления цепи ротора достигается включением в цепь ротора регулировочного реостата (РР), подобного пусковому реостату (ПР) (см. рис. 6.9), но рассчитанного на длительный режим работы. Электрические потери в роторе пропорциональны скольжению ( $P_{\Sigma 2} = SP_{\Sigma \text{ЭМ}}$ ), поэтому уменьшение частоты вращения (увеличение скольжения) сопровождается ростом электрических потерь в цепи ротора и снижением КПД двигателя. Так, если при неизменном нагрузочном моменте на валу двигателя увеличить скольжение от 0,02 до 0,5, что соответствует уменьшению частоты вращения примерно вдвое, то потери в цепи ротора составят почти половину электромагнитной мощности двигателя. Это свидетельствует о неэкономичности рассматриваемого способа регулирования. К тому же необходимо иметь в виду, что рост потерь в роторе сопровождается ухудшением условий вентиляции из-за снижения частоты вращения, что приводит к перегреву двигателя.

Рассматриваемый способ регулирования имеет еще и тот недостаток, что участок механической характеристики, соответствующий устойчивой работе двигателя, при введении в цепь ротора добавочного сопротивления становится более пологим и колебания нагрузочного момента на валу двигателя сопровождаются значительными изменениями частоты вращения ротора. Из рис. 6.11 видно, что если нагрузочный момент двигателя изменится на  $\Delta M_{\text{ст}} = M_{\text{ст}}' - M_{\text{ст}}''$ , то изменение частоты вращения при выведенном регулировочном реостате ( $r_d' = 0$ ) составит  $\Delta n_{2I}$ , а при введенном реостате –  $\Delta n_{2II}$ . В последнем случае изменение частоты вращения значительно больше.

Несмотря на указанные недостатки, рассмотренный способ регулирования частоты вращения широко применяется в асинхронных двигателях с фазным ротором. В зависимости от конструкции регулировочного реостата этот способ регулирования частоты вращения может быть плавным (при плавном изменении сопротивления РР) или ступенчатым (при ступенчатом изменении сопротивления РР).

Способ обеспечивает регулирование частоты вращения в широком диапазоне, но только вниз от синхронной частоты вращения. Вместе с тем он обеспечивает двигателю улучшенные пусковые свойства.

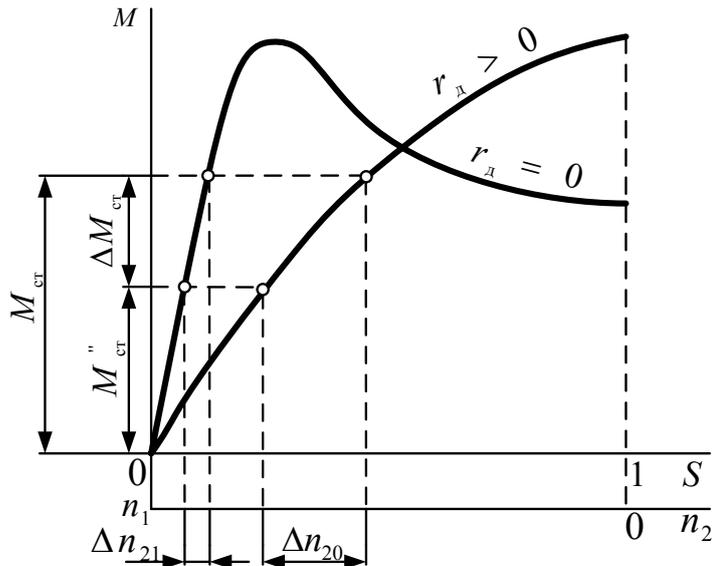


Рис. 6.11. Влияние сопротивления цепи ротора на колебания частоты вращения при изменении нагрузки

Недостатки способа: большие потери энергии в  $R_{доб}$ , увеличение потерь энергии в обмотке ротора, вызванное повышением скольжения  $S$ , ограниченная область применения (только для двигателей с фазным ротором), возможность регулирования частоты вращения ротора только в сторону уменьшения от номинальной.

Использование данного способа позволяет обеспечить плавность регулирования частоты вращения двигателя в широком диапазоне.

#### 6.7.4. Регулирование частоты вращения изменением частоты тока в статоре

Этот способ регулирования (частотное регулирование) основан на изменении синхронной частоты вращения  $n_1 = f_1 60 / p$ .

Для осуществления этого способа регулирования необходим источник питания двигателя переменным током с регулируемой частотой. В качестве таких источников могут применяться электромашинные, ионные или полупроводниковые преобразователи частоты (ПЧ). Чтобы регулировать частоту вращения, достаточно изменить частоту тока  $f_1$ . Но с изменением частоты  $f_1 = \omega_1 p / (2\pi)$  будет изменяться и максимальный момент. Поэтому для сохранения неизменными перегрузочной способности, коэффициента мощности и КПД двигателя на требуемом уровне необходимо одновременно с изменением частоты  $f_1$  изменять и напряжение питания  $U_1$ . Характер одновременного изменения  $f_1$  и  $U_1$  зависит от закона изменения момента нагрузки и определяется уравнением

$$U_1' / U_1 = (f_1' / f_1) \sqrt{M' / M}, \quad (6.12)$$

где  $U_1$  и  $M$  – напряжение и момент при частоте  $f_1$ ;

$U_1'$  и  $M'$  – напряжение и момент при частоте  $f_1'$ .

Если частота вращения двигателя регулируется при условии постоянства момента нагрузки ( $M = M' = \text{const}$ ), то подводимое к двигателю напряжение необходимо изменять пропорционально изменению частоты тока:

$$U_1' = U_1 \cdot f_1' / f_1 \quad (6.13)$$

При этом мощность двигателя увеличивается пропорционально нарастанию частоты вращения. Если же регулирование производится при условии постоянства мощности двигателя ( $P_{\text{эм}} = M \cdot \omega_1 = \text{const}$ ), то подводимое напряжение следует изменять в соответствии с законом

$$U_1' = U_1 \sqrt{f_1' / f_1} \quad (6.14)$$

Частотное регулирование двигателей позволяет плавно изменять частоту вращения в широком диапазоне (до 100:1). Однако источники питания с регулируемой частотой тока повышают стоимость установки. Поэтому частотное регулирование до последнего времени применялось в основном для одновременного регулирования группы двигателей, работающих в одинаковых условиях (например, рольганговых двигателей). Но благодаря развитию силовой полупроводниковой техники в последние годы созданы устройства частотного регулирования, технико-экономические показатели которых оправдывают их индивидуальное применение для регулирования частоты вращения одиночных двигателей.

Использование асинхронных двигателей, укомплектованных такими устройствами для частотного регулирования, целесообразно в пожаро- и взрывоопасных средах (химическая и нефтеперерабатывающая промышленность), где применение коллекторных двигателей недопустимо.

#### **6.7.5. Регулирование частоты вращения изменением числа полюсов обмотки статора**

Этот способ регулирования дает ступенчатое изменение частоты вращения и применяется в асинхронных двигателях с короткозамкнутым ротором. Обмотка статора этих двигателей имеет конструкцию, позволяющую путем переключения менять в ней количество полюсов  $2p$ . Такие двигатели называются многоскоростными, они могут изготавливаться на две, три или четыре синхронные частоты вращения. Например, четырехскоростной двигатель имеет такую конструкцию обмотки статора, при которой можно путем переключений получить восемь, шесть, четыре, два полюса. При частоте 50 Гц в двигателе можно получить синхронные частоты вращения соответственно 750, 1000, 1500 и 3000 об/мин.

Изменять число полюсов в обмотке статора можно либо укладкой на статоре двух обмоток с разным числом полюсов, либо укладкой на статоре одной обмотки, конструкция которой позволяет путем переключения катушечных групп получать различное число полюсов. Последний способ получил наибольшее применение.

Возможны два режима работы асинхронных двигателей с полюсно переключаемыми обмотками: режим постоянного момента (рис. 6.12, а) – при переключении двигателя с одной частоты вращения на другую вращающий момент на валу двигателя  $M_2$  остается неизменным, а мощность  $P_2$  изменяется пропорционально частоте вращения  $n_2$ ; режим постоянной мощности (рис. 6.12, б) – при переключении двигателя с одной частоты вращения на другую мощность  $P_2$  остается примерно одинаковой, а момент на валу  $M_2$  изменяется соответственно изменению частоты вращения  $n_2$ :

$$P_2 = 0,105M_2n_2, \quad (6.15)$$

$$M_2 = 9,55P_2n_2. \quad (6.16)$$

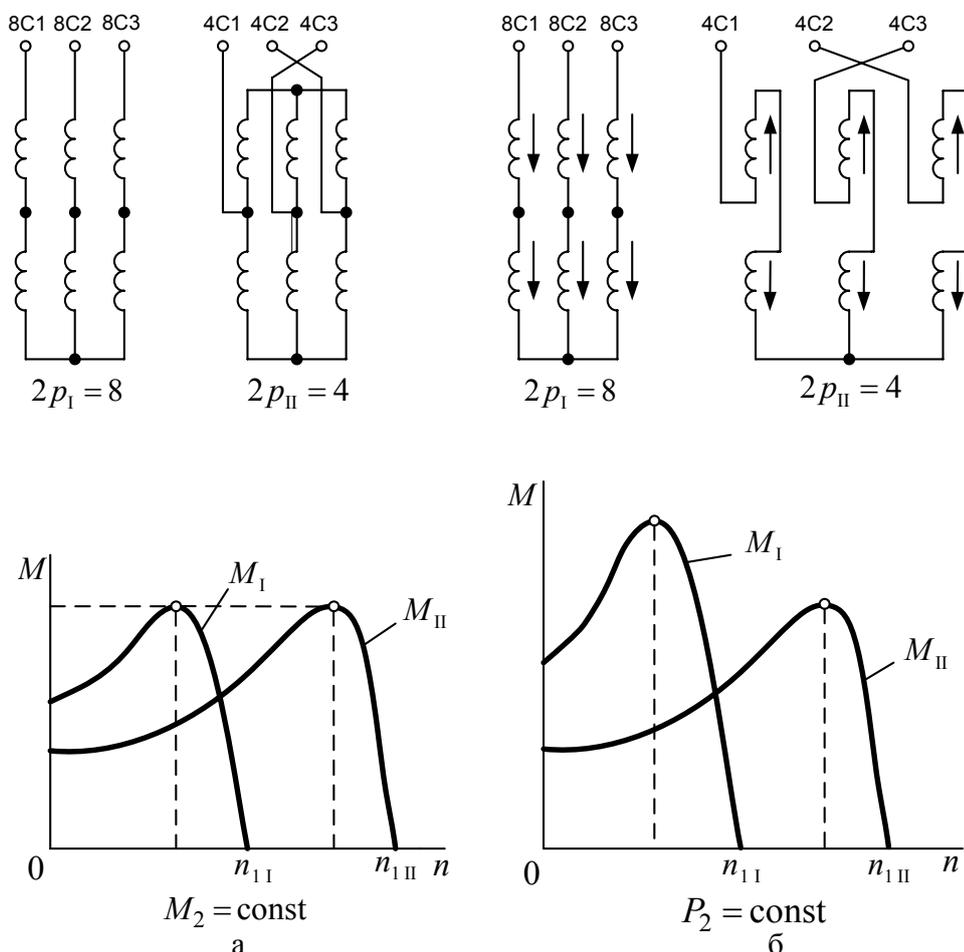


Рис. 6.12. Схемы переключения числа полюсов механические характеристики в режимах постоянного момента (а) и постоянной скорости (б)

Если на статоре расположить две полюсно переключаемые обмотки, то получим четырехскоростной двигатель. Однако возможно применение и одной

обмотки, допускающей путем переключения катушечных групп получение до четырех вариантов различных чисел полюсов. Например, асинхронный двигатель типа 4А180М12/8/6/4 имеет на статоре обмотку, допускающую переключение на 12, 8, 6, 4 полюса.

Переключение числа полюсов – это самый дешевый способ изменения частоты вращения асинхронного двигателя, поэтому такие двигатели часто используются в приводных системах подъемно-транспортного оборудования. При этом высокая частота вращения используется для быстрого хода, а низкая – для позиционирования.

На рис. 6.13 показана механическая характеристика асинхронного двигателя с переключением числа полюсов. При переключении обмотки статора с 2-полюсного  $2P$  на 8-полюсное  $8P$  включение частота вращения не сразу снижается до синхронной, двигатель кратковременно работает в генераторном режиме 2. За счет преобразования кинетической энергии в электрическую торможение от высокой частоты вращения до низкой выполняется без потерь мощности и износа деталей. При этом торможении достигается вращающий момент, величина которого в первом приближении в 2–2,5 раза больше пускового момента двигателя  $M_A$  с включением обмотки для меньшей частоты вращения. Для снижения броска момента при переключении пар полюсов часто используются электронные устройства плавного переключения числа полюсов.

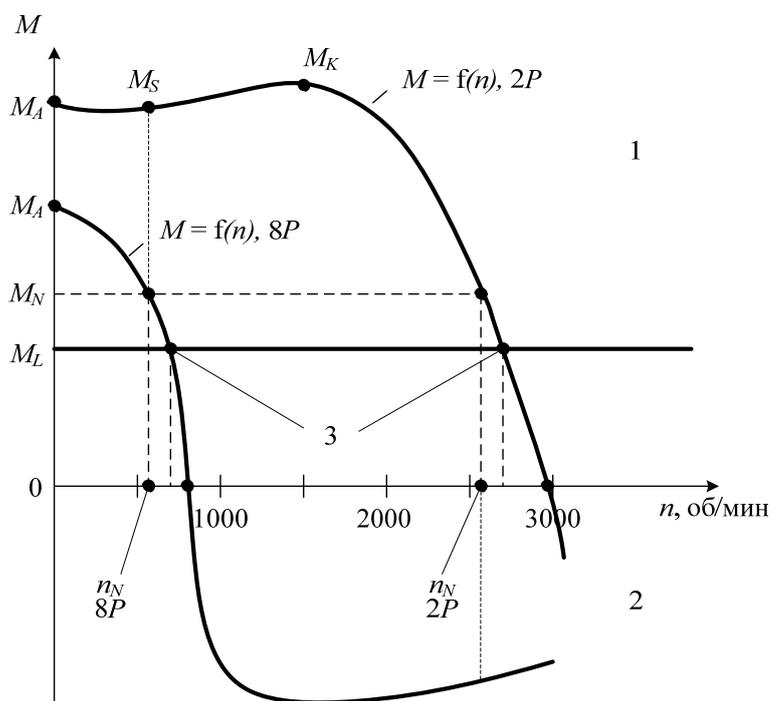


Рис. 6.13. Механическая характеристика асинхронного двигателя с переключением числа полюсов

При переключении обмотки статора с 8-полюсного на 2-полюсное включение двигатель продолжает работать в двигательном режиме 1. При этом вращающий момент, развиваемый двигателем, увеличивается, пока не достигнет величины опрокидывающего (критического) момента. Переходной процесс завершается, когда, как и в первом случае, двигатель достигает соответствующей рабочей точки 3. Момент нагрузки  $M_L$  может быть как больше, так и меньше номинального момента двигателя  $M_N$ .

Регулирование частоты вращения изменением числа полюсов на статоре применяют исключительно в асинхронных двигателях с короткозамкнутым ротором, поскольку число полюсов в обмотке этого ротора всегда равно числу полюсов статора и для изменения частоты вращения достаточно изменить число полюсов в обмотке ротора. В случае же фазного ротора пришлось бы и на роторе применить полюсно переключаемую обмотку, что привело бы к недопустимому усложнению двигателя.

Многоскоростные асинхронные двигатели по сравнению с обычными (односкоростными) имеют большие габаритные размеры, массу и стоимость.

Ступенчатого изменения частоты вращения можно также достичь, изменяя соединение обмоток статора (звезда/треугольник) при неизменном напряжении питания.

## 6.8. Параметры асинхронного двигателя

Основные параметры асинхронного двигателя указываются на его паспортной табличке: типоразмер, номинальная мощность, режим работы, номинальная частота вращения, номинальный ток, номинальное напряжение, коэффициент мощности; КПД, степень защиты IP, температурный класс изоляции.

Номинальная мощность  $P_N$  двигателя зависит от температуры окружающей среды и высоты над уровнем моря. Номинальная мощность, указанная на заводской табличке, действительна при температуре окружающей среды до  $40\text{ }^\circ\text{C}$  и высоте не более 1000 м над уровнем моря. При отклонениях от этих данных номинальную мощность следует снизить, пересчитав ее по следующей формуле:

$$P_{N1} = P_N \cdot f_H \cdot f_T,$$

где  $P_{N1}$  – сниженная номинальная мощность [кВт];

$P_N$  – номинальная мощность [кВт];

$f_T$  – температурный коэффициент пересчета;

$f_H$  – высотный коэффициент пересчета.

По действующему стандарту на заводской табличке двигателя в качестве номинальной мощности  $P_N$  указывают его выходную мощность, т. е. механическую мощность, создаваемую на валу двигателя. Двигатели большего типоразмера имеют более благоприятный КПД  $\eta$  и коэффициент мощности  $\cos \varphi$ , чем двигатели меньшего типоразмера. КПД и коэффициент мощности изменяются и в зависимости от степени использования двигателя, а именно, снижа-

ются при работе в режиме неполной нагрузки.

Действующий стандарт также устанавливает допуски (табл. 6.1) для двигателей, работающих при номинальном напряжении. Эти допуски действительны и в том случае, если вместо определенного значения указан диапазон номинального напряжения.

Допуски

Таблица 6.1

Параметр	Допуск
Напряжение и частота	допуск А
КПД $\eta$	при $P_N \leq 50$ кВт: $-0,15 \cdot (1 - \eta)$ при $P_N > 50$ кВт: $-0,1 \cdot (1 - \eta)$
Коэффициент мощности $\cos \varphi$	$-(1 - \cos \varphi) / 6$
Скольжение $S$	при $P_N < 1$ кВт: $\pm 30\%$ при $P_N \geq 1$ кВт: $\pm 20\%$
Пусковой ток $I_A$	$+20\%$
Пусковой момент $M_A$	$-15...+25\%$
Опрокидывающий момент $M_K$	$-10\%$
Момент инерции $J$	$\pm 10\%$

Допуск А – это допустимый диапазон, в пределах которого частота и напряжение могут отклоняться от соответствующих номинальных значений (задается графиком).

Мощность двигателя всегда зависит от режима работы и продолжительности включения. В соответствии с действующим стандартом существуют три основных номинальных режима работы электрических машин, различающиеся характером изменения нагрузки, и ряд дополнительных.

Продолжительный номинальный режим – когда при неизменной номинальной нагрузке  $P_n$  работа машины продолжается так долго, что температура всех ее частей успевает достигнуть установившихся значений  $\tau_{уст}$ . Условное обозначение режима  $S1$ . Различают продолжительный режим с неизменной нагрузкой  $P = const$  (рис. 6.14, а) и продолжительный режим с изменяющейся нагрузкой (рис. 6.14, б). Например, двигатели насосов, транспортеров, вентиляторов работают в продолжительном режиме с неизменной нагрузкой, а двигатели прокатных станков, металлорежущих станков и т. п. работают в продолжительном режиме с изменяющейся нагрузкой.

Кратковременный номинальный режим  $S2$  – когда периоды неизменной номинальной нагрузки чередуются с периодами включения двигателя (рис. 6.14, в). При этом периоды нагрузки двигателя  $t_n$  настолько кратковременны, что температуры всех частей двигателя не достигает установившихся значений, а периоды отключения двигателя настолько продолжительны, что все

части двигателя успевают охладиться до температуры окружающей среды. Стандартом установлена длительность периодов нагрузки 10; 30; 60 и 90 мин. В условном обозначении кратковременного режима указывается продолжительность периода нагрузки, например  $S2-30$  мин. В кратковременном режиме работают приводные двигатели шлюзов, разного рода заслонок и других запорных устройств, регулирующих подачу рабочего вещества (нефть, газ и др.) через трубопроводы к объекту потребления.

Повторно-кратковременный номинальный режим  $S3$  – когда кратковременные периоды номинальной нагрузки двигателя  $t_n$  чередуются с периодами отключения двигателя (паузами), причем за период нагрузки превышение температуры всех частей не успевает достигнуть установившихся значений, а за время паузы части двигателя не успевают охладиться до температуры окружающей среды. Общее время работы двигателя в повторно-кратковременном режиме разделяется на периодически повторяющиеся циклы. При повторно-кратковременном режиме график нагревания двигателя имеет вид пилообразной кривой (рис. 6.14,  $\delta$ ). Температура двигателя колеблется от  $\tau_{\min}$  до  $\tau_{\max}$ . Примерами повторно кратковременного режима являются работа электроприводов лифтов, подъемных кранов, экскаваторов и других устройств, для работы которых характерна цикличность (чередование периодов на грузки с паузами).

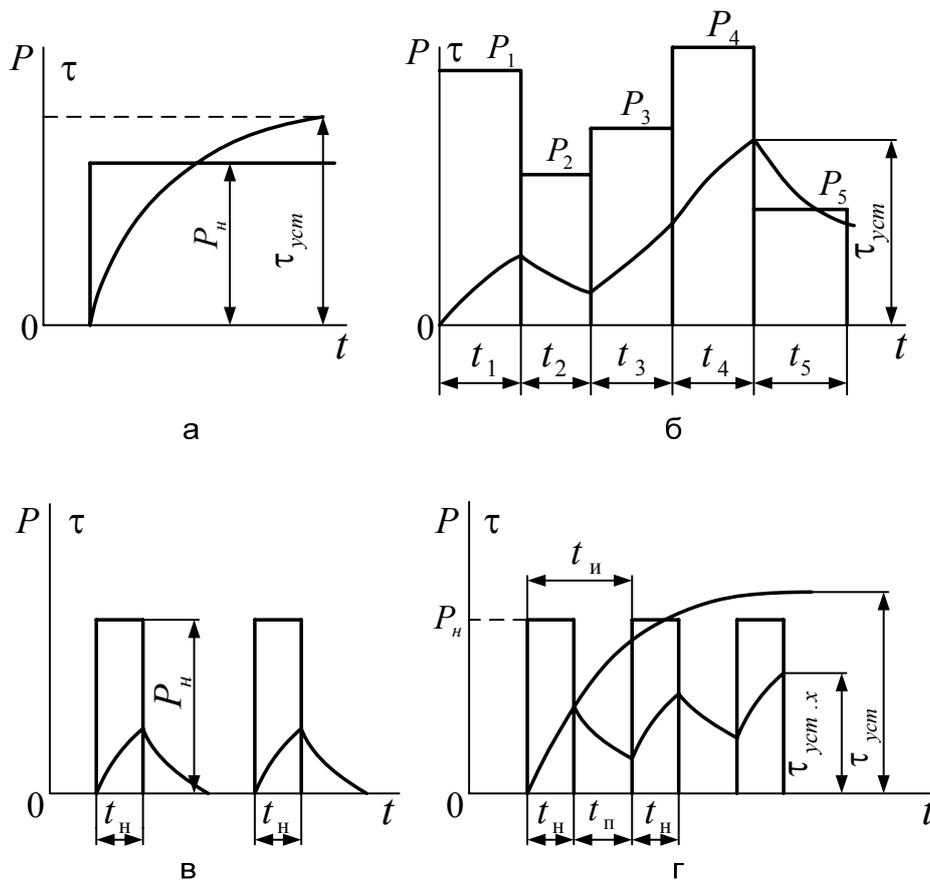


Рис. 6.14. Основные номинальные режимы работы

Если двигатель, рассчитанный на работу в режиме  $S1$ , должен работать с меньшей продолжительностью включения, то в качестве номинальной мощности можно использовать большее значение. Коэффициент пересчета  $K$  определяется по специальным таблицам. Например, при работе в режиме  $S2 - 30$  мин.  $K = 1,2$ , а при работе в режиме  $S3$  с относительной продолжительностью включения 25%  $K = 1,3$ .

В дополнительных номинальных режимах работы  $S4...S10$  необходимо учитывать количество и характер включений в час, время разгона, время работы под нагрузкой, способ торможения, время торможения, время холостого хода, продолжительность цикла, время простоя и потребление мощности.

## **7. Настройка системы управления электроприводом переменного тока**

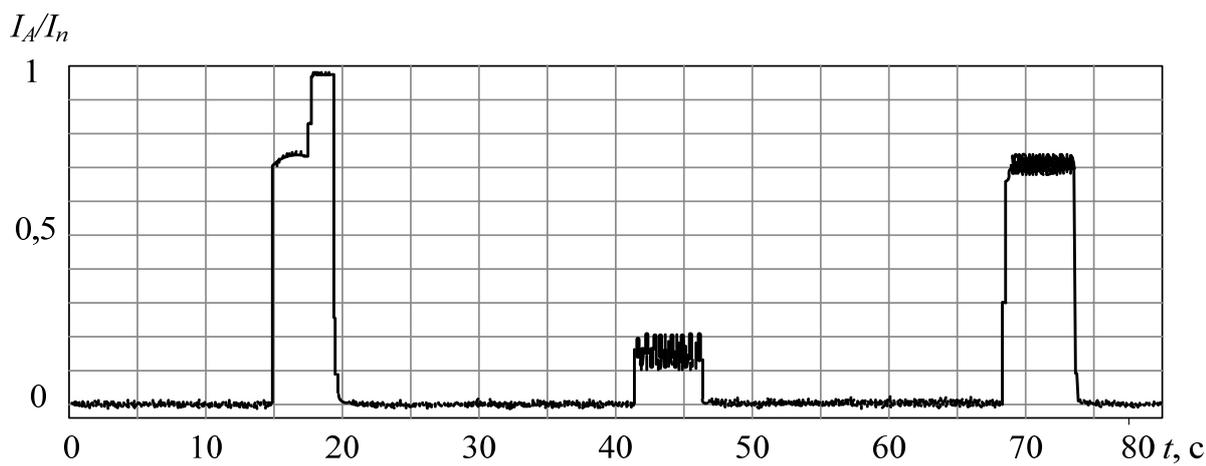
### **7.1. Автоматическая настройка параметров системы управления**

Современный уровень решения задачи автоматической настройки в системах управления асинхронного электропривода – это практическое внедрение преобразователей частоты, включающих в свои функциональные возможности самонастройку регуляторов (автонастройка, иногда автоадаптация).

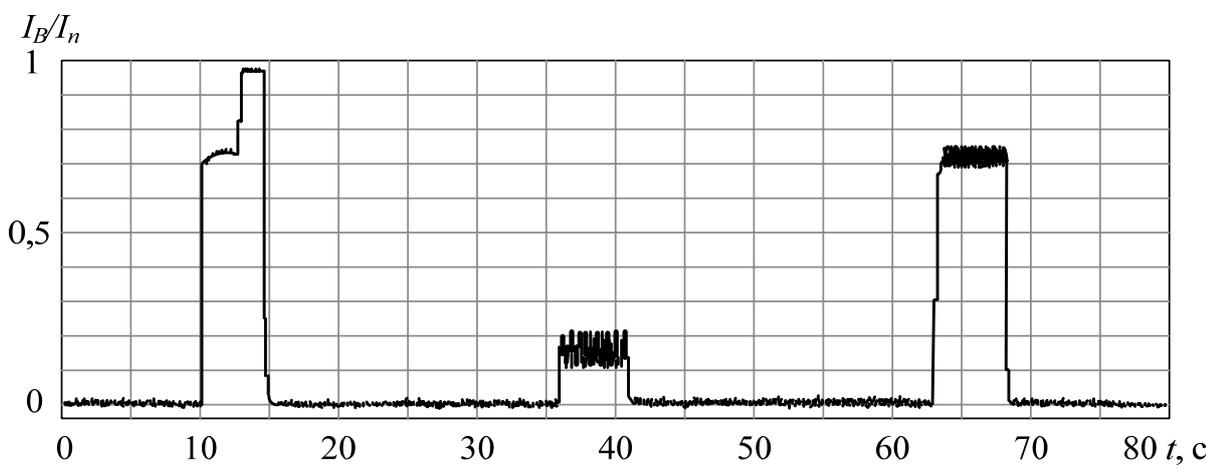
Перед проведением автоматической настройки необходимо ввести паспортные данные установленного двигателя. Затем в преобразователе выбирается режим автонастройки и при подаче команды *Run* процесс автонастройки системы запускается. Простейший алгоритм автонастройки приведен на рис. 7.1, где представлены графики изменения тока фазы А, В и С асинхронного двигателя в процессе автоматического определения параметров двигателя и автонастройки регуляторов тока без учета обратных токов соседних фаз [8]. При этом процессе вал двигателя не вращается (автонастройка без вращения).

Как видно из приведенных графиков, процесс длится 75 с (в современных преобразователях частоты этот процесс выполняется быстрее) и состоит из трех равных интервалов по 25 с. На первом интервале на каждую фазу двигателя последовательно подается постоянное напряжение, при этом ток нарастает ступенчато до 72 % и затем до 92 % от номинального тока двигателя. Полученные данные о величине и характере изменения тока позволяют определить значение активного сопротивления статора двигателя, а также провести настройку регуляторов тока преобразователя [1].

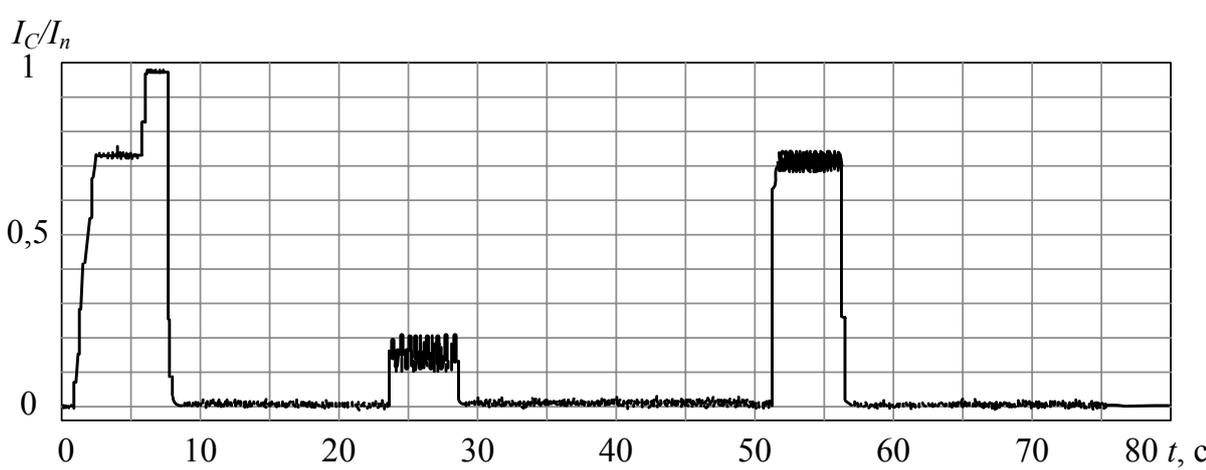
На втором интервале ток в фазах А, В и С – синусоидальный с амплитудой 5 %  $I_n$  двигателя, частотой 4 Гц и смещен относительно нулевой оси на 15 %  $I_n$ . Такой вид тока выбран с целью недопущения вращения оси ротора асинхронного двигателя. Полученные данные о токе могут быть использованы для нахождения значений индуктивностей статора и ротора, а также взаимной индуктивности.



а



б



в

Рис. 7.1. Графики изменения тока асинхронного двигателя в процессе автоматического определения параметров двигателя и автонастройки регулятора тока:  
а – фаза А; б – фаза В, в – фаза С

Третий интервал схож со вторым, ток в фазах А, В и С – синусоидальный с амплитудой 2,5 %  $I_n$  двигателя, частотой 8 Гц и смещен относительно нулевой оси на 70 %  $I_n$ . При этом ось ротора асинхронного двигателя остается непод-

вижной. Информация о токе используется для уточнения рассчитываемых значений индуктивности статора и ротора, а также взаимной индуктивности [7].

После проведения автонастройки и определения параметров двигателя, настраивается математическая модель асинхронного двигателя, параметры сохраняются в файле конфигурации. В процессе выполнения автонастройки определяются следующие параметры: активное сопротивление статора; индуктивное сопротивление статора; активное сопротивление ротора; индуктивное сопротивление ротора; индуктивность рассеяния двигателя; ток ненагруженного двигателя; коэффициент насыщения сердечника двигателя; коэффициенты регулятора тока и др. Большинство производителей частотных преобразователей не раскрывает всех параметров, определяемых в процессе автонастройки, а алгоритм проведения процедуры относит к интеллектуальной собственности.

## 7.2. Процедура проведения автонастройки

Как правило, функция автоматической настройки параметров системы управления на параметры силового канала привода реализуется с помощью набора тестовых режимов, при выполнении которых осуществляется начальная установка параметров привода. Одним из показателей эффективности автоматической настройки параметров является простота и возможность реализации автонастраиваемых режимов исключительно внутренними ресурсами привода в реальных условиях его работы. В ряде известных методов экспериментального определения параметров двигателя предполагается привлечение дополнительных средств, связанных, например, с фиксацией вала в режиме короткого замыкания АД, измерением напряжения на зажимах АД в режиме его отключения от источника питания постоянным током. Наиболее удачными тестовыми режимами, в этом смысле, являются режимы, выполняемые при питании двигателя «неподвижным» вектором напряжения (частота вращения вектора напряжения равна нулю), а также режим реального холостого хода.

Параметры тестового режима (среднее значение тока статора, период модуляции, ориентация вектора напряжения в пространстве, расположение моментов выборок, число опытов) задаются таким образом, чтобы минимизировать ошибки измерения и расчетные погрешности, связанные с линейной аппроксимацией кривой тока.

В преобразователе частоты F7 используются следующие виды автонастройки:

1. автонастройка с вращением;
2. автонастройка без вращения;
3. автонастройка без вращения только для измерения межфазного сопротивления.

**Автонастройка с вращением ( $T1-01 = 0$ ).** Автонастройка с вращением применяется только для векторного управления. Инвертор (здесь и далее **инвертор** считается синонимом преобразователю частоты) вращает двигатель примерно 1 мин и автоматически настраивает систему управления.

**Автонастройка без вращения (T1-01 = 1).** Автонастройка без вращения применяется только для векторного управления. Инвертор подает питание на невращающийся двигатель примерно 1 мин, после чего определяются некоторые параметры двигателя. Остальные параметры двигателя и регуляторов системы определяются автоматически во время первого пуска.

**Автонастройка без вращения для определения межфазного сопротивления (T1-01 = 2).** Автонастройка без вращения, служащая для определения межфазного сопротивления, может применяться при любом режиме регулирования. Это единственно возможный вид автонастройки для V/f-регулирования. Она может использоваться для улучшения характеристик регулирования при большой длине кабеля, при изменении длины кабеля, а также в том случае, когда двигатель и инвертор различаются по мощности. При данной автонастройке инвертор подает питание на невращающийся двигатель примерно 20 с и автоматически измеряет межфазное сопротивление двигателя и сопротивление кабеля.

#### **Замечания.**

1. Автонастройка инвертора кардинально отличается от автоподстройки сервосистемы. Процедура автонастройки инвертора автоматически настраивает параметры системы в соответствии с распознанными данными двигателя, тогда как процедура автоподстройки в сервосистеме настраивает параметры на основании распознанных габаритов нагрузки.

2. Автонастройку без вращения необходимо использовать в тех случаях, когда нагрузка не может быть отсоединена от двигателя. Автонастройку с вращением необходимо использовать тогда, когда требуется высокая точность, либо двигатель не подсоединен к нагрузке. Если автонастройка с вращением двигателя выполняется для нагруженного двигателя, параметры двигателя будут определены неточно, и это снизит качество регулирования.

3. Если длина кабеля связи с двигателем изменяется и начинает превышать 50 м, необходимо выполнить автонастройку без вращения для измерения межфазного сопротивления.

4. При выполнении автонастройки без вращения на двигатель подается питание, хотя двигатель и не вращается. Не следует прикасаться к двигателю, пока автонастройка не будет завершена.

5. Чтобы отменить автонастройку, необходимо нажать клавишу *STOP* на цифровой панели управления частотного преобразователя.

Чтобы произвести автонастройку, необходимо, используя клавишу *MENU*, перейти в режим *Autotuning*. Затем выбрать вид автонастройки (параметр T1-01), ввести указанные в паспортной табличке двигателя номинальную выходную мощность двигателя, номинальное напряжение, номинальный ток, номинальную частоту, номинальную скорость и количество полюсов, после чего нажать клавишу *RUN* (*Пуск*). Отображаемые на экране настройки можно изменить с помощью клавиш *Increment* (*Увеличить*), *Decrement* (*Уменьшить*) и *Shift/RESET* (*Смещение/Сброс*). Параметр будет сохранен после нажатия клавиши *DATA/ENTER* (*Данные/Ввод*).

Параметры, указываемые перед проведением автонастройки:

- 1) T1-01: выбор режима автонастройки;
- 2) T1-02: номинальная мощность двигателя;
- 3) T1-03: номинальное напряжение двигателя;
- 4) T1-04: номинальный ток двигателя;
- 5) T1-05: номинальная частота двигателя;
- 6) T1-06: число полюсов двигателя;
- 7) T1-07: номинальная скорость двигателя;
- 8) T1-08: число импульсов PG на оборот.

Если число полюсов не указано, это значение определяется по формуле

$$a = \frac{120 \cdot f}{n_0},$$

где  $a$  – число полюсов;

$f$  – частота питающей сети, Гц;

$n_0$  – номинальная скорость вращения магнитного поля, об/мин.

После проведения процедуры идентификации подключенного двигателя в параметры группы E2 будут записаны измеренные данные двигателя.

### 7.3. Идентификация системы управления

Разработка любой автоматической системы управления начинается с изучения объекта управления: принципа его действия, режимов работы, возможных способов управления, статических и динамических характеристик. Целью изучения объекта является определение его математической модели, являющейся формализованным описанием его работы.

Весь процесс определения математической модели можно разделить на следующие основные этапы.

1. Выделение объекта моделирования из окружающей среды.
2. Выбор вида модели (статическая или динамическая) и способа ее разработки (аналитический или экспериментальный).
3. Разработка модели (в общем виде).
4. Определение параметров модели.
5. Проверка адекватности модели реальному объекту.

Математическая модель объекта управления включает математическое описание зависимостей между основными переменными (выходные регулируемые переменные, управляющие воздействия и возмущения) и накладываемые на них ограничения.

При разработке математических моделей необходимо стремиться получить модели максимально простые, в типовой форме, и обеспечить требуемую точность описания. Требования простоты модели и ее точность являются противоречивыми. Поэтому при разработке моделей приходится принимать компромиссные решения между точностью и полнотой модели с одной стороны и ее сложностью и стоимостью разработки – с другой.

Аналитический метод основывается на анализе физических процессов, происходящих в объекте. Он применяется в тех случаях, когда хорошо известны физические процессы, происходящие в объекте, и законы, которые их описывают; когда эти процессы достаточно изучены и могут быть описаны количественно.

Экспериментальный подход применяется тогда, когда такой информации нет, когда невозможно получить модель аналитически. При этом основную информацию об исследуемом процессе или объекте получают путем непосредственных измерений на нем. Помимо этого экспериментальный подход применяют для проверки адекватности модели, полученной аналитически.

Для рассматриваемой системы управления несложно получить изображенную на рис. 7.2 упрощенную аналитическую модель.

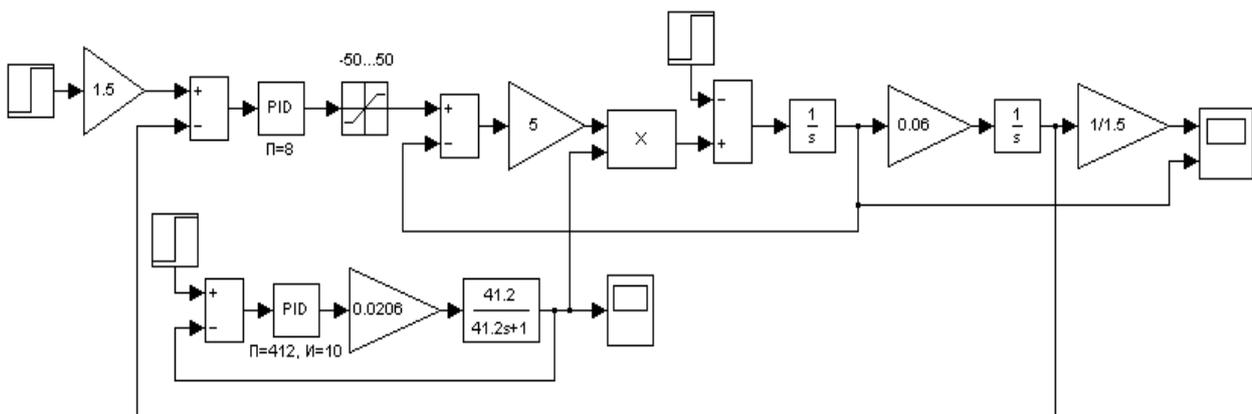


Рис. 7.2. Модель системы управления заслонкой

Входным сигналом системы управления является задание на угол поворота заслонки, выходными сигналами являются скорость вращения двигателя и текущий угол поворота заслонки. Система содержит два канала: канал стабилизации потокосцепления ротора и канал регулирования угла поворота заслонки с подчиненным контуром регулирования скорости асинхронного двигателя. Параметры модели нуждаются в экспериментальном уточнении (см. рис. 7.3).

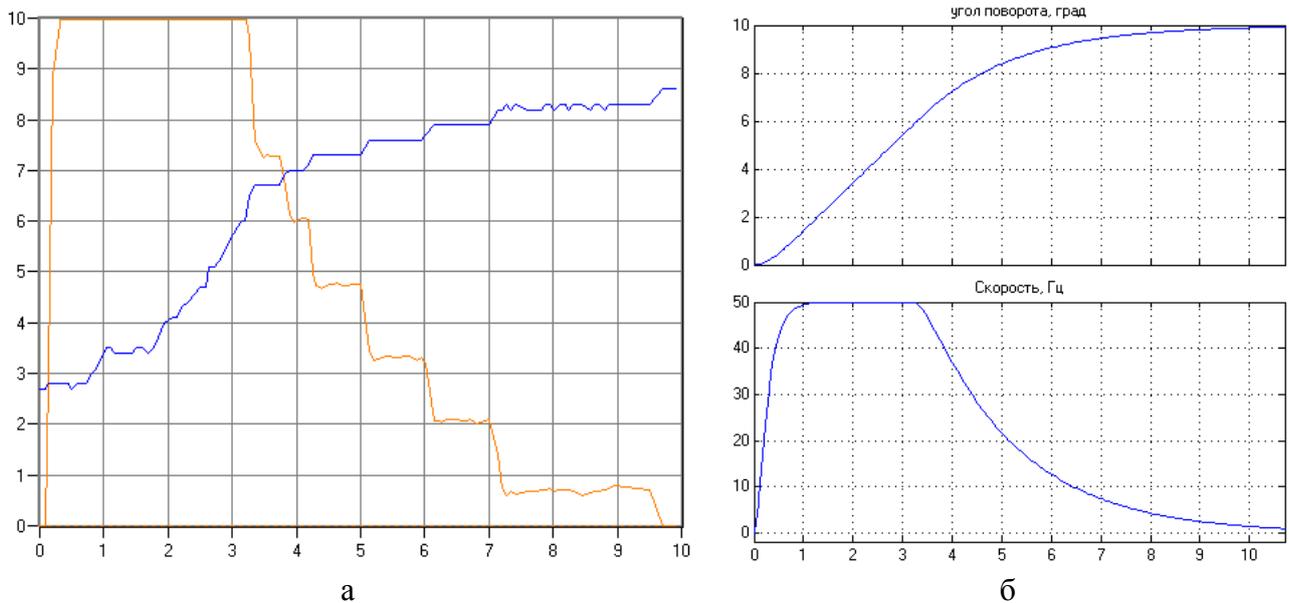


Рис. 7.3. Графики переходных процессов реальной системы (а) и ее модели (б)

## 8. Лабораторная работа «Асинхронный двигатель»

Цель работы:

1. Ознакомление с устройством и принципами работы асинхронного двигателя.
2. Изучение процесса автонастройки электропривода переменного тока.

### 8.1. Варианты заданий

Тип автонастройки  $T1-01$ , закон движения исполнительного механизма  $Z$ , количество остановок для старт-стопного закона движения  $P$ , углы поворота заслонки «в малом»  $\varphi_m$  и «в большом»  $\varphi_b$  определяются табл. 8.1. Закон движения  $Z = 1$  соответствует движению исполнительного механизма с медленной скоростью в одну сторону и быстрой в обратную. Закон движения  $Z = 2$  соответствует движению исполнительного механизма с одинаковой скоростью в обе стороны и остановкой в момент изменения направления движения.

Варианты заданий

Таблица 8.1

Вариант	$Tl$	$Z$	$P$	$\varphi_m$	$\varphi_b$	Вариант	$Tl$	$Z$	$P$	$\varphi_m$	$\varphi_b$	Вариант	$Tl$	$Z$	$P$	$\varphi_m$	$\varphi_b$
1	0	1	1	0,5	10	11	1	2	3	0,9	16	21	2	1	5	0,8	37
2	1	1	2	1,0	40	12	2	2	4	1,4	50	22	0	1	6	1,3	45
3	2	2	3	1,5	25	13	0	1	5	1,9	29	23	1	2	7	1,8	14
4	0	2	4	2,0	7	14	1	1	6	2,4	15	24	2	2	8	2,3	43
5	1	1	5	2,5	28	15	2	2	7	2,9	30	25	0	1	2	2,8	19
6	2	1	6	0,7	20	16	0	2	8	0,6	42	26	1	1	3	0,5	37
7	0	2	7	1,2	35	17	1	1	1	1,1	23	27	2	2	4	1,0	24
8	1	2	8	1,7	17	18	2	1	2	1,6	27	28	0	2	5	1,5	47
9	2	1	1	2,2	9	19	0	2	3	2,1	33	29	1	1	6	2,0	26
10	0	1	2	2,7	49	20	1	2	4	2,6	44	30	2	2	7	2,5	13

## 8.2. Описание лабораторного макета

Состав учебного макета:

- трехфазный и однофазный автоматические выключатели;
- частотный преобразователь F7, 1,5 кВт;
- цифровая панель управления частотного преобразователя;
- асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, 270 Вт;
- редуктор с возможностью отключения двигателя и управления заслонкой вручную;
- датчик положения: потенциометр и размыкатели;
- блок питания;
- программируемый логический контроллер (ПЛК) CJ1M
- модули ПЛК: модуль питания, модуль дискретных входов, модуль дискретных выходов и модуль аналоговых выходов;
- сенсорная панель.

## 8.3. Подготовка к лабораторной работе

1. Изучить разделы 6 и 7 данного практикума. Ознакомиться с основными свойствами асинхронного двигателя.
2. Ознакомиться с принципами параметрирования преобразователя частоты (инвертора) с помощью панели управления и программного обеспечения CX-Drive [1, с. 3.1–3.12].
3. Ознакомиться с моделью системы управления электроприводом (рис. 7.2). Определить необходимые параметры идентификации.
4. Ознакомиться со средой моделирования Matlab/Simulink [2, с. 11–31].
5. Создать в Simulink модель системы управления (рис. 7.2). Все блоки кроме  $PID$  находятся в библиотеке Simulink, а блок  $PID$  (не путать с блоком  $PID$  Controller with Approximate Derivative) – в библиотеке Simulink Extras. Для

того чтобы в последнем блоке *Scope* добавить второй вход, необходимо дважды щелкнуть по нему, нажать кнопку  и назначить две оси (*Number of axis*).

При помощи данной модели получить графики переходных процессов (рис. 7.3, б). В блоках *Step* (ступенчатое воздействие) все параметры кроме *Final value* должны быть равны нулю. Параметр *Final value* служит для настройки амплитуды воздействия: в первом блоке – угол поворота (в соответствии с вариантом), во втором – нормированное значение потокосцепления ротора  $\psi_H = 1$ , в третьем – возмущающее воздействие (вначале при настройке системы принять  $f = 0$ ). Если стандартной длительности процесса моделирования 10 с недостаточно, ее следует увеличить (параметр *Simulation stop time*).

#### 8.4. Порядок выполнения работы

В данном подразделе описан порядок выполнения лабораторной работы. Методика выполнения работы с подробным описанием всех действий приведена в следующем подразделе.

1. По стендам, находящимся в лаборатории, ознакомиться с устройством асинхронного двигателя. Записать основные технические данные оборудования. Составить список функционально необходимых элементов системы управления заслонкой.

2. Подключиться к инвертору и считать параметры электропривода.

3. Провести автонастройку системы. Снять данные для построения графиков изменения тока и скорости асинхронного двигателя.

4. Зафиксировать различия полученных в процессе автонастройки данных с имеющимися в конфигурационном проекте.

5. Снять графики переходных процессов, аналогичные представленным на рис. 7.3.

6. Определить граничный угол поворота.

7. Провести серию экспериментов для уточнения численных значений параметров модели.

#### На основании результатов опытов:

1. Составить функциональную схему системы управления заслонкой. На схеме изображают функциональные части системы (элементы, устройства и функциональные группы) и связи между ними. Графическое построение схемы должно наглядно отражать последовательность функциональных процессов, иллюстрируемых схемой. Действительное расположение в изделии элементов и устройств может не учитываться. Функциональные части и связи между ними изображают в виде условных графических обозначений, установленных в стандартах ЕСКД. Отдельные функциональные части на схеме допускается изображать в виде прямоугольников.

2. Сравнить и проанализировать различия в параметрах группы Е2 на всех этапах выполнения работы.

3. Составить графики изменения тока и скорости асинхронного двигателя при автонастройке в зависимости от времени: две линии на одном графике:  $\{I, f\} = f(t)$ .

### 8.5. Методика выполнения работы

1. Записать основные технические данные всех элементов (подразд. 8.2) лабораторного макета (см. паспортные таблички, надписи и имеющуюся в лаборатории документацию). Составить список функционально необходимых элементов системы управления заслонкой с указанием их моделей. Переписать все параметры, указанные в подразд. 6.8, с паспортной таблички двигателя.

2. Снять (отключить) цифровую панель с частотного преобразователя и соединить специальным кабелем компьютер, подключившись к его СОМ-порту, и преобразователь частоты F7. **При подключении/отключении кабеля преобразователь частоты должен быть выключенным!** Следует учитывать, что полное отключение частотного преобразователя происходит только через некоторое время после отключения питания.

3. Включить макет. На компьютере запустить CX-Drive. В меню *Привод* выбрать пункт *Автоопределение* для запуска процедуры автоматического определения подключенного к компьютеру оборудования. Если частотный преобразователь не определяется, проверить в окне настроек, что флажки *Инвертор* (тип привода), *Прямое* (тип соединения) и *CIMR-F7* (серия и тип) установлены. При необходимости можно самостоятельно создать новый проект и ввести вручную тип инвертора и параметры его подключения к компьютеру.

4. Считать все параметры инвертора. Для этого сначала перейти в режим связи с преобразователем частоты. Если соединение с компьютером проводилось при помощи операции *Автоопределение*, то инвертор автоматически перейдет в режим связи. Иначе необходимо выбрать пункт *Установить связь* в меню *Привод* или нажать кнопку  на инструментальной панели. Затем следует выбрать команду *Привод–Передать–Прочитать из привода*.

5. В окне проекта (*Вид–Окно проекта*) войти в *Редактор параметров* и выбрать группу параметров E2. Значения всех параметров группы E2 до автонастройки сохранить в файле или переписать (для последующего оформления отчета).

6. Выключить макет. Дождавшись полного отключения преобразователя частоты, отсоединить от инвертора кабель связи с компьютером. Затем подключить цифровую панель управления и включить макет.

7. По описанной в подразд. 7.2 процедуре необходимо в соответствии с вариантом (*T1-01*) провести автонастройку системы при помощи цифровой панели управления. Сначала следует отсоединить нагрузку, для этого необходимо вывести руль из зацепления, слегка потянув его на себя. Руль должен свободно вращаться (поворачивать его не следует, поскольку заслонка в данном механизме может перемещаться только в диапазоне 0–50°). Перейти в режим автонастройки, ввести все параметры. Если на экране отображается надпись

*Data Invalid*, значит, данные введены неправильно и их следует исправить. После ввода всех данных **перед запуском процедуры автонастройки** позвать преподавателя (или инженера (лаборанта) лаборатории) и проверить правильность введенных данных.

**Во время автонастройки на двигатель подается питание, не прикасайтесь к двигателю до завершения автонастройки.** Если во время автонастройки руль начинает вращаться (заслонка не отсоединена от двигателя), процедуру следует **немедленно** прервать, нажав кнопку *Stop* на цифровой панели или отключив макет с помощью трехфазного автоматического выключателя, и вывести руль из зацепления, после чего повторить процедуру с начала. Во время выполнения автонастройки необходимо записывать значения тока и частоты вращения, отображаемые на цифровой панели, с фиксированным интервалом времени не более 3 с. При необходимости процедуру можно повторить.

8. Выключить макет и, дождавшись полного отключения преобразователя частоты, отключить цифровую панель и подключиться к компьютеру. Включить макет.

9. Закрыть созданный проект CX-Drive. В соответствии с вариантом запустить имеющийся на компьютере конфигурационный проект для частотного преобразователя F7 (файл F7\_XX.sdd, где XX – номер варианта). Перейти в режим связи (кнопка  *Установить связь* на панели инструментов) и провести сравнение параметров проекта с реальными значениями (*Привод–Передать–Сравнить с приводом*). Скопировать (переписать) значения всех различающихся параметров (кроме параметров группы *U\_*). Переписать значения всех параметров группы E2 после автонастройки, для этого надо отключить пункт *Вид–Показать только отличия*.

10. Включить макет с контроллером. Подключить нагрузку (обеспечить механическую связь заслонки с двигателем). Проверить в CX-Drive, что инвертор находится в режиме связи. В окне проекта выбрать пункт *Мониторинг–Тренд реального времени*. Увеличить рабочую область, закрыв окно вывода (*Вид–Окно вывода*). На вкладке *Настройка параметров* выбрать (установить флажки) *Входное напряжение на клемме A1* и *Входное напряжение на клемме A2*, изменить их цвета на более контрастные, снять галочку *Авто* и задать следующие значения *Цены деления шкалы Y*: 3,54 и 6,21 и величины смещения: –4,956 и 6,21 соответственно (смещение задается при помощи соответствующего ползунка, а отображается в колонке *Смещение*). Увеличить размер окна отображения графика (разделитель между окнами) и задать *Цену деления шкалы X*: 12 с и нажать кнопку  *Play*. Выбрать заданный по варианту закон управления ( $Z = 1$  или  $Z = 2$ ) – задается на макете с помощью сенсорной панели (вкладка *Выбрать закон*). Дождаться, когда будет выполнен один цикл движения, и снять графики переходных процессов (клавиша *PrtScr* на клавиатуре).

Выйти из режима построения графика, нажав в CX-Drive кнопку  *Stop*. Если необходимо остановить инвертор, нужно перейти в сенсорной панели на вкладку *Задать положение*. По достижении заданного *Угла поворота* частотный преобразователь остановится.

11. Ввести с помощью сенсорной панели заданное в соответствии с вариантом количество остановок  $P$  для третьего закона и выбрать старт-стопный (ступенчатый) закон движения. Снять графики переходных процессов. Установить флажок *Останавливать движение* в сенсорной панели.

12. Провести мониторинг работы системы управления при отработке заданного угла поворота: снять графики «в малом» (малый угол поворота заслонки), когда скорость двигателя не достигает максимального значения, и «в большом» (большой угол поворота заслонки), когда происходит насыщение по скорости. Для этого в CX-Drive отметить параметры *Входное напряжение на клемме A1* и *Скорость двигателя*, с остальных галочки снять. Для каждого графика подобрать такие величины масштаба (*Цены деления шкалы Y*) и смещения, чтобы они занимали большую часть окна (см. рис. 7.3, а). Размер окна отображения графиков регулируется с помощью разделителей слева и снизу.

*Цену деления шкалы X* по возможности установить минимальной (1 в идеале); ее следует увеличивать, только если график полностью не помещается в окне (изменять масштаб можно непосредственно в момент построения графиков). В процессе проведения экспериментов необходимо фиксировать (записать) *Цену деления шкалы X*. В сенсорной панели перейти на вкладку *Задать положение* и ввести *Угол поворота  $0^\circ$* , после перемещения заслонки в исходное положение задать требуемый по варианту угол «в малом». В CX-Drive перейти в режим построения графика (кнопка ) и выделить параметр *Скорость двигателя* (для отображения в окне требуемой шкалы), а в сенсорной панели нажать *Enter* (завершить ввод требуемого угла).

Повторить опыт (все действия данного пункта) для получения графиков переходных процессов «в большом».

13. Определить граничный угол поворота (между «в малом» и «в большом», когда скорость достигает максимального значения 50 Гц и сразу уменьшается). Для этого необходимо провести серию экспериментов, задавая различные углы поворота. Определять, достигает ли скорость максимального значения, с помощью графика скорости в CX-Drive. Задавать угол поворота заслонки не обязательно из ее исходного положения (например, чтобы повернуть заслонку на  $4^\circ$ , если она находится в положении  $20^\circ$ , необходимо задать либо  $16^\circ$ , либо  $24^\circ$ ). Снять графики переходных процессов.

14. По окончании экспериментов задавать угол поворота заслонки  $25^\circ$ . По полученным экспериментальным графикам «в малом», «в большом» и на границе проверить адекватность созданной в Simulink модели системы управления. Скорректировать параметры модели и при необходимости провести серию экспериментов для уточнения их численных значений. Снять графики теоретических переходных процессов (по модели), задав граничный угол поворота.

15. Закрыть текущий проект(ы) в CX-Drive, запустить файл F7.sdd. Перейти в режим связи (кнопка *Установить связь*) и выбрать команду *Привод–Передать–Загрузить в привод*. Выключить лабораторные макеты. Дождавшись полного отключения преобразователя частоты, отсоединить от инвертора кабель связи с компьютером и подключить цифровую панель управления.

## 8.6. Содержание отчета

1. Функциональная схема системы управления заслонкой с указанием моделей элементов и устройств. Таблицы основных технических параметров элементов системы (подразд. 8.2), см. документацию.
2. Графики изменения тока и скорости асинхронного двигателя при автонастройке. Параметры группы E2 до автонастройки.
3. Список параметров группы E2 после автонастройки и их значения в конфигурационном файле проекта. Сравнение, различия.
4. Значения всех различающихся параметров, полученных в пункте 9 Методики выполнения работы. Описание этих параметров, их назначение и объяснение их значений.
5. Структурная схема модели системы управления заслонкой с указанием параметров элементов (блоков).
6. Графики переходных процессов реальной системы и полученные путем моделирования «в малом», «в большом» и на границе. Сравнение, различия.
7. Характеристики, параметры и графики зависимостей, полученные в процессе проведения экспериментов. Графики законов движения.
8. Выводы.

## 8.7. Контрольные вопросы

1. Сфера применения асинхронных двигателей (АД). Принцип действия. Схема замещения. Способы соединения обмоток статора, различия.
2. Основные параметры АД. Частоты вращения статора и ротора.
3. Конструкция асинхронного двигателя. Способы управления.
4. Асинхронные двигатели с переключением числа полюсов. Момент при переключении, механическая характеристика.
5. Скольжение АД. Критическое скольжение. Зависимость скольжения от номинальной мощности. Снижение мощности. Допуски.
6. Пуск АД с фазным и короткозамкнутым ротором. Как можно повысить пусковой момент трехфазных АД?
7. Механическая характеристика АД. Статическая устойчивость.
8. Включение дополнительных сопротивлений в роторные обмотки. Естественные и искусственные характеристики АД. Рабочие характеристики АД.
9. Режимы работы асинхронного двигателя. Опрокидывающий момент.
10. КПД, коэффициент мощности АД. Номинальные режимы работы.
11. Сравнение двигателей с фиксированной и изменяемой частотой вращения. Приведите примеры применения. Переключение  $\Delta/\Delta$ .
12. Для чего необходима функция автоматической настройки параметров системы управления? Поясните методику определения параметров (алгоритм проведения процедуры автонастройки).
13. Назовите основные виды автонастройки. Когда они применяются?
14. Какие параметры определяются при проведении автонастройки? Как?

15. Чем отличается процедура автонастройки инвертора от автоподстройки в сервосистеме? Что такое функциональная схема?
16. Способы плавного регулирования скорости трехфазного АД.
17. Способы ступенчатого управления скоростью трехфазного АД.
18. Как определить число пар полюсов в двигателе?
19. Моделирование системы управления в Simulink.
20. Основные этапы определения математической модели системы.
21. Назовите преимущества и недостатки аналитических и экспериментальных методов определения математической модели.
22. Что такое переходные процессы «в малом» и «в большом»? Поясните их различия и назначение.
23. Почему графики переходных процессов реальной системы и ее модели различаются?
24. Поясните структуру модели системы управления заслонкой и процедуру получения численных значений ее элементов (блоков).
25. Каково передаточное число редуктора в системе?
26. Как инвертор взаимодействует с системой управления верхнего уровня? Задание скорости вращения, подача команд пуск/останов и т.д.
27. Поясните принцип настройки ПИ-регулятора потокосцепления ротора. Как осуществляется расчет других регуляторов системы?
28. Почему скорость вращения трехфазных асинхронных двигателей зависит от момента на валу? Чем обусловлен большой пусковой ток и небольшой пусковой момент трехфазных асинхронных двигателей?
29. Поясните, почему трехфазная асинхронная машина является трансформатором обобщенного типа.
30. Различие линейного, фазного и намагничивающего токов. Как меняется мощность АД при пересоединении обмоток статора из звезды в треугольник?

## 8.8. Литература к лабораторной работе

1. Varispeed F7. Преобразователь частоты для векторного управления. Руководство по эксплуатации.
2. Черных, И. В. Simulink: Среда создания инженерных приложений. Под общ. ред. В. Г. Потемкина, И. В. Черных. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2003.
3. Фираго, Б. И. Теория электропривода: учеб. пособие / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. – Минск.: Техноперспектива. – 2004.
4. Фираго, Б. И. Регулируемые электроприводы переменного тока. / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. – Минск: Техноперспектива, 2006.
5. Кацман, М. М. Электрические машины автоматических устройств: Учеб. пособие / М. М. Кацман. – М.: ФОРУМ, ИНФРА-М, 2002.
6. Кацман, М. М. Электрические машины. М.: Высш. шк., 2001.
7. Heinemann, G. Selbsteinstellende, feldorientierte Regelung für einen asynchronen Drehstromantrieb: Dissertation. – Braunschweig Technische Universität Carolo-Wilhelmina, 1992.

8. Передерий, А. В. Анализ процессов самонастройки регуляторов тока в системе управления асинхронного электропривода. [Электронный ресурс]. – 2010. – Режим доступа : [http://www.library.ospu.odessa.ua/online/periodic/ee\\_67/1.pdf](http://www.library.ospu.odessa.ua/online/periodic/ee_67/1.pdf).

9. Дьяконов, В. П. Matlab 6.5 SP1/7 + Simulink 5/6. Основы применения. / В. П. Дьяконов. – М.: СОЛОН-Пресс, 2005.

## **9. Система управления подъемным устройством**

Важным этапом при проектировании любой системы управления является выбор функционально необходимых элементов, расчет их параметров и согласование друг с другом. В данном пособии в качестве примера рассматривается система управления подъемным устройством.

Впервые о подъемном устройстве (лифте) писал римский архитектор Витрувий, ссылавшийся, в свою очередь, на Архимеда, который построил подъемный аппарат, вероятно, еще в 236 г. до н. э. [10]. Более поздние упоминания о лифтах датируются серединой VI в. (Египет), XVII в. (Англия) и первой четвертью XVIII в. (Франция). Первый электрический лифт был запатентован в 1861 г. Э. Г. Отисом, а к началу XX в. электрические лифты получили широкое распространение, постепенно вытесняя лифты с другими типами приводов.

Разработка безопасных лифтов в сочетании с использованием стальных каркасов зданий позволила строить небоскребы, появление которых дало толчок гонке высотных сооружений во всем мире. Первым рекордным по высоте зданием из построенных в XXI в. является Тайбэй 101 (Тайвань). На конец 2011 г. самым высоким строением в мире (одновременно и самым высоким когда-либо существовавшим сооружением в мире) является Бурдж-Халифа (Дубай, ОАЭ) высотой 828 м, 162 этажа. Одновременно с гонкой за высоту продолжается гонка за скорость лифтов в небоскребах. Лифты Тайбэй 101 поднимают посетителей со скоростью 16,83 м/с (60,6 км/ч). Каждый лифт герметичен, имеет аэродинамическую (обтекаемую) форму, системы управления давлением, систему кондиционирования, интеллектуальную систему аварийного торможения и систему защиты от выбега. Цена одного лифта – 2,4 млн долларов США. Скорость лифтов Бурдж-Халифа – 18 м/с.

При построении высотных лифтов возникает ряд трудностей. Трос таких лифтов имеет значительную массу, превышающую массу кабины с пассажирами, а также обладает собственной резонансной частотой, постоянно меняющейся по мере разматывания/смотывания. При этом на нее еще накладываются собственные сверхнизкие резонансные частоты самого небоскреба.

Система управления группой лифтов должна оптимальным образом распределять лифты по поступающим вызовам, иметь не только гибкий набор правил, но и накапливающийся опыт, на основе которого необходимо прогнозировать предполагаемые вызовы. Чаще такие системы разрабатывают на базе нечеткой логики, основной вопрос при проектировании – критерий оптимальности. В большинстве случаев используют комплексные критерии. В последнее

время все чаще применяют алгоритмы управления, минимизирующие недовольство пассажиров. Для этого на каждом этаже устанавливают не одну или две кнопки вызова, а панель, на которой каждый пассажир выбирает требуемый этаж. Учитывается психология пассажиров: например, при поступлении вызовов от двух пассажиров, одному из которых необходимо подняться на 4 этажа, а второму – на 100, система в первую очередь направит лифт к тому пассажиру, которого надо переместить на меньшее количество этажей, поскольку он может не дожидаться лифта и пойти по лестнице, при этом оставшись недовольным, что потерял время. Особое внимание уделяется также информационным табло, отображающим, где находятся лифты и сколько осталось ждать.

### **9.1. Описание системы**

Одним из основных вопросов при проектировании системы управления грузоподъемным устройством является выбор типа электропривода, от качества управления которым во многом зависит качество всей системы в целом.

Путем интеграции привода в контур регулирования можно получить приводную систему с электронным управлением. Преимущества таких приводных систем – это большой пусковой момент, особые характеристики разгона и замедления, защита от перегрузок посредством ограничения вращающего момента и тока, многоквadrантный режим работы и т. д.

Пусковая характеристика двигателя описывается через его механическую характеристику. При разгоне асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором изменяется сопротивление обмотки ротора, а следовательно, в зависимости от частоты вращения (от величины скольжения) изменяется и вращающий момент.

Стандартные асинхронные двигатели переменного тока и серводвигатели (с редуктором или без него) имеют простую и прочную конструкцию и высокую степень защиты. Благодаря этому даже при длительной эксплуатации в самых сложных условиях они обеспечивают безопасность и надежность приводной системы. Однако в любом случае решающим фактором являются точное знание и соблюдение условий эксплуатации.

Стандартные двигатели переменного тока и серводвигатели могут годами работать исправно, не нуждаясь в техническом обслуживании. Обслуживание редукторов ограничивается регулярным контролем уровня и свойств масла и его периодической заменой. При этом следует правильно выбирать марку и учитывать необходимое количество масла.

Основной сложностью при построении такой системы является обеспечение работы системы с требуемыми показателями качества при перемещении груза различной массы в обоих направлениях. Нагрузка содействует работе двигателя при движении вниз и противодействует – при движении вверх.

Существуют различные способы построения приводов подъема. Наиболее простым является привод подъема без дополнительного груза, противовеса. Вторым вариантом построения является применение противовеса. Противовес

предназначен для того, чтобы уравновесить поднимаемый груз. Если масса груза и масса противовеса совпадают, то полностью компенсируется вес груза, а следовательно, электродвигатель не должен преодолевать силу тяжести поднимаемого груза. Недостатком варианта построения привода подъема с противовесом является увеличение общей массы перемещаемого груза, приводящее к увеличению инерционности системы. При 100 %-ном равновесии влияние силы тяжести отсутствует, но мощность на ускорение удваивается, поскольку удваивается ускоряемая масса.

Ниже приводятся результаты расчетов системы с противовесом и без него. Масса противовеса выбирается равной сумме массы подвижной части подъемника (массы кабины) и половины грузоподъемности подъемного устройства (половины максимальной грузоподъемности).

Основной трудностью при разработке подобных систем является необходимость учета того, что подъемное устройство с противовесом может работать в четырех квадрантах механической характеристики (прямое/обратное направление, двигательный/генераторный режим работы). Для всех режимов необходимо проводить соответствующие системные расчеты, при этом следует учитывать направление движения, направление силы тяжести и направление действия КПД.

При движении вверх без груза, а также при движении вниз при полной загрузке двигатель работает в генераторном режиме и, по сути, подтормаживает груз, рассеивая выделяемую энергию на блоке тормозных сопротивлений. При движении пустой кабины вниз противовес тяжелее кабины, а поэтому двигатель должен преодолевать силу тяжести. При этом отличие от случая движения нагруженной кабины вверх заключается в меньшем моменте инерции нагрузки.

При работе в генераторном режиме двигатель вырабатывает значительную мощность, сопоставимую с потребляемой из сети в двигательном режиме. Для рассеяния данной мощности в современных автоматических регуляторах частоты предусмотрена возможность подключения блока тормозных сопротивлений.

Для достижения высокой точности остановки движение кабины перед местом остановки осуществляется с малой скоростью (скоростью установки уровня, скоростью позиционирования, ползучей скоростью). При этом кабина при торможении после того, как сработает датчик остановки, проходит меньшее расстояние, что увеличивает точность остановки. Поэтому чем меньше скорость позиционирования, тем больше точность остановки, но для прохождения того же пути требуется больше времени. Исходя из приведенных соображений, скорость позиционирования в системе выбирается на порядок меньше основной скорости перемещения. Для получения информации о текущем местоположении подвижной части подъемника, что необходимо для обеспечения своевременного перехода на скорость установки уровня, в системе используются датчики перехода на скорость позиционирования.

Перемещение кабины осуществляется следующим образом. Сначала кабина плавно разгоняется до основной скорости перемещения, затем движется с

постоянной скоростью, пока не сработает датчик перехода на скорость установки уровня того этажа, на котором следует остановиться. После срабатывания датчика кабина плавно замедляется и переходит на скорость позиционирования. С этой скоростью кабина движется, пока не сработает датчик остановки. Когда срабатывает датчик остановки, кабина начинает плавно останавливаться. Датчик остановки устанавливается на некотором (рассчитанном) расстоянии от места остановки. Датчик перехода на скорость установки уровня устанавливается на таком расстоянии, чтобы движение со скоростью позиционирования было недолгим (учитываются основная скорость, замедление и скорость позиционирования). Для обеспечения требований безопасности время движения со скоростью позиционирования делать слишком малым не допускается. Аварийные датчики обычно устанавливаются только на крайних этажах. Количество датчиков остановки и перехода на скорость установки уровня определяется количеством этажей и возможным направлением движения к ним (на крайние этажи приехать можно только с одного направления).

## 9.2. Основные виды движения

В работе всех приводных систем можно выделить два вида движения: поступательное и вращательное. Основные различия линейного и вращательного движения представлены в табл. 9.1.

Основные формулы для поступательного движения:

	$v = \text{const}$	$a = \text{const}$
Расстояние	$s = v \cdot t$	$s = \frac{v \cdot t}{2} = \frac{a \cdot t^2}{2} = \frac{v^2}{2 \cdot a}$
Скорость	$v = \frac{s}{t}$	$v = \sqrt{2 \cdot a \cdot s} = \frac{2 \cdot s}{t} = a \cdot t$
Ускорение	$a = 0$	$a = \frac{v}{t} = \frac{2 \cdot s}{t^2} = \frac{v^2}{2 \cdot s}$
Время	$t = \frac{s}{v}$	$t = \sqrt{\frac{2 \cdot s}{a}} = \frac{v}{a} = \frac{2 \cdot s}{v}$

Основные формулы для вращательного движения:

	$\omega = \text{const}$	$\alpha = \text{const}$
Расстояние	$\varphi = \omega \cdot t$	
Скорость	$\omega = \frac{\varphi}{t}$	$\omega = \sqrt{2 \cdot \alpha \cdot \varphi} = \frac{2 \cdot \varphi}{t} = \alpha \cdot t$
Ускорение	$\alpha = 0$	$\alpha = \frac{\omega}{t} = \frac{2 \cdot \varphi}{t^2} = \frac{\omega^2}{2 \cdot \varphi}$
Время	$t = \frac{\varphi}{\omega}$	$t = \sqrt{\frac{2 \cdot \varphi}{\alpha}} = \frac{\omega}{\alpha} = \frac{2 \cdot \varphi}{\omega}$

Соответствие параметров поступательного  
и вращательного движения

Таблица 9.1

Основные параметры поступательного движения	Аналогичные параметры вращательного движения	
Расстояние $s$ , м	Угловое расстояние, угол поворота	$\varphi$ , рад или $^\circ$ $360^\circ = 2\pi$ рад  <i>Об угловом расстоянии говорят, когда значение не обнуляется при полном обороте и может быть больше <math>360^\circ</math></i>
Скорость $v$ , м/с	Угловая скорость Частота вращения	$\omega$ , рад/с или 1/с $n$ , об/мин или Гц $1 \text{ Гц} = 1 \text{ с}^{-1}$  $\omega$ , рад/с = $2\pi \cdot n$ , Гц $n$ , об/мин = $60 \cdot n$ , Гц
Ускорение $a$ , м/с <sup>2</sup>	Угловое ускорение	$\alpha$ , рад/с <sup>2</sup> или 1/с <sup>2</sup>
Сила $F$ , Н	Вращающий момент	$M$ , Н·м
Масса $m$ , кг	Момент инерции	$J$ , кг·м <sup>2</sup>
–	Радиус Диаметр	$r$ , м $D$ , м

Ускоряющая сила в соответствии со 2-м законом Ньютона:

Поступательное движение  $F = m \cdot a$

Вращательное движение  $M = J \cdot a$

Вращающий момент:

Поступательное движение  $M = F \cdot r = \frac{F \cdot D}{2}$        $M [\text{Нм}] = \frac{F [\text{Н}] \cdot D [\text{мм}]}{2000}$

Вращательное движение  $M = J \cdot a$        $M [\text{Нм}] = J [\text{кгм}^2] \cdot \frac{n [\text{об/мин}]}{9,55 \cdot t_a [\text{с}]}$

Мощность:

Поступательное движение  $P = F \cdot v$        $P [\text{кВт}] = \frac{F [\text{Н}] \cdot v [\text{м/с}]}{1000}$

Вращательное движение  $P = M \cdot \omega$        $P [\text{кВт}] = \frac{M [\text{Нм}] \cdot n [\text{об/мин}]}{9550}$

Если для подключения нагрузки к двигателю используется редуктор, в расчетах нагрузку удобно приводить к валу двигателя. Если передаточное число редуктора  $i_{\text{ред}} = \omega_{\text{дв}} / \omega_{\text{н}}$ , а параметры нагрузки имеют индекс «н», то без учета КПД редуктора из условия сохранения мощности можно записать

$$M_{\text{н}} \cdot \omega_{\text{н}} = M_{\text{с}} \cdot \omega_{\text{дв}} \text{ или } M_{\text{с}} = M_{\text{н}} \cdot \frac{\omega_{\text{н}}}{\omega_{\text{дв}}} = \frac{M_{\text{н}}}{i_{\text{ред}}},$$

где  $M_{\text{с}}$  – момент сопротивления нагрузки, приведенный к валу двигателя.

Из условия сохранения кинетической энергии

$$J_{\text{н}} \cdot \frac{\omega_{\text{н}}^2}{2} = J_{\text{с}} \cdot \frac{\omega_{\text{дв}}^2}{2} \text{ или } J_{\text{с}} = \frac{J_{\text{н}}}{i_{\text{ред}}^2},$$

где  $J_{\text{с}}$  – момент инерции нагрузки, приведенный к валу двигателя.

Полная мощность любой приводной системы складывается из статической и динамической мощности. Статическая мощность – это мощность, необходимая для перемещения с постоянной скоростью. Она зависит, прежде всего, от сил трения и тяжести. Динамическая же мощность – это мощность, расходуемая на ускорение и замедление. Обе эти составляющие в различных приводных системах проявляются по-разному. Это взаимодействие можно пояснить на примере вертикального и горизонтального движения (рис. 9.1).

Если исходить из того, что масса, скорость и ускорение в обоих примерах одинаковы, то можно получить следующие взаимосвязи: сила тяжести влияет на процесс управления только при вертикальном движении, ускоряющая сила одинакова как для вертикального, так и для горизонтального движения.

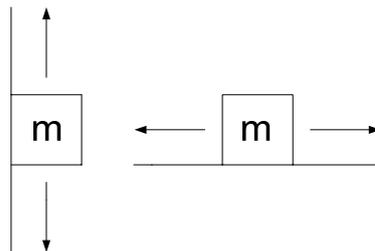


Рис. 9.1. Вертикальное и горизонтальное движение

Следовательно, подъемное устройство потребляет в целом больше мощности, чем транспортное. Кроме того, в приводе подъемного устройства 90 % мощности двигателя расходуется на преодоление силы тяжести (статическая мощность). В отличие от этого в приводе транспортного устройства 90 % мощности двигателя расходуется на создание ускоряющей силы (динамическая мощность).

Еще один вариант применения – подъемное устройство с противовесом. При 100 %-ном равновесии влияние силы тяжести отсутствует, но мощность на ускорение удваивается, поскольку удваивается ускоряемая масса. Тем не менее, полная мощность обычно меньше, чем в случае подъемного устройства без противовеса.

### 9.3. Принцип работы подъемного ус тройства

Внешний вид подъемного устройства *без противовеса* представлен на рис. 9.2.

Нагрузка содействует работе двигателя при движении вниз и противодействует – при движении вверх. При расчете параметров торможения необходимо учитывать изменение частоты вращения, возникающее из-за запаздывания. Это запаздывание обусловлено наличием паузы между отключением двигателя и наложением тормоза. Чтобы в эти моменты времени кабина или противовес не проседали, используется торможение с подпиткой постоянным током.

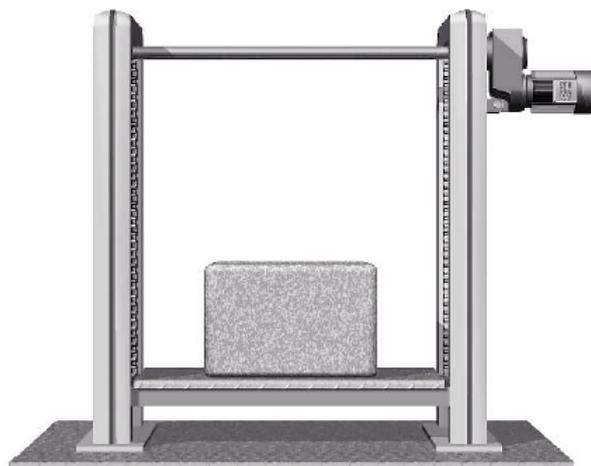


Рис. 9.2. Подъемное устройство

При выборе двигателя необходимо учитывать его тепловой режим. Чтобы обеспечить стабильный тепловой режим и оптимальное намагничивание, рекомендуется для привода подъемных устройств выбирать двигатель на один типоразмер больше. Это особенно необходимо в случае, если статическая мощность близка к номинальной мощности двигателя.

Для определения необходимой номинальной мощности тормозного резистора следует подробнее рассмотреть рабочий цикл привода без противовеса (рис. 9.3).

Заштрихованные площади на рис. 9.3 соответствуют торможению в генераторном режиме. Продолжительность включения тормозного резистора рассчитывается по базовой продолжительности рабочего цикла. При расчете следует учитывать, что данная мощность зависит от текущих скорости и ускорения привода, а поэтому ее изменение зависит от конкретного участка профиля скорости. Так участки 1 и 5 на рис. 9.3 характеризуют период разгона нагрузки до основной скорости движения. Участки 2 и 6 – период, в котором перемещение осуществляется с постоянной скоростью. Участки 3 и 7 – мощность, необходимая для перехода с основной скорости движения на скорость установки уровня. Участки 4 и 8 – период, в котором происходит движение со скоростью установ-

ки уровня и последующее (при получении сигнала с соответствующего датчика перехода) торможения вплоть до полной остановки.

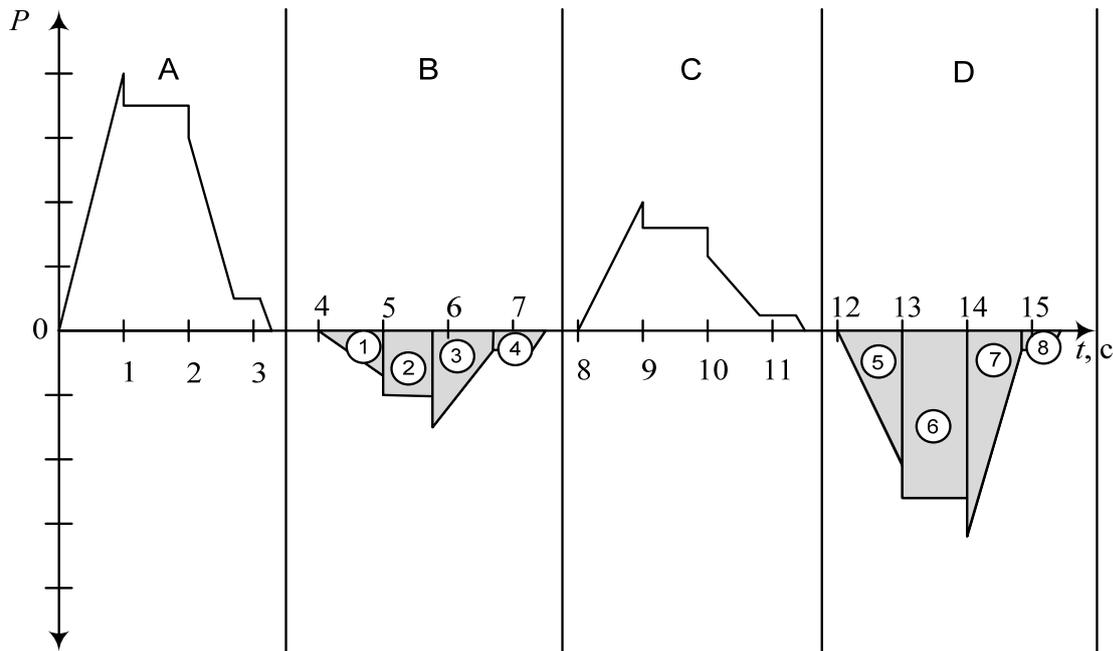


Рис. 9.3. Рабочий цикл системы без противовеса:  
 А – с грузом вверх; В – без груза вниз; С – без груза вверх; D – с грузом вниз

#### 9.4. Микропроцессорные системы управления лифтами

Быстрый рост городов, увеличение ценности земельных ресурсов являются причиной устойчивой тенденции роста этажности городской застройки. По мере увеличения этажности зданий возрастает значение лифтов в деятельности человека. Также возрастают требования к надежности, комфортности, качеству изготовления, монтажа и эксплуатации лифта.

В последние годы значительное распространение получили микропроцессорные системы управления лифтами, позволяющие реализовать достаточно сложные алгоритмы функционирования лифта (или группы лифтов) таким образом, чтобы минимизировать время ожидания и добиться максимальной производительности с учетом направленности и напряженности пассажиропотока в здании. При проектировании системы управления лифтом разработчик сталкивается с необходимостью обеспечить достаточно высокую скорость перемещения лифта, высокую точность позиционирования, плавность трогания и остановки кабины лифта, а также безопасность пассажиров. В некоторых сферах применения подъемных устройств требования к данным параметрам особенно высоки. Например, высокая скорость перемещения лифта крайне необходима в высотных зданиях, а точность позиционирования и плавность – в больничных лифтах.

Проблемой при проектировании лифтов является то, что нагрузка на двигатель переменная и он практически не работает в номинальном режиме. Вели-

чина противовеса кабине обычно выбирается равной половине максимальной нагрузки. Таким образом, двигатель может работать в двигательном режиме, в режиме электромагнитного тормоза и в режиме генератора. При работе двигателя в режиме генератора встает вопрос о необходимости рассеивания или рекуперации вырабатываемой энергии.

## **10. Системные расчеты**

### **10.1. Общие сведения**

Существуют различные способы построения систем управления грузоподъемным устройством. Наиболее простым является привод подъема без дополнительного груза, противовеса. В этом случае нет необходимости использовать дополнительные элементы: крепления, тросы, механические передачи. Соответственно увеличивается надежность системы в целом; уменьшается количество необходимых операций по обслуживанию системы в процессе эксплуатации; уменьшается общая стоимость оборудования, упрощается процесс сборки системы, ее наладки. С другой стороны, двигатель должен будет развивать такой динамический момент, который с учетом суммарного КПД системы обеспечит перемещение груза в соответствии с требованиями технологического процесса. То есть исполнительный электродвигатель должен будет полностью преодолевать силу тяжести поднимаемого груза.

Вторым вариантом построения привода подъема является применение противовеса. Противовес предназначен для того, чтобы уравновесить поднимаемый груз. Если масса груза и масса противовеса совпадают, то вес груза полностью компенсируется, а, следовательно, электродвигатель не должен преодолевать силу тяжести поднимаемого груза. В этом случае двигатель преодолевает только силу тяжести части троса, пропорциональной разности высот полезного груза и противовеса. Основная часть мощности расходуется на преодоление сил трения. Недостатком системы с противовесом является увеличение общей массы перемещаемого груза, а, следовательно, увеличение инерционности системы. Вследствие этого увеличивается динамический момент, который должен развивать двигатель во время подъема груза, – по причине увеличения момента инерции системы.

На начальном этапе проектирования системы следует определить, что перевесит: недостатки первого варианта – достоинства второго или наоборот. А поэтому необходимо провести расчеты. Главным критерием выбора варианта, на котором следует остановиться, целесообразно считать экономическую рентабельность. При этом под последней следует понимать стоимость не только этапов разработки, сборки и наладки, но и этапа эксплуатации. Экономическая эффективность системы управления технологическим процессом будет определяться в основном затратами на этапе ее использования. Если остановиться на варианте без противовеса, то уменьшатся потери, связанные с приобретением оборудования. Если же выбрать второй вариант, то, скорее всего, исполнительный двигатель будет меньшего типоразмера. При этом уменьшатся потери, свя-

занные как с его приобретением, так и с его использованием в процессе эксплуатации. Но последнее утверждение необходимо подкрепить соответствующими расчетами. В лифтовых системах чаще всего применяют противовес, поскольку он позволяет уменьшить статический момент, а динамический момент во время разгона при этом увеличивается незначительно. При этом лифты обычно перемещаются на большие расстояния, а поэтому основную часть времени динамическая мощность равна нулю (исключение – этапы разгона и торможения). В быстродействующих подъемно-транспортных устройствах, где необходимы быстрые разгон и торможение, целесообразно использовать систему без противовеса. В любом случае следует провести расчет энергетических затрат для обоих вариантов построения системы, и по результатам анализа полученных данных остановиться на конкретном варианте.

Далее приводятся основные расчетные соотношения и в качестве примера представлен расчет системы со следующими исходными данными:

- масса подвижной части подъемника (кабины)  $m_n = 250$  кг,
- максимальная масса груза  $m_{гр} = 400$  кг;
- скорость подъема  $V = 300$  мм/с;
- диаметр звездочки  $D = 250$  мм;
- КПД нагрузки  $\eta_L = 90$  %;
- КПД редуктора  $\eta_{ред} = 92$  %;
- расстояние  $h = 3,5$  м;
- продолжительность включения (ПВ) 50 %.

## 10.2. Расчет цикла движения

Выберем ускорение при разгоне  $a = 0,2$  м/с<sup>2</sup>. Если ускорение будет слишком большим, потребуется значительная динамическая мощность, а в пассажирских лифтах это приведет к дискомфорту пассажиров. Если разгон будет слишком медленным, не будет достигаться заданной скорости движения при перемещении на малые расстояния, что допускается только в быстроходных лифтах при перемещении на один-два этажа.

Время разгона определяется по формуле

$$t_p = \frac{V}{a} = \frac{0,3}{0,2} = 1,5 \text{ с.} \quad (10.1)$$

Исходя из приведенных выше соображений выберем скорость позиционирования (установки уровня)  $V_y$  в 10 раз меньше основной скорости перемещения, а время позиционирования выберем равным  $t_n = 1$  с, что является компромиссом между противоречивыми требованиями увеличения точности остановки и уменьшения общего времени движения.

Профиль скорости с учетом плавных переходов, реализуемых устройством управления, изображен на рис. 10.1.



Рисунок 10.1. Профиль скорости

Если ускорение при торможении (замедление) принять равным по модулю ускорению при разгоне, то время перехода к скорости позиционирования будет определяться следующим образом:

$$a = \frac{V - V_y}{t_3}, \quad t_3 = \frac{V - V_y}{a}. \quad (10.2)$$

Подставляя численные значения, получим

$$t_3 = \frac{0,3 - 0,03}{0,2} = 1,35 \text{ с.} \quad (10.3)$$

Время торможения определяется аналогично:

$$t_T = \frac{V_y}{a} = \frac{0,03}{0,2} = 0,15 \text{ с.} \quad (10.4)$$

Длительность торможения (без учета времени движения со скоростью позиционирования) составляет  $t_{\text{торм}} = t_3 + t_T = 1,50 \text{ с.}$

Полный тормозной путь представляет собой сумму пути  $S_3$ , который кабина проходит во время перехода от постоянной скорости движения к скорости установки уровня; пути  $S_y$ , который кабина проходит за время движения со скоростью позиционирования, и пути  $S_o$  – до полной остановки кабины:

$$S_{\text{торм}} = S_3 + S_y + S_o. \quad (10.5)$$

Путь, который кабина проходит за время перехода от постоянной скорости движения к скорости установки уровня, определяется по формуле

$$S_3 = \frac{a \cdot t_3^2}{2} + V_y \cdot t_3 = \frac{V - V_y}{2} \cdot t_3^2 + V_y \cdot t_3 = \frac{t_3 \cdot (V + V_y)}{2}. \quad (10.6)$$

Подставляя численные значения, получим

$$S_3 = \frac{1,35 \cdot (0,3 + 0,03)}{2} = 0,223 \text{ м.} \quad (10.7)$$

Определим путь, который кабина проходит за время движения со скоростью установки уровня:

$$S_y = t_{\text{п}} \cdot V_y = 1 \cdot 0,03 = 0,03 \text{ м.} \quad (10.8)$$

Путь, который проходит кабина за время переход от скорости установки уровня до полной остановки, составляет

$$S_o = \frac{V_y \cdot t_T}{2} = \frac{0,03 \cdot 0,15}{2} = 0,002 \text{ м.} \quad (10.9)$$

Тогда тормозной путь

$$S_{\text{торм}} = S_z + S_y + S_o = 0,223 + 0,030 + 0,002 = 0,255 \text{ м.} \quad (10.10)$$

Расстояние, которое проходит кабина за время разгона, составляет

$$S_p = \frac{1}{2} \cdot t_p \cdot V = 0,5 \cdot 1,5 \cdot 0,3 = 0,225 \text{ м.} \quad (10.11)$$

Тогда расстояние, которое подвижная часть подъемника проходит на номинальной скорости, будет составлять

$$S_H = h - S_{\text{торм}} - S_p = 3,5 - 0,255 - 0,225 = 3,020 \text{ м.} \quad (10.12)$$

Если это расстояние получается отрицательным, значит, ускорение  $a$  выбрано неверно, поскольку двигатель не успевает достичь номинальной скорости. В данном случае ускорение выбрано верно.

Рассчитаем время движения кабины с номинальной скоростью:

$$t_H = \frac{S_H}{V} = \frac{3,020}{0,3} = 10,07 \text{ с.} \quad (10.13)$$

### 10.3. Подъемное устройство без противовеса

При использовании привода подъема без противовеса электродвигатель должен полностью преодолевать силу тяжести полезного груза. Дополнительно при расчете следует учитывать и силу тяжести троса, силу трения различных элементов системы, ее подвижных частей, в особенности редуктора. Для учета этого рассчитаем КПД системы:

$$\eta = \eta_{\text{ред}} \cdot \eta_L = 0,92 \cdot 0,90 \approx 0,83. \quad (10.14)$$

Мощность выбираемого двигателя должна быть больше вычисленной статической мощности (в квазистационарном режиме). Статическая мощность определяется по формуле

$$P_{\text{ст}} = \frac{m_{\Sigma} \cdot g \cdot V}{\eta}, \quad (10.15)$$

где  $m_{\Sigma}$  – суммарная поднимаемая масса.

Поднимаемая масса может изменяться, поэтому произведем расчет для самого тяжелого для исполнительного механизма режима, когда кабина загружена полностью. Максимальная масса, которую необходимо поднимать, в соответствии с исходными данными составляет:

$$m_{\Sigma} = m_{\text{л}} + m_{\text{тр}} = 250 + 400 = 650 \text{ кг.} \quad (10.16)$$

Рассчитаем статическую мощность, которую должен развивать двигатель при движении с постоянной скоростью, по формуле (10.15):

$$P_{\text{ст}} = \frac{650 \cdot 9,81 \cdot 0,3}{0,83} = 2300 \text{ Вт} = 2,30 \text{ кВт.} \quad (10.17)$$

Формулы для расчета системы без противовеса аналогичны формулам для системы с противовесом с учетом нулевой массы противовеса и изменений в режимах работы, а соответственно и в формулах (например, движение без груза вниз в системе с противовесом осуществляется в двигательном режиме, а в системе без противовеса в генераторном) и приведены в следующих подраз-

делах. Результаты расчета системы без противовеса для различных режимов работы сведены в табл. 10.1.

Мощность двигателя при различных режимах работы привода Таблица 10.1

Мощность, кВт	Режим работы привода			
	с грузом вверх	без груза вверх	с грузом вниз	без груза вниз
Статическая	2,30	0,89	-1,59	-0,61
Статическая + динамическая, при разгоне	2,40	0,95	-1,49	-0,54
Статическая + динамическая, при торможении	2,22	0,83	-1,67	-0,67

Рабочий цикл для данного случая будет иметь вид, аналогичный рис. 9.3.

Поскольку динамическая мощность привода подъемного устройства без противовеса относительно мала (меньше 20 % от статической мощности), для выбора двигателя достаточно определить статическую мощность двигателя.

#### 10.4. Подъемное устройство с противовесом

В системе без противовеса около 90 % мощности двигателя расходуется на преодоление силы тяжести (статическая мощность). В системе с противовесом при 100 %-ном равновесии кабины с грузом и противовеса влияние силы тяжести отсутствует, но динамическая мощность при разгоне удваивается, поскольку увеличивается ускоряемая масса.

Массу противовеса целесообразно принять равной сумме массы подвижной части подъемника (кабины) и половины грузоподъемности:

$$m_{\text{пр}} = m_{\text{л}} + \frac{m_{\text{гр}}}{2} = 250 + \frac{400}{2} = 450 \text{ кг.} \quad (10.18)$$

Для расчета требуемой статической мощности двигателя необходимо найти эквивалентную массу нагрузки при полной загрузке и с пустой кабиной:

$$m_{\text{эkv.нагр}} = m_{\text{л}} + m_{\text{гр}} - m_{\text{пр}} = 250 + 400 - 450 = 200 \text{ кг,} \quad (10.19)$$

$$m_{\text{эkv.пуст}} = m_{\text{л}} - m_{\text{пр}} = 250 - 450 = -200 \text{ кг.} \quad (10.20)$$

Таким образом, если кабина пустая или загружена менее чем на 200 кг, двигатель работает в генераторном режиме. Для отвода вырабатываемой двигателем энергии используется тормозное сопротивление, подключаемое к автоматическому регулятору частоты (преобразователю частоты, инвертору).

Расчет статической мощности производится по формуле

$$P_{\text{ст}} = \frac{m_{\text{эkv.нагр}} \cdot g \cdot V}{1000 \cdot \eta} = \frac{200 \cdot 9,8 \cdot 0,3}{1000 \cdot 0,83} = 0,71 \text{ кВт.} \quad (10.21)$$

Момент нагрузки (только расчетная величина, без учета КПД)

$$M_{\text{н}} = \frac{m_{\text{экв.нагр}} \cdot g \cdot V \cdot 9,55}{n_{\text{д}}}, \quad (10.22)$$

где  $n_{\text{д}}$  – номинальная частота вращения электродвигателя;  
 9,55 – коэффициент, учитывающий то, что значение скорости вращения вала двигателя подставляется в об/мин.

Поскольку двигатель еще не выбран, а значит, значение  $n_{\text{д}}$  еще не известно, для расчета примем  $n_{\text{д}} = 1400 \text{ мин}^{-1}$ , поскольку это значение соответствует примерной величине скорости асинхронных двигателей мощностью до 4 кВт с двумя парами полюсов, а с учетом приведенных выше расчетов ожидается, что значение мощности электродвигателя будет находиться в этом диапазоне мощностей.

Момент нагрузки тогда составит

$$M_{\text{н}} = \frac{200 \cdot 9,8 \cdot 0,3 \cdot 9,55}{1400} = 4,0 \text{ Н}\cdot\text{м}. \quad (10.23)$$

Для определения номинальной мощности электродвигателя необходимо также знать и величину динамической мощности.

Динамическая мощность без учета момента инерции ротора двигателя

$$P_{\text{д}} = \frac{(m_{\text{л}} + m_{\text{гр.макс}} + m_{\text{пр}}) \cdot a \cdot V}{1000 \cdot \eta} = \frac{(250 + 400 + 450) \cdot 0,2 \cdot 0,3}{1000 \cdot 0,83} = 0,08 \text{ кВт}. \quad (10.24)$$

Без учета мощности на ускорение ротора, которая еще не определена, полная мощность двигателя составит

$$P_{\text{полн}} = P_{\text{с}} + P_{\text{д}} = 0,71 + 0,08 = 0,79 \text{ кВт}. \quad (10.25)$$

Это значение значительно меньше того, которое получается при осуществлении подъема без противовеса. Поэтому в данной системе необходимо использовать противовес. Полученные значения являются приблизительными (окончательный расчет приводится ниже), однако они позволяют оценить требуемую мощность двигателя.

Расчетное передаточное число редуктора

$$i_{\text{ред}} = \frac{\pi \cdot D \cdot n_{\text{д}}}{60 \cdot V} = \frac{3,14 \cdot 0,25 \cdot 1400}{60 \cdot 0,3} = 61. \quad (10.26)$$

Если для управления асинхронным двигателем не используется преобразователь частоты, передаточное число редуктора следует выбрать меньше полученного значения для обеспечения максимальной скорости движения. Например, с учетом возможного падения напряжения в питающей сети, можно принять  $i'_{\text{ред}} = 50$ . Тогда частота вращения двигателя при движении кабины со скоростью  $V$  и со скоростью установки уровня соответственно равны

$$n'_{\text{д}} = \frac{60 \cdot V \cdot i'_{\text{ред}}}{\pi \cdot D} = \frac{60 \cdot 0,3 \cdot 50}{3,14 \cdot 0,25} = 1150 \text{ об/мин}, \quad (10.27)$$

$$n'_{\text{у}} = \frac{60 \cdot V_{\text{у}} \cdot i'_{\text{ред}}}{\pi \cdot D} = \frac{60 \cdot 0,03 \cdot 50}{3,14 \cdot 0,25} = 115 \text{ об/мин}. \quad (10.28)$$

Однако поскольку в системе планируется использовать частотно-регулируемый электропривод, способный обеспечить скорость двигателя выше номинальной, производить пересчет частоты вращения  $n_d$  нет необходимости.

#### 10.4.1. Движение вверх при полной загрузке

Рассчитаем внешний момент инерции, приведенный к валу двигателя (это и дает коэффициент 91,2), для случая движения вверх при полной загрузке:

$$J_{\text{вн}} = 91,2 \cdot (m_{\text{л}} + m_{\text{тр}} + m_{\text{пр}}) \cdot \left( \frac{V}{n_d} \right)^2 =$$

$$= 91,2 \cdot (250 + 400 + 450) \cdot \left( \frac{0,3}{1400} \right)^2 = 0,0046 \text{ кг} \cdot \text{м}^2. \quad (10.29)$$

Момент нагрузки (здесь и далее под  $m$  в зависимости от режима работы понимается либо  $m_{\text{экв.нагр}}$ , либо  $m_{\text{экв.пуст}}$ )

$$M_{\text{ст}} = \frac{m \cdot g \cdot V \cdot 9,55}{n_d} = \frac{200 \cdot 9,8 \cdot 0,3 \cdot 9,55}{1400} = 4,01 \text{ Нм}. \quad (10.30)$$

Статическая мощность при движении вверх с грузом

$$P_{\text{ст}} = \frac{M_{\text{ст}} \cdot n_d}{9,55 \cdot \eta \cdot 1000} = \frac{4,01 \cdot 1400}{9550 \cdot 0,83} = 0,71 \text{ кВт}. \quad (10.31)$$

Для дальнейших расчетов необходимо знать значение момента инерции двигателя, которое до его выбора неизвестно, а поэтому следует подставить приблизительное значение. С учетом полученного значения полной мощности (10.25) предположим, что будет использоваться двигатель 5А80МА4. Его момент инерции  $J_d = 0,0034 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ . Если данный двигатель не подойдет, расчеты надо будет повторить. Однако если не сделать большой ошибки в предполагаемой мощности двигателя, на итоговые цифры, скорее всего, это не повлияет.

Динамический момент (с учетом статического, см. формулу) при разгоне

$$M_{\text{дин}} = \frac{\left( J_d + \frac{J_{\text{вн}}}{\eta} \right) \cdot n_d}{9,55 \cdot t_p} + \frac{M_{\text{ст}}}{\eta} = \frac{\left( 0,0034 + \frac{0,0046}{0,83} \right) \cdot 1400}{9,55 \cdot 1,5} + \frac{4,01}{0,83} = 5,7 \text{ Нм}. \quad (10.32)$$

Динамический момент нагрузки должен быть меньше 130 % от номинального момента, обеспечиваемого преобразователем частоты и рассчитанного по номинальной мощности (большинство инверторов способно непродолжительное время работать с перегрузкой по току в 150%, перегрузка по моменту меньше). **Здесь и далее под динамическим моментом (мощностью) понимается суммарный момент (мощность) в динамическом режиме, с учетом статической составляющей.**

Мощность при разгоне

$$P_{\text{дин}} = \frac{M_{\text{дин}} \cdot n_d}{9,55 \cdot 1000} = \frac{5,7 \cdot 1400}{9550} = 0,84 \text{ кВт}. \quad (10.33)$$

Динамические момент и мощность при торможении

$$M_{\text{дин.т}} = -\frac{(J_{\text{д}} + J_{\text{вн}} \cdot \eta) \cdot n_{\text{д}}}{9,55 \cdot t_3} + \frac{M_{\text{ст}}}{\eta} =$$

$$= -\frac{(0,0034 + 0,0046 \cdot 0,83) \cdot 1400}{9,55 \cdot 1,50} + \frac{4,01}{0,83} = 4,1 \text{ Нм}; \quad (10.34)$$

$$P_{\text{дин.т}} = \frac{M_{\text{дин.т}} \cdot n_{\text{д}}}{9550} = \frac{4,1 \cdot 1400}{9550} = 0,60 \text{ кВт}. \quad (10.35)$$

Аналогично производится расчет мощности для всех состояний привода, при этом учитываются направление движения и направление действия КПД.

#### 10.4.2. Движение вверх при отсутствии груза

Внешний момент инерции для случая движения вверх при отсутствии груза

$$J_{\text{вн}} = 91,2 \cdot (m_{\text{л}} + m_{\text{пр}}) \cdot \left(\frac{V}{n_{\text{д}}}\right)^2 = 91,2 \cdot (250 + 450) \cdot \left(\frac{0,3}{1400}\right)^2 = 0,0029 \text{ кг} \cdot \text{м}^2. \quad (10.36)$$

Статический момент

$$M_{\text{ст}} = \frac{m \cdot g \cdot V \cdot 9,55}{n_{\text{д}}} = \frac{-200 \cdot 9,8 \cdot 0,3 \cdot 9,55}{1400} = -4,01 \text{ Нм}. \quad (10.37)$$

Статическая мощность при движении вверх без груза

$$P_{\text{ст}} = \frac{M_{\text{ст}} \cdot n_{\text{д}} \cdot \eta}{9,55 \cdot 1000} = \frac{-4,01 \cdot 1400 \cdot 0,83}{9550} = -0,49 \text{ кВт}. \quad (10.38)$$

Динамический момент при разгоне

$$M_{\text{дин}} = \frac{\left(J_{\text{д}} + \frac{J_{\text{вн}}}{\eta}\right) \cdot n_{\text{д}}}{9,55 \cdot t_{\text{р}}} + M_{\text{ст}} \cdot \eta =$$

$$= \frac{\left(0,0034 + \frac{0,0029}{0,83}\right) \cdot 1400}{9,55 \cdot 1,5} - 4,01 \cdot 0,83 = -2,7 \text{ Нм}. \quad (10.39)$$

Мощность при разгоне

$$P_{\text{дин}} = \frac{M_{\text{дин}} \cdot n_{\text{д}}}{9,55 \cdot 1000} = \frac{-2,7 \cdot 1400}{9550} = -0,40 \text{ кВт}. \quad (10.40)$$

Динамический момент и мощность при торможении

$$M_{\text{дин.т}} = -\frac{(J_{\text{д}} + J_{\text{вн}} \cdot \eta) \cdot n_{\text{д}}}{9,55 \cdot t_3} + M_{\text{ст}} \cdot \eta =$$

$$= -\frac{(0,0034 + 0,0029 \cdot 0,83) \cdot 1400}{9,55 \cdot 1,50} - 4,01 \cdot 0,83 = -3,9 \text{ Нм}; \quad (10.41)$$

$$P_{\text{дин.т}} = \frac{M_{\text{дин.т}} \cdot n_{\text{д}}}{9550} = \frac{-3,9 \cdot 1400}{9550} = -0,57 \text{ кВт.} \quad (10.42)$$

При движении пустой кабины вверх двигатель работает в генераторном режиме, поскольку противовес на 200 кг тяжелее пустой кабины.

### 10.4.3. Движение вниз при отсутствии груза

Статический момент при движении вниз без груза

$$M_{\text{ст}} = \frac{m \cdot g \cdot V \cdot 9,55}{n_{\text{д}}} = \frac{200 \cdot 9,8 \cdot 0,3 \cdot 9,55}{1400} = 4,01 \text{ Н·м.} \quad (10.43)$$

Статическая мощность тогда

$$P_{\text{ст}} = \frac{M_{\text{ст}} \cdot n_{\text{д}}}{9,55 \cdot \eta \cdot 1000} = \frac{4,01 \cdot 1400}{9550 \cdot 0,83} = 0,71 \text{ кВт.} \quad (10.44)$$

Динамический момент при разгоне

$$M_{\text{дин}} = \frac{\left( J_{\text{д}} + \frac{J_{\text{вн}}}{\eta} \right) \cdot n_{\text{д}}}{9,55 \cdot t_{\text{р}}} + \frac{M_{\text{ст}}}{\eta} = \frac{\left( 0,0034 + \frac{0,0029}{0,83} \right) \cdot 1400}{9,55 \cdot 1,5} + \frac{4,01}{0,83} = 5,5 \text{ Нм.} \quad (10.45)$$

Мощность при разгоне

$$P_{\text{дин}} = \frac{M_{\text{дин}} \cdot n_{\text{д}}}{9,55 \cdot 1000} = \frac{5,5 \cdot 1400}{9550} = 0,81 \text{ кВт.} \quad (10.46)$$

Динамический момент и мощность при торможении

$$M_{\text{дин.т}} = -\frac{\left( J_{\text{д}} + J_{\text{вн}} \cdot \eta \right) \cdot n_{\text{д}}}{9,55 \cdot t_{\text{з}}} + \frac{M_{\text{ст}}}{\eta} =$$

$$= -\frac{\left( 0,0034 + 0,0029 \cdot 0,83 \right) \cdot 1400}{9,55 \cdot 1,50} + \frac{4,01}{0,83} = 4,3 \text{ Нм;} \quad (10.47)$$

$$P_{\text{дин.т}} = \frac{M_{\text{дин.т}} \cdot n_{\text{д}}}{9550} = \frac{4,3 \cdot 1400}{9550} = 0,63 \text{ кВт.} \quad (10.48)$$

При движении пустой лебедки вниз противовес тяжелее лебедки на 200 кг. При этом отличие от случая движения нагруженной кабины вверх заключается в меньшем моменте инерции нагрузки.

### 10.4.4. Движение вниз при полной загрузке

При движении кабины с грузом вниз двигатель работает в генераторном режиме. При расчетах принимаем массу нагрузки  $m = -200$  кг. При этом механическая энергия преобразуется в электрическую, а КПД действует в обратном направлении относительно рассмотренных выше случаев, где двигатель работал в двигательном режиме.

Статический момент при движении вниз при полной загрузке составит

$$M_{\text{ст}} = \frac{m \cdot g \cdot V \cdot 9,55}{n_{\text{д}}} = \frac{-200 \cdot 9,8 \cdot 0,3 \cdot 9,55}{1400} = -4,01 \text{ Нм.} \quad (10.49)$$

А статическая мощность

$$P_{ст} = \frac{M_{ст} \cdot \eta \cdot n_d}{9,55 \cdot 1000} = \frac{-4,01 \cdot 0,83 \cdot 1400}{9550} = -0,49 \text{ кВт.} \quad (10.50)$$

Динамический момент при разгоне

$$M_{дин} = \frac{\left( J_d + \frac{J_{вн}}{\eta} \right) \cdot n_d}{9,55 \cdot t_p} + M_{ст} \cdot \eta =$$

$$= \frac{\left( 0,0034 + \frac{0,0046}{0,83} \right) \cdot 1400}{9,55 \cdot 1,5} - 4,01 \cdot 0,83 = -2,5 \text{ Нм.} \quad (10.51)$$

Мощность при разгоне

$$P_{дин} = \frac{M_{дин} \cdot n_d}{9,55 \cdot 1000} = \frac{-2,5 \cdot 1400}{9550} = -0,37 \text{ кВт.} \quad (10.52)$$

Динамический момент и мощность при торможении составят соответственно:

$$M_{дин.т} = -\frac{\left( J_d + J_{вн} \cdot \eta \right) \cdot n_d}{9,55 \cdot t_3} + M_{ст} \cdot \eta =$$

$$= -\frac{\left( 0,0034 + 0,0046 \cdot 0,83 \right) \cdot 1400}{9,55 \cdot 1,50} - 4,01 \cdot 0,83 = -4,0 \text{ Нм;} \quad (10.53)$$

$$P_{дин.т} = \frac{M_{дин.т} \cdot n_d}{9550} = \frac{-4,0 \cdot 1400}{9550} = -0,59 \text{ кВт.} \quad (10.54)$$

## 10.5. Результаты расчетов

Полученные выше результаты сведем в табл. 10.2. Как видно из данной таблицы, при работе в генераторном режиме двигатель вырабатывает значительную мощность, сопоставимую с потребляемой из сети в двигательном режиме. Для рассеяния данной мощности необходимо использовать тормозное сопротивление.

Мощность двигателя при различных режимах работы привода Таблица 10.2

Мощность, кВт	Режим работы привода			
	с грузом вверх	без груза вверх	с грузом вниз	без груза вниз
Статическая мощность	0,71	-0,49	-0,49	0,71
Статическая + динамическая, при разгоне	0,84	-0,40	-0,37	0,81
Статическая + динамическая, при торможении	0,60	-0,57	-0,59	0,63

## 10.6. Расчет и выбор основных функциональных элементов

### 10.6.1. Выбор исполнительного электродвигателя

Анализ полученных данных (табл. 10.2) позволяет сделать вывод, что при работе в двигательном режиме максимальная величина требуемой для двигателя мощности превосходит статическую не более чем на 30%. С учетом того, что электрический двигатель способен кратковременно работать с перегрузкой, в данном случае достаточно выбрать двигатель номинальной мощностью 0,71 кВт и проверить его на нагрев. При работе в динамическом режиме, двигатель может потреблять бóльшую мощность (см. табл. 10.2), что будет приводить к его нагреву. В то время, когда двигатель будет потреблять мощность меньше номинальной, он будет остывать. В пассажирских лифтах бóльшую часть времени при перемещении кабина движется с постоянной скоростью, двигатель работает в статическом режиме (при этом в среднем только 50% времени в двигательном режиме), т. е. без перегрузки. Значительную часть времени кабина вообще не движется, а поэтому двигатель не только не перегревается, но и часто не выходит даже в рабочий тепловой режим.

Однако для точного расчета теплового режима двигателя, необходимо рассмотреть полный цикл его работы. Поскольку для расчетного примера приведенных данных для составления полного цикла работы недостаточно, выберем двигатель мощностью не ниже 0,9 кВт. Ближайший подходящий по справочнику асинхронный двигатель – 5А80МА4 мощностью 1,1 кВт, предназначенный для работы в режимах S1–S6. Его параметры представлены в табл. 10.3.

Технические характеристики асинхронного  
электродвигателя 5А80МА4

Таблица 10.3

Наименование параметра	Значение параметра
Число фаз питающей сети	3
Частота питающей сети	50 Гц
Напряжение питающей сети	380 В
Степень защиты	IP54
Класс нагревостойкости (класс по изоляции)	F
Номинальная мощность	1,1 кВт
Номинальный ток при 380 В	2,8 А
Количество пар полюсов	2
Частота вращения магнитного поля	1500 мин <sup>-1</sup>
Номинальная частота вращения	1400 мин <sup>-1</sup>
КПД	74%
cos φ	0,8
Номинальный момент	7,5 Н·м
Момент инерции	0,0034 кг·м <sup>2</sup>
Отношение пускового момента к номинальному моменту	2

Отношение пускового тока к номинальному току	4,8
Отношение максимального момента к номинальному моменту	2,4
Масса	13 кг

Номинальный момент выбранного двигателя 7,5 Нм равен требуемому динамическому моменту в самом тяжелом для двигателя режиме – движение вверх при полной загрузке. Проверочный расчет на нагрев не проводим, поскольку момент, который должен развивать двигатель, ни в одном из рассмотренных выше режимов работы не превышает номинальный момент двигателя.

### 10.6.2. Расчет и выбор тормозного сопротивления

Для того чтобы сделать заключение о необходимой номинальной мощности тормозного сопротивления, нужно рассмотреть цикл движения, представленный на рис. 10.2.

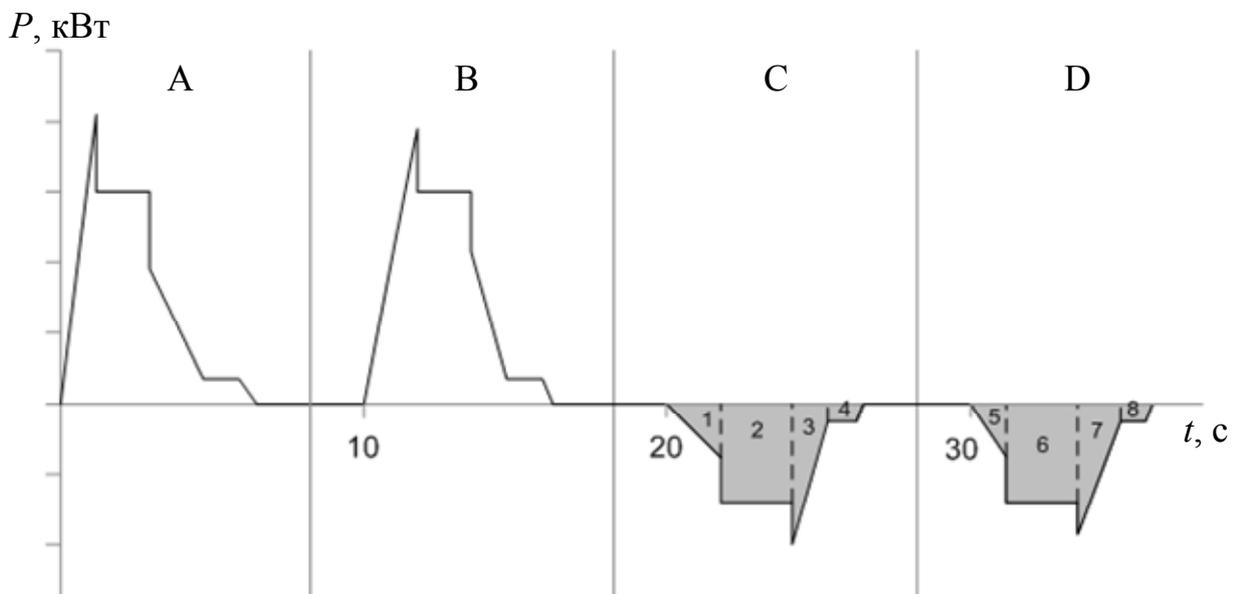


Рис. 10.2. Цикл движения в системе с противовесом:

А – с грузом вверх; В – без груза вниз; С – с грузом вниз; D – без груза вверх

Закрашенные на рисунке площади соответствуют генераторному режиму работы. Продолжительность включения (ПВ) тормозного сопротивления составляет 50% (половину времени двигатель работает в генераторном режиме).

Средняя мощность торможения рассчитывается через мощности на отдельных участках:

$$P_{\text{торм}} = \frac{|P_1| \cdot t_1 + |P_2| \cdot t_2 + \dots + |P_n| \cdot t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}. \quad (10.55)$$

Приведенные промежуточные расчеты соответствуют расчету площадей закрашенных участков:

$$\begin{aligned}
|P_1| \cdot t_p &= \frac{0,37}{2} \cdot 1,50 = 0,28 \text{ кВт}\cdot\text{с}; \\
|P_2| \cdot t_H &= 0,49 \cdot 10,07 = 4,93 \text{ кВт}\cdot\text{с}; \\
|P_3| \cdot t_{\text{торм}} &= \frac{0,59}{2} \cdot 1,50 = 0,44 \text{ кВт}\cdot\text{с}; \\
|P_4| \cdot t_{\Pi} &= 0,07 \cdot 1 = 0,07 \text{ кВт}\cdot\text{с}; \\
|P_5| \cdot t_p &= \frac{0,40}{2} \cdot 1,50 = 0,30 \text{ кВт}\cdot\text{с}; \\
|P_6| \cdot t_H &= 0,49 \cdot 10,07 = 4,93 \text{ кВт}\cdot\text{с}; \\
|P_7| \cdot t_{\text{торм}} &= \frac{0,57}{2} \cdot 1,50 = 0,43 \text{ кВт}\cdot\text{с}; \\
|P_8| \cdot t_{\Pi} &= 0,07 \cdot 1 = 0,07 \text{ кВт}\cdot\text{с}.
\end{aligned}$$

В расчетах принято, что мощность при движении со скоростью позиционирования  $P_4 = P_8 = P_{\text{ст}} / 10 = 0,07$  кВт, поскольку скорость установки уровня в 10 раз меньше основной скорости, а статический момент не меняется.

Средняя мощность торможения

$$P_{\text{торм}} = \frac{11,45}{28,14} = 0,41 \text{ кВт}.$$

Максимальная мощность торможения составляет  $P_{\text{торм.мах}} = 0,49$  кВт. Это значение не должно превышать табличное значение выбранного тормозного сопротивления при 6 % ПВ (торможение в самом тяжелом режиме должно составлять не более 6 % рабочего цикла).

Выберем с некоторым запасом тормозное сопротивление BW068-004 821 693 2 со следующими характеристиками:

- нагрузочная способность при 50 % ПВ  $P_H = 0,7$  кВт;
- нагрузочная способность при 6 % ПВ  $P_H = 3,8$  кВт;
- величина сопротивления – 68 Ом  $\pm 10$  %;
- ток отключения – 1,4 А;
- конструкция – проволочное сопротивление на керамической трубке;
- электрическое соединение – керамические клеммы с площадью сечения 2,5 мм<sup>2</sup>;
- температура окружающей среды –  $-20 \dots +45$  °С;
- тип охлаждения – самоохлаждение.

### 10.6.3. Выбор автоматического регулятора скорости вращения

Основной тип привода массового применения – электропривод на переменном токе. Основным недостатком асинхронного двигателя является нелинейность его механической характеристики и сложность плавного регулирования частоты вращения в широких пределах. Решить эту проблему в динамических режимах позволяет использование принципов векторного управления.

Для реализации векторного управления необходимо использовать частотный преобразователь (автоматический регулятор скорости вращения). Его мощность должна быть не меньше номинальной мощности выбранного электродвигателя, при этом следует учесть возможность его работы с перегрузками.

Существуют также специальные преобразователи частоты, предназначенные специально для лифтов и подъемно-транспортных устройств, например частотные преобразователи Omron серии CIMR-L7 (диапазон мощностей 4–55 кВт). Выберем автоматический регулятор скорости вращения CIMR-L7Z44P0, имеющий следующие характеристики [1]:

- входное напряжение – 3 фазы 380–400 В;
- максимальная мощность двигателя – 4 кВт;
- выходная мощность – 9 кВт;
- управление – вольт-частотное (V/f) или векторное;
- прямое управление тормозным механизмом;
- аварийный режим работы (от батареи).

Выбранный преобразователь частоты имеет значительный запас по мощности, поэтому нет необходимости проводить его проверку на нагрев.

CIMR-L7 имеет функцию автонастройки, позволяющую преобразователю получить необходимую для качественного управления информацию об электродвигателе. Автоматический регулятор серии L7 позволяет реализовать как замкнутое, так и разомкнутое (без обратной связи по скорости или положению) векторное управление трехфазным асинхронным двигателем. Для обеспечения точности позиционирования автоматический регулятор предусматривает пошаговое изменение скорости (переход на скорость установки уровня) с использованием цифровых входных сигналов. Кроме того, он имеет следующие функции:

- динамическое торможение (с подпиткой постоянным током);
- разгон-торможение с применением S-образных характеристик;
- компенсация скольжения двигателя;
- управление скоростью;
- определение момента;
- компенсация момента нагрузки;
- защита от перегрузки двигателя;
- предотвращение опрокидывания ротора.

Автоматические регуляторы серии L7 поддерживают два типа последовательности действий при торможении. Один из них – это компенсация момента при запуске с помощью сигнала на аналоговом вводе, второй – без компенсации момента. Если на подъемнике установлен датчик нагрузки, в режиме замкнутого векторного управления аналоговый ввод может использоваться для передачи величины компенсирующего момента автоматическому регулятору. При подаче команды выбора направления перемещения отрегулированное значение величины компенсирующего момента фиксируется. При запуске оно увеличивается от нуля до фиксированного значения в течение заданного времени. Величина компенсирующего момента удерживается в течение всего времени вы-

полнения операций и сбрасывается после снятия команды выбора направления перемещения.

Для устранения резких толчков при изменении скорости могут использоваться пять различных постоянных времени S-образного изменения скорости (рис. 10.3): время S-образной характеристики в начале разгона, в конце разгона, в начале торможения, в конце торможения, при скорости ниже скорости установки уровня.

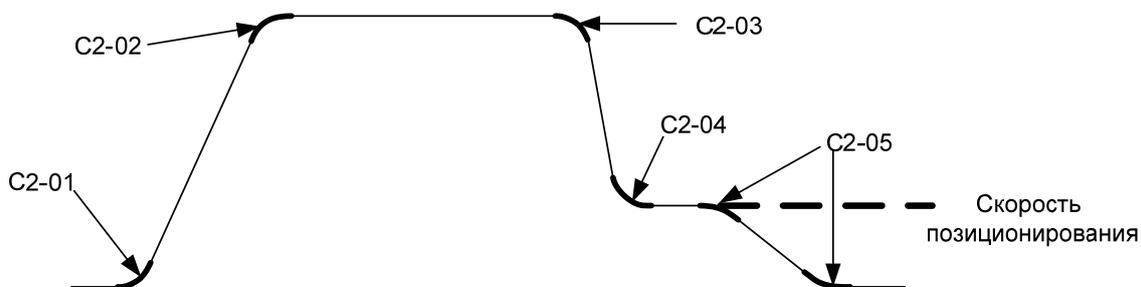


Рисунок 10.3. S-образные характеристики изменения скорости

Функция предотвращения опрокидывания ротора двигателя в процессе разгона предотвращает опрокидывание при работе со значительными нагрузками. При включении данной функции скорость разгона замедляется, если выходной ток превышает 85 % от заданного значения и разгон вообще прекращается, если этот ток достигает заданного значения (по умолчанию 150 % от номинального тока двигателя).

Функция предотвращения опрокидывания ротора двигателя при выполнении операций предохраняет двигатель от опрокидывания путем автоматического снижения скорости вращения при возникновении кратковременной перегрузки двигателя, когда он работает с постоянной скоростью. Данная функция может применяться в режиме V/f-регулирования. Если выходной ток автоматического регулятора продолжает превышать заданное значение (по умолчанию 150 % от номинального тока) в течение 100 мс, скорость двигателя снижается. Когда выходной ток достигает значения 98 % от номинального тока, двигатель опять разгоняется до заданной частоты.

Когда нагрузка велика, скольжение двигателя значительно возрастает, и скорость двигателя уменьшается. Функция компенсации скольжения поддерживает постоянство скорости вращения двигателя независимо от изменения величины нагрузки. Данная функция может применяться в режиме V/f-регулирования или разомкнутого векторного управления. Предел компенсации скольжения – 200 % от номинального скольжения двигателя. Компенсацию скольжения можно также использовать в генераторном режиме работы.

Функция компенсации скольжения позволяет повысить точность установки уровня. Автоматический регулятор измеряет величину тока или сигнал задания момента через секунду после завершения разгона двигателя в течение 0,5 с, а затем вычисляет среднее значение для оценки нагрузки. Это значение

используется для вычисления скольжения, которое прибавляется к сигналу задания скорости во время позиционирования.

Функция форсирования магнитного поля управляет магнитным потоком двигателя и компенсирует задержку установления магнитного потока в двигателе. Таким образом, использование этой функции повышает скорость реагирования на изменение сигнала задания скорости или на изменение нагрузки.

Автоматический регулятор скорости вращения CIMR-L7 имеет функцию определения превышения момента или недостаточного момента. Неприемлемый момент определяется посредством:

- слежения за величиной выходного тока в режиме V/f-регулирования;
- слежения за величиной заданного момента в режиме векторного управления.

Функция ограничения момента двигателя позволяет ограничить момент двигателя независимо в каждом из 4-х квадрантов. Предельный момент может быть задан с помощью параметров как постоянное значение или с помощью аналогового входного сигнала как изменяемая величина. Функция ограничения момента может применяться в режиме векторного управления. С помощью 4-х параметров может производиться независимая установка пределов для моментов во всех 4-х квадрантах.

Частотный преобразователь имеет встроенное реле температурной защиты, позволяющее осуществить защиту двигателя от перегрузки.

Автоматический регулятор скорости вращения CIMR-L7 имеет большое количество дополнительных функций: настройка тока инжекции для динамического торможения при запуске и остановке, задержка включения тормозного механизма, серворегулирование при нулевой скорости, управления дверьми, ускоренное достижение этажа (автоматический пересчет времени торможения, если сигнал перехода на скорость позиционирования поступил раньше достижения основной скорости) и др. Качество работы частотного преобразователя во многом определяется его параметризацией (настройкой функций).

## **11. Лабораторная работа «Система управления подъемным устройством»**

Цели работы:

1. Ознакомление с устройством системы управления подъемным устройством и принципами ее функционирования в различных режимах;
2. Ознакомление с элементами системы, этапами их расчета и выбора.

### **11.1. Варианты заданий**

Масса подвижной части подъемника  $m_{\text{л}}$ , кг, максимальная масса груза  $m_{\text{гр}}$ , кг, скорость подъема  $V$ , см/с, КПД нагрузки  $\eta_L$ , %, КПД редуктора  $\eta_{\text{ред}}$ , %, расстояние перемещения  $h$ , м, тип системы  $T$  определяются табл. 11.1. Тип системы  $T = 1$  соответствует системе с противовесом,  $T = 2$  соответствует системе

без противовеса. Если тип системы не указан, следует провести необходимые расчеты и выбрать оптимальный. Продолжительность включения 50%.

Варианты заданий

Таблица 11.1

Вариант	$m_{л}$	$m_{гр}$	$V$	$\eta_L$	$\eta_{ред}$	$h$	$T$	Вариант	$m_{л}$	$m_{гр}$	$V$	$\eta_L$	$\eta_{ред}$	$h$	$T$
1	100	200	100	92	92	8,0	–	16	620	1480	950	82	83	16	–
2	3000	12000	70	80	75	3,5	1	17	360	360	63	81	90	45	1
3	700	1500	300	80	85	60	2	18	300	300	450	89	95	40	2
4	250	200	300	85	95	1,4	–	19	750	1000	250	86	79	32	–
5	200	600	150	88	91	10	1	20	5000	10000	200	70	70	32	1
6	900	1200	63	85	82	25	2	21	300	300	90	50	60	56	2
7	50	80	600	94	95	5,5	–	22	450	500	140	77	72	42	–
8	5000	5000	500	74	77	250	1	23	800	1500	250	79	73	28	1
9	500	900	150	86	90	7,5	2	24	150	400	180	90	93	70	2
10	1250	2500	50	79	84	3,0	–	25	6400	13600	770	63	77	600	–
11	75	100	130	91	94	8,5	1	26	400	700	90	91	90	4,0	1
12	800	800	80	83	78	2,2	2	27	420	880	43	69	71	74	2
13	350	750	75	89	89	30	–	28	2500	1500	90	88	87	1,0	–
14	500	1500	1000	87	78	300	1	29	240	360	130	89	91	18	1
15	640	830	32	76	69	1,1	2	30	600	800	420	68	78	93	2

## 11.2. Описание лабораторного макета

Лабораторный макет лифта на 2 этажа (кабина вверху, кабина внизу) с противовесом имеет следующие элементы:

- асинхронный двигатель мощностью 4 кВт;
- редуктор;
- лифтовой автоматический регулятор скорости вращения (частотный преобразователь, инвертор) Omron-Yaskawa Varispeed L7;
- программируемый логический контроллер (ПЛК) базового уровня Omron CJ1M-CPU11;
- модули ПЛК: модули ввода/вывода и модуль питания;
- индуктивные датчики приближения Omron серии E2A;
- блок питания сигнальных цепей;
- панель управления (кнопки).

В системе используется 5 датчиков приближения. В их число входят: датчик перехода на скорость установки уровня, два датчика остановки (для каждого этажа), два датчика аварийной остановки (для верхнего и нижнего этажей). Датчики остановки и аварийной остановки для верхнего этажа установлены внизу и срабатывают на противовес (когда кабина поднимается на верхний этаж, противовес опускается). В системе используется только один датчик перехода на скорость установки уровня, он срабатывает как при движении кабины вверх, так и вниз. Датчик установлен примерно посередине между этажами (это и позволило использовать только один датчик). Однако этот датчик делит расстояние между этажами на неравные части, чтобы при выполнении лаборатор-

ной работы настроить систему таким образом, чтобы она сохраняла работоспособность при некотором разбросе параметров (сделать систему робастной).

### **11.3. Подготовка к лабораторной работе**

1. Изучить разделы 9 и 10 данного практикума. Изучить основные теоретические сведения по управлению подъемно-транспортными механизмами [1].
2. Ознакомиться с техникой безопасности при работе с оборудованием [2, RU.1–RU.3; 3].
3. По описанной выше методике провести расчеты с учетом заданных по варианту исходных данных. Обратить внимание на правильность выбора величины ускорения (замедления). Полученные значения свести в табл. 10.1 или 10.2. Построить рабочий цикл электропривода (рис. 9.3 или 10.2).
4. Выбрать основные функционально необходимые элементы системы.

### **11.4. Порядок выполнения работы**

В данном подразделе описан порядок выполнения лабораторной работы. Методика выполнения работы с подробным описанием всех действий приведена в следующем подразделе.

1. По макету лифта, находящемуся в лаборатории, ознакомиться с устройством системы управления подъемно-транспортным механизмом. Записать основные технические данные оборудования лабораторного макета.
2. Составить список функционально необходимых элементов системы управления лифтом с указанием их моделей.
3. Определить значение напряжения на шине постоянного тока инвертора. Произвести пробный запуск системы.
4. Опытным путем определить максимально возможное время торможения в системе и максимально допустимое время торможения (для каждого направления движения).
5. Определить минимально возможное время торможения в системе.
6. Определить оптимальное с точки зрения плавности хода время разгона (для каждого направления движения).
7. Снять графики переходных процессов в различных режимах.
8. Произвести настройку динамических параметров системы с применением S-образных характеристик (рис. 10.3).
9. Сохранить параметры из конфигурационного файла автоматического регулятора для последующего оформления отчета.

#### **На основании результатов опытов:**

1. По функциональной схеме системы обосновать полученное значение напряжения на шине постоянного тока инвертора.
2. Проанализировать полученные в различных режимах работы графики переходных процессов. Обосновать отличия от теоретических характеристик.
3. С учетом полученных в пункте 9 *Методики выполнения работы* значений времени разгона и времени торможения составить профиль скорости

(рис. 10.1) с указанием величины скорости на различных этапах и временных интервалах отдельных частей профиля.

4. С учетом полученных в пункте 11 *Методики выполнения работы* значений времени разгона, времени торможения и S-образных характеристик составить профиль скорости (рис. 10.3) с указанием величины скорости на различных этапах и временных интервалах отдельных частей профиля.

5. Проанализировать отличия параметров автоматического регулятора из конфигурационного файла от значений по умолчанию. Подробно описать все параметры, полученные в пункте 12 *Методики выполнения работы*, пояснить их назначение и настроенные значения.

### 11.5. Методика выполнения работы

Выполнять каждый пункт методики следует только после полного его прочтения, поскольку в конце текста могут быть указаны важные с точки зрения соблюдения требований техники безопасности замечания и рекомендации.

1. Записать основные технические данные всех элементов (подразд. 11.2) лабораторного макета (см. паспортные таблички, надписи и имеющуюся в лаборатории документацию). Переписать все параметры, указанные в подразд. 6.8, с паспортной таблички двигателя. Составить список функционально необходимых элементов системы управления лифтом с указанием их моделей. **При выполнении описанных действий все оборудование должно быть выключено!**

2. Снять (отключить) цифровую панель с частотного преобразователя и соединить специальным кабелем компьютер, подключившись к его COM-порту, и преобразователь частоты L7. **Подключение/отключение кабеля должно производиться только при выключенном частотном преобразователе!** Следует учитывать, что полное отключение частотного преобразователя происходит только через некоторое время после отключения питания.

3. Включить макет (все 5 автоматических выключателей). В соответствии с вариантом запустить имеющийся на компьютере конфигурационный проект для частотного преобразователя L7 (файл L7\_XX.sdd, где XX – номер варианта). Загрузить параметры из данного файла в автоматический регулятор. Для этого сначала надо перейти в режим связи с преобразователем частоты (пункт *Установить связь* в меню *Привод* или кнопка  на инструментальной панели), а затем выбрать команду *Привод–Передать–Загрузить в привод*.

Из-за значительных электромагнитных помех, создаваемых электроприводом с импульсной модуляцией в процессе его работы, связь с частотным преобразователем может разрываться. В этом случае связь нужно восстанавливать с помощью кнопки  на инструментальной панели. Все параметры частотного преобразователя хранятся в энергонезависимой памяти, а поэтому как при отключении питания преобразователя частоты, так и при разрыве связи нет необходимости записывать заново ранее введенные параметры. Поскольку приложение CX-Drive на компьютере используется только для настройки и монито-

ринга автоматического регулятора, при разрыве связи частотный преобразователь будет продолжать работать.

4. В окне проекта (*Вид–Окно проекта*) выбрать пункт *Мониторинг–Тренд реального времени*. Увеличить рабочую область, закрыв окно вывода (*Вид–Окно вывода*). На вкладке *Настройка параметров* выбрать (установить галочку) *Напряжение шины постоянного тока* и увеличить размер окна отображения графика (разделитель между окнами). Нажать кнопку  *Play* и записать напряжение на шине постоянного тока инвертора. После запуска процесса мониторинга в основном окне начнет производиться построение графика, а в таблице внизу отображаться текущее значение выбранного параметра. Выйти из режима построения графика, нажав в *CX-Drive* кнопку  *Stop*.

5. В окне проекта войти в *Редактор параметров*, раскрыть группу *D* и выбрать параметры *D1*. Установить основную скорость движения в 33 Гц (параметр *d1-09*), а скорость установки уровня – в 2 Гц (*d1-17*). **ЗАМЕЧАНИЕ:** при конфигурировании инвертора при помощи *CX-Drive* внимательно вводить все параметры, поскольку если автоматический регулятор находится в режиме связи, то все параметры при их изменении в *CX-Drive* автоматически передаются в частотный преобразователь. Вводимые параметры следует перепроверять. Ввод параметров в частотный преобразователь осуществлен, если записанное в столбце *Значение* число скопировалось в столбец *Значение в приводе*. Иначе следует проверить связь компьютера с автоматическим регулятором.

Проверить работоспособность системы, для этого с помощью кнопок панели управления запустить систему. Кабина должна разогнаться до основной скорости перемещения, а после срабатывания датчика перехода на пониженную скорость замедлиться и продолжить движение на скорости позиционирования. В конце пути кабина должна остановиться при срабатывании датчика останки. После остановки убедиться, что датчик аварийной остановки не сработал.

6. Установить основную скорость движения в 50 Гц, скорость установки уровня в 4 Гц и определить для каждого направления движения с точностью  $\pm 0,05$  с максимально возможное время торможения в системе (параметр *C1-02*) и максимально допустимое время торможения, при котором не срабатывает аварийный датчик. **ЗАМЕЧАНИЕ:** диапазон изменения параметра *C1-02*: 1,50–2,80 с. Для этого необходимо сначала ввести минимальное время торможения и запустить систему.

Параметр *C1-02* определяет длительность перехода с основной скорости (после срабатывания датчика перехода на скорость установки уровня) на скорость позиционирования. Чем меньше этот параметр, тем быстрее осуществляется переход с одной скорости на другую и тем меньшее расстояние при этом проходит кабина, а значит, дольше движется со скоростью позиционирования до срабатывания датчика останки.

Затем необходимо постепенно увеличивать значение *C1-02* (провести серию экспериментов). При этом сначала время движения со скоростью позиционирования будет уменьшаться, а затем, когда станет равно нулю, кабина уже не сможет останавливаться в прежнем месте. Под максимально возможным вре-

менем торможения в системе понимается время, при котором кабина еще останавливается в заданном месте. Под максимально допустимым временем торможения понимается время, при котором еще не срабатывает аварийный датчик. **ЗАМЕЧАНИЕ:** максимальные времена торможения при движении вниз и вверх отличаются. Точность определения С1-02 в экспериментах:  $\pm 0,05$  с.

7. Установить максимальную скорость движения в 30 Гц, скорость установки уровня – в 4 Гц и определить опытным путем с точностью  $\pm 0,05$  с минимально возможное время торможения (С1-02). **ЗАМЕЧАНИЕ:** диапазон изменения параметра С1-02: 0,00–2,50 с. Для этого сначала следует ввести максимальное время торможения и запустить систему. Затем необходимо постепенно уменьшать значение С1-02 (провести серию экспериментов). Когда значение С1-02 достигнет критического значения, кабина не сможет остановиться и система перейдет в режим движения по инерции. При этом автоматический регулятор может перейти в режим Ошибки, и, чтобы ее сбросить, может потребоваться на некоторое время выключить частотный преобразователь. Под минимально возможным временем торможения понимается время, при котором кабина еще переходит на скорость позиционирования, а не останавливается по инерции.

8. Установить максимальную скорость движения в 50 Гц, скорость установки уровня – в 4 Гц, для времени торможения ввести среднее значение (между минимально и максимально возможными) и определить для каждого направления движения, используя *Тренд реального времени* в CX-Drive, такое время разгона (С1-01), при котором лифт разгоняется плавно и в то же время успевает достичь 50 Гц (для увеличения плавности следует увеличивать время разгона, однако если его сделать слишком медленным, кабина не успеет достичь 50 Гц). Для этого необходимо отметить параметр *Скорость двигателя*, снять галочку *Авто* и задать такое значение *Цены деления шкалы Y*, чтобы график скорости при построении занимал большую часть окна (диапазон 0–50 Гц). При построении графика из-за помех может кратковременно прерываться связь, в этом случае будут возникать области (провалы) с неизвестными значениями. Если помехи не позволяют определить, достигает ли скорость 50 Гц, эксперимент следует повторить.

9. Установить максимальную скорость движения в 50 Гц, скорость установки уровня – в 4 Гц и настроить оптимальные для лабораторной установки времена разгона и торможения, при которых лифт движется плавно, а перемещение с одного этажа на другой происходит быстро (время движения со скоростью позиционирования не более 1 с). Время торможения должно быть меньше максимально допустимого значения, определенного ранее (для того направления движения, при котором кабина проходит меньшее расстояние). Настроенные параметры должны быть оптимальными в независимости от направления движения (одни и те же значения при движении как вниз, так и вверх). Записать настроенные значения С1-01 и С1-02.

10. Проверить в CX-Drive, что частотный преобразователь находится в режиме связи. С помощью CX-Drive снять графики изменения скорости, вы-

ходного напряжения и выходного тока в различных режимах работы системы: режим нормальной работы (перемещение на один этаж) и режим аварийной остановки (во время движения с основной скоростью до срабатывания датчика перехода на скорость установки уровня поступает команда экстренной остановки). Для этого в CX-Drive отметить на вкладке *Настройка параметров* требуемые три параметра, с остальных галочки снять. Для каждого графика изменить цвет на более контрастный и подобрать такие величины масштаба (*Цены деления шкалы Y*), чтобы они занимали бóльшую часть окна. Для последующего оформления отчета записать значения цены деления для каждого параметра.

Снятие графиков (клавиша *PrtScr* на клавиатуре) производить в режиме их построения (кнопка  *Play* нажата), при этом должна быть видна таблица отображаемых параметров. *Цену деления шкалы X* по возможности установить минимальной (1 в идеале); ее следует увеличивать, только если график полностью не помещается в окне (изменять масштаб можно непосредственно в момент построения графиков). В процессе проведения экспериментов необходимо фиксировать (записать) *Цену деления шкалы X*. Выйти из режима построения графика, нажав в CX-Drive кнопку  *Stop*.

11. Настроить S-образных характеристики (группа параметров C2, см. подразд. 10.6.3). **ЗАМЕЧАНИЕ:** параметры S-профиля увеличивают общее время разгона и торможения. Следует **внимательно** следить, чтобы суммарное время торможения (с учетом C2-03, C2-04 и C2-05) не превысило максимально возможного времени торможения, определенного в ходе эксперимента. При настройке C2-01 и C2-02 следует уменьшать время разгона C1-01, определенное в предыдущем пункте, а при настройке C2-03, C2-04 и C2-05 – уменьшать время торможения C1-02). Настроенные параметры должны быть оптимальными в независимости от направления движения (одни и те же значения при движении как вниз, так и вверх). Записать значения C1-01, C1-02 и параметров C2.

12. Перевести кабину в верхнее положение. Выключить макет. Дождавшись полного отключения преобразователя частоты, отсоединить от инвертора кабель связи с компьютером и подключить цифровую панель управления. С помощью CX-Drive сохранить в формате pdf (распечатать в файл) конфигурационные параметры автоматического регулятора, отличающиеся от значений по умолчанию. Для этого следует щелкнуть дважды по *Редактору параметров* в окне проекта, нажать кнопку  *Показать только изменения* на инструментальной панели и выбрать пункт *Печать* в меню *Файл* (Ctrl-P).

## 11.6. Содержание отчета

1. Функциональная схема системы управления лифтом с указанием моделей элементов и устройств. Таблицы основных технических параметров элементов системы (подразд. 11.2), см. документацию.

2. Проведенные в соответствии с вариантом расчеты (с выбором основных функционально необходимых элементов системы). Таблица мощностей в различных режимах работы привода. Рабочий цикл электропривода.

3. Ход выполнения работы с указанием полученных результатов.
4. Графики изменения тока, напряжения и скорости асинхронного двигателя в различных режимах работы с указанием значений по осям. Их анализ, отличия от теоретических.
5. Динамические параметры, полученные в ходе выполнения работы.
6. Профили скорости без и с учетом S-образных характеристик (рис. 10.1 и 10.3) с указанием величины скорости на различных этапах и временных интервалов отдельных частей профиля.
7. Значения параметров автоматического регулятора, отличающиеся от значений по умолчанию (пункт 12 Методики выполнения работы). Описание этих параметров, их назначение и объяснение их значений.
8. Выводы.

### **11.7. Контрольные вопросы**

1. Основные виды движения, их параметры и формулы.
2. Формулы для определения вращающего момента и мощности.
3. Соответствие параметров поступательного и вращательного движения.
4. Приведение момента инерции и момента сопротивления нагрузки к валу двигателя. Потребность приведения. Учет условия сохранения мощности и условия сохранения кинетической энергии.
5. Современные подъемно-транспортные устройства. Многоквadrантный режим работы электроприводов грузоподъемных механизмов.
6. Способы построения приводов подъема. Преимущества и недостатки систем с противовесом и без. Расчет и выбор способа построения.
7. Рабочие циклы в системах без и с противовесом.
8. Скорость позиционирования: потребность, выбор. Масса противовеса.
9. Принципы работы позиционной системы. Необходимые датчики.
10. Расчет цикла движения. Выбор передаточного числа редуктора.
11. Расчет мощности электропривода в системах без и с противовесом.
12. Расчет внешнего момента инерции. Четыре квадранта.
13. Расчет статической мощности. Четыре квадранта.
14. Расчет динамического момента и мощности при разгоне в системах без и с противовесом. Четыре квадранта.
15. Расчет динамического момента и мощности при торможении в системах без и с противовесом. Четыре квадранта.
16. Формулы для расчета движения вверх при полной загрузке.
17. Формулы для расчета движения вверх при отсутствии груза.
18. Формулы для расчета движения вниз при полной загрузке.
19. Формулы для расчета движения вниз при отсутствии груза.
20. Выбор исполнительного электродвигателя. Выбор редуктора.
21. Расчет и выбор тормозного сопротивления. Его назначение.
22. Основные настроечные параметры преобразователя частоты L7.

23. Основные настроечные параметры автоматического регулятора скорости вращения L7, применяемые специально для лифтовых систем.
24. S-образные характеристики электропривода. Принципы их настройки.
25. Функционально необходимые элементы системы управления подъемным устройством. Элементы и устройства лабораторного макета.
26. Как при расчетах происходит учет направления действия КПД?
27. Каким образом работает система управления давлением в кабине лифта высотного здания? Нарисуйте графики изменения давления снаружи и внутри кабины при перемещении с одного этажа на другой.

### **11.8. Литература к лабораторной работе**

1. Varispeed L7. Автоматический регулятор скорости вращения (для лифтов). Руководство пользователя.
2. Varispeed L7. Инструкция по быстрому запуску L7Z.
3. Денисенко, Г. Ф. Охрана труда: учеб. пособие для инж.-экон. спец. вузов / Г. Ф. Денисенко – М.: Высш. шк., 1985 – 319 с.
4. Фираго, Б. И. Теория электропривода: учеб. пособие / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. – Минск.: ЗАО «Техноперспектива», 2004. – 527 с.
5. Волков, Н. И. Электромашинные устройства автоматики: учеб. пособие для студентов специальности «Автоматика и телемеханика» / Н. И. Волков, В. П. Миловзоров – М.: Высш. шк., 1978. – 336 с.
6. Масандилов, Л. Б. Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей. 2-е изд., перераб. и доп. / Л. Б. Масандилов, В. В. Москаленко. – М.: Энергия, 1978. – 96 с.
7. Терехов, В. М. Системы управления электроприводов: Учебник для студ. высш. учеб. заведений. / В. М. Терехов, О. И. Осипов. – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 304 с.
8. Фираго, Б. И. Регулируемые электроприводы переменного тока: / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. – Минск: «Техноперспектива», 2006. – 363 с.
9. Народицкий, А. Г. Современное и перспективное алгоритмическое обеспечение частотно-регулируемых электроприводов / А. Г. Народицкий. – С-Пб: ООО НПО «Санкт-Петербургская электротехническая компания», 2004.
10. Бродский, М. Г. Безопасная эксплуатация лифтов / М. Г. Бродский, И. М. Вишневецкий, Ю. В. Грейман. – М.: Недра, 1975, – 124 с.

*Учебное издание*

**Марков Александр Владимирович**  
**Шмарловский Анатолий Сергеевич**

## **ЭЛЕМЕНТЫ И УСТРОЙСТВА СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ**

Практикум  
для студентов специальности 1-53 01 07 «Информационные технологии и  
управление в технических системах»

В 2-х частях

Часть 1

Редактор Г. С. Корбут  
Корректор  
Компьютерная верстка

---

Подписано в печать 2010.  
Гарнитура «Таймс».  
Уч.-изд. л. 6. 0

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

Бумага офсетная.  
Усл. печ. л. .  
Заказ 528.

---

Издатель и полиграфическое исполнение: Учреждение образования  
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»  
ЛИ №02330/0494371 от 16.03.2009. ЛП №02330/0131666 от 03.04.2009.  
220013, Минск, П.Бровки, 6