

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ

Харьковская национальная академия городского хозяйства

В.П. Андрейченко,

В.Н. Фатеев

КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ

по дисциплине

**«ЭЛЕМЕНТЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО
ЭЛЕКТРОПРИВОДА»**

*(для студентов 3, 4 курсов всех форм обучения направления подготовки
6.050702 (0922) «Электромеханика» по специальности
«Электромеханические системы автоматизации и электропривод»)*

Харьков ХНАГХ 2009

Конспект лекций по дисциплине «Элементы автоматизированного электропривода» (для студентов 3,4 курсов всех форм обучения направления подготовки 6.050702 (0922) «Электромеханика» по специальности – «Электромеханические системы автоматизации и электропривод») / Авт: В.П. Андрейченко, В.Н. Фатеев; Харьк. нац. акад. город. хоз-ва. – Х.: ХНАГХ, 2009. – 84 с.

Авторы: В.П. Андрейченко, В.Н. Фатеев

Рецензент: доц., к.т.н. Н.И. Шпика

Рекомендовано кафедрой электрического транспорта,
протокол № 2 от 09.09.2008 г.

СОДЕРЖАНИЕ

Содержательный модуль 1.1. Математические операторы преобразования элементов автоматизированного электропривода	4
Лекция 1.	
1.1. Функциональные схемы, математические уравнения и передаточные функции механической части электропривода	4
Лекция 2.	
1.2. Схемы включения, математические уравнения и передаточные функции электрических двигателей	21
Лекция 3.	
1.3. Схемы включения, математические уравнения и передаточные функции преобразователей постоянного и переменного тока, управляющих и функциональных элементов	35
Содержательный модуль 1.2. Электрические расчеты и анализ типовых узлов автоматического управления пуском и торможением двигателей	52
Лекция 4.	
2.1. Принципы автоматического управления пуском и торможением двигателей.....	52
Лекция 5.	
2.2. Типовые узлы схем автоматического управления пуском ДПТ...	57
Лекция 6.	
2.3. Типовые узлы схем автоматического управления торможением ДПТ	63
Лекция 7.	
2.4. Типовые узлы схем автоматического управления пуском и торможением двигателей переменного тока	69
Содержательный модуль 1.3. Электрические расчеты и анализ типовых узлов защиты систем автоматизированного электропривода	78
Лекция 8.	
3.1. Узлы электрической защиты двигателей и схем управления	78

Содержательный модуль 1.1. Математические операторы преобразования элементов автоматизированного электропривода

Лекция 1

1.1. Функциональные схемы, математические уравнения и передаточные функции механической части электропривода

С давних времён человек стремился заменить тяжёлый физический труд, являвшийся источником механической энергии (МЭ), работой механизмов и машин. Для этого на транспорте и на сельскохозяйственных работах, на мельницах и оросительных системах он использовал мускульную силу животных, энергию ветра и падающей воды, а позже – химическую энергию топлива. Так появился привод – устройство, состоящее из трёх существенно различных по функциональному назначению частей: двигателя (Д), механического передаточного устройства (МПУ) и технологической машины (ТМ).

Назначение двигателя - преобразование энергии различных видов в механическую энергию. Механическое передаточное устройство предназначено для передачи механической энергии от двигателя к рабочему органу технологической машины. Оно не влияет на количество передаваемой МЭ (без учёта потерь) и служит для согласования видов движения двигателя и рабочего органа ТМ. Оно выполняется в виде ременной, цепной, зубчатой или других механических передач.

В технологической машине МЭ используется рабочим органом для изменения свойств, состояния, формы или положения обрабатываемого материала или изделия.

В современных приводах в качестве источника механической энергии используются различные электрические двигатели (ЭД), которые преобразуют электрическую энергию (ЭЭ) в механическую. Поэтому привод получил название электропривода (ЭП). Его структурная схема приведена на рис. 1.1. В её состав кроме названных элементов входит управляемый преобразователь (П), с помощью которого электрическая энергия от сети подаётся к электрическому двигателю.

Изменяя сигнал управления преобразователем U_y , можно изменять количество электрической энергии, поступающей от сети к двигателю. В результате этого будет изменяться количество механической энергии, вырабатываемой двигателем и получаемой технологической машиной. Это, в свою очередь, приведёт к изменению технологического процесса, что проявляется в изменении регулируемой величины $y(t)$.

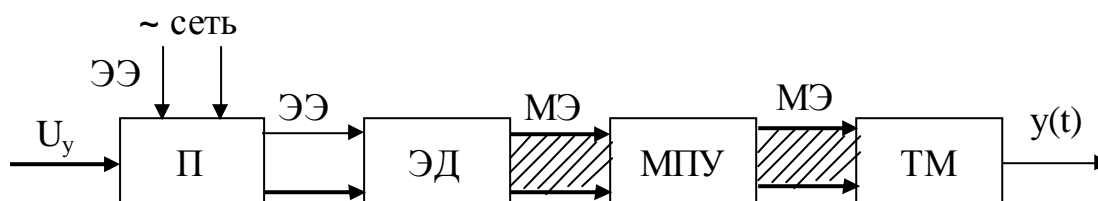


Рис. 1.1- Структурная схема электропривода

Приоритет в создании электропривода принадлежит русским учёным Б.С. Якоби и Э.Х. Ленцу, которые в 1834 году изобрели двигатель постоянного тока, а в 1838 году применили его для приведения в движение катера. Однако несовершенство двигателя и неэкономичность источника электрической энергии (гальванической батареи) не позволили этому электроприводу найти практическое применение.

В середине XIX века попытки применения ЭП с двигателем постоянного тока для типографских и ткацких машин предпринимались учёными Франции и Италии. Однако система постоянного тока не давала удовлетворительного решения. К 1890 году только 5 % общей мощности двигателей приводов составляли электрические двигатели.

Широкое применение электропривода связано с изобретением в 1889-1891 годах русским инженером Доливо–Добровольским системы трёхфазного переменного тока и трёхфазного асинхронного двигателя. Простота трёхфазной системы, возможность централизованного производства электроэнергии, удобство её распределения привели к тому, что к 1927 году уже 75 % общей мощности двигателей приводов составляли электрические двигатели.

В настоящее время в ведущих отраслях промышленности отношение установленной мощности электроприводов к общей установленной мощности приводов с двигателями всех видов (тепловых, гидравлических, пневматических) приближается к 100 %. Это определяется тем, что ЭД изготавливаются на разнообразные мощности (от сотых долей ватта до десятков тысяч киловатт) и скорости вращения (от долей оборота вала в минуту до нескольких сотен тысяч оборотов в минуту); ЭП работает в среде агрессивных жидкостей и газов при низких и высоких температурах; благодаря управляемости преобразователя, ЭП легко регулирует ход технологического процесса, обеспечивая различные параметры движения рабочих органов ТМ; он обладает высоким к.п.д., надёжен в эксплуатации и не загрязняет окружающую среду.

Отличительной особенностью современного электропривода является то, что в нём сигнал управления преобразователем U_y формируется специальным автоматическим управляющим устройством (АУУ) без непосредственного участия человека. Такое управление называют автоматическим, а электропривод – автоматизированным (АЭП).

Автоматическое управляющее устройство можно рассматривать как элемент системы АЭП, воспринимающий и перерабатывающий информацию.

В первом канале используется информация о требуемом значении регулируемой величины $q(t)$ (задающее воздействие).

Во втором канале с помощью датчиков определяется информация о действительном значении регулируемой величины $y(t)$ или других величинах, характеризующих функционирование ЭП.

Третий канал подает в АУУ информацию о возмущающих воздействиях $f_i(t)$ в виде сигналов $x_i(t)$.

В зависимости от количества используемых каналов информации различают три принципа построения систем управления автоматизированным электроприводом:

- 1) принцип разомкнутого управления;
- 2) принцип замкнутого управления;
- 3) принцип комбинированного управления.

Систему управления АЭП, построенную по принципу разомкнутого управления, называют разомкнутой системой. В ней используется только один канал информации – о требуемом значении регулируемой величины $q(t)$. Структурная схема такой системы управления приведена на рис.1.2.

Автоматическое управляющее устройство формирует сигнал управления преобразователем U_y , используя информацию только о величине задающего воздействия $q(t)$, которое на вход АУУ подаётся от командного органа (КО). В результате того, что на каждый элемент структурной схемы оказывают влияние возмущающие воздействия $f_i(t)$, количество поступающей к технологической машине механической энергии, а значит и ход технологической операции будут изменяться. В результате этого действительное значение регулируемой величины $y(t)$ может существенно отличаться от требуемого значения $q(t)$. Разность между требуемым и действительным значением регулируемой величины в установившемся режиме, когда регулируемая величина $y(t)$ не изменяется во времени, называют ошибкой управления $\Delta x(t) = q(t) - y(t)$.

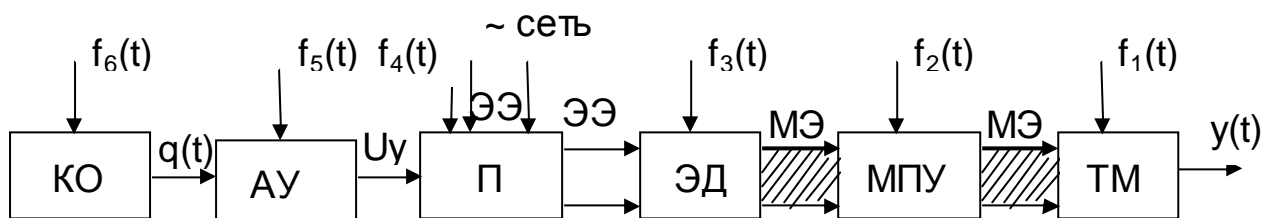


Рис. 1.2 - Структурная схема разомкнутой системы управления АЭП

Разомкнутые системы АЭП применяются в том случае, когда появление ошибки управления не приводит к существенным потерям в технологии (уменьшению производительности ТМ, снижению качества продукции и др.)

В противном случае, когда появление ошибки управления значительно снижает эффективность технологического процесса, для построения системы управления АЭП используют принцип замкнутого управления. Называют такую систему замкнутой.

В ней используются два канала информации: к информации о требуемом значении регулируемой величины $q(t)$ добавляется информация о

действительном значении регулируемой величины $y(t)$. Структурная схема такой системы управления приведена на рис.1.3.

В узел суммирования на входе АУУ от КО подаётся со знаком «+».

Информация о действительном значении регулируемой величины $y(t)$ подаётся в узел суммирования с помощью главной обратной связи (ГОС). Говорят, что ГОС «замыкает» систему управления, соединяя её выход с входом.

Сигнал ГОС поступает в узел суммирования со знаком «-» и поэтому ГОС называется отрицательной обратной связью.

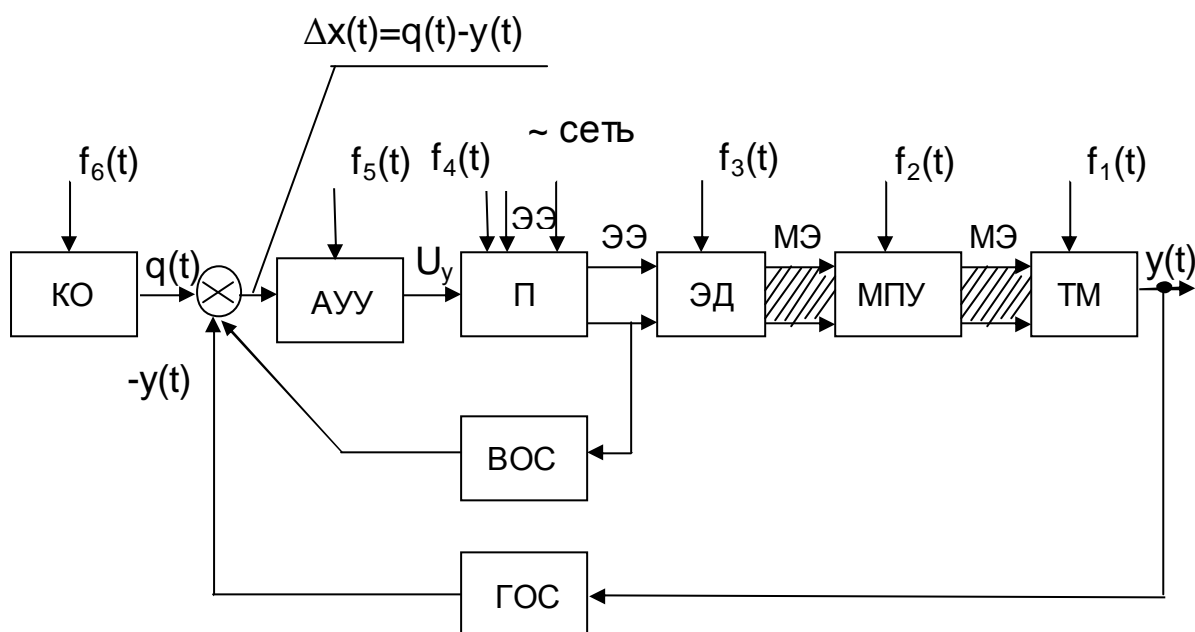


Рис. 1.3 - Структурная схема замкнутой системы управления АЭП

В узле суммирования в результате алгебраического (с учётом знака) сложения сигналов $q(t)$ и $y(t)$ осуществляется определение величины и знака ошибки управления $\Delta x(t) = +q(t) - y(t)$. Сигнал ошибки поступает на вход АУУ. Благодаря этому АУУ, формируя сигнал управления преобразователем П на основании информации о реально существующем соотношении заданного и действительного значения регулируемой величины, обеспечивает подачу к ЭД такого количества ЭЭ, а к технологической машине МЭ, что ошибка управления может быть уменьшена до допустимой величины или сведена к нулю.

Кроме ГОС в системе управления могут быть различные внутренние по отношению к ГОС обратные связи (ВОС). Они контролируют промежуточные параметры системы, что улучшает качество процесса управления. Систему,

содержащую только ГОС, называют одноконтурной, а имеющую кроме ГОС ещё и ВОС – многоконтурной.

В системе, построенной по комбинированному принципу, объединены две структуры – замкнутая и разомкнутая. К замкнутой системе, которая является основной, добавляется разомкнутая структура по третьему каналу информации $x_1(t)$ об основном возмущающем воздействии $f_1(t)$. Структурная схема системы приведена на рисунке 1.4.

Основным является возмущающее воздействие, которое имеет наибольшую составляющую в величине ошибки управления. На рис. 1.4 за основное принято возмущающее воздействие $f_1(t)$. Оно контролируется промежуточным элементом (ПЭ) и информация о нём $x_1(t)$ подаётся в узел суммирования. Благодаря этому АУУ вводит в сигнал управления преобразователем составляющую, которая компенсирует влияние $f_1(t)$ на технологический процесс и уменьшает величину ошибки управления. Влияние других возмущающих воздействий на ошибку ликвидирует основная замкнутая система.

Рассмотренные примеры позволяют дать определение понятию «автоматизированный электропривод».

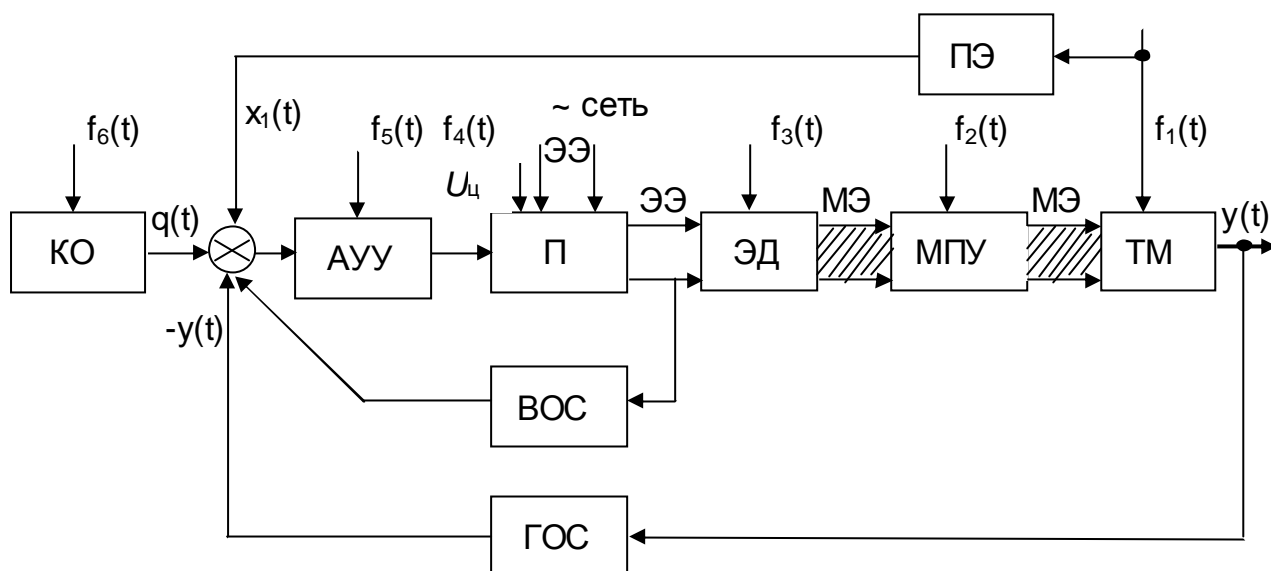


Рис. 1.4- Структурная схема комбинированной системы управления АЭП

Автоматизированный электропривод представляет собой электромеханическую систему, в которой, во-первых, осуществляется

преобразование электрической энергии в механическую. Посредством этой энергии приводятся в движение рабочие органы технологической машины. И, во-вторых, происходит управление процессом преобразования энергии с целью обеспечения требуемых установившихся и переходных режимов работы ТМ.

Механическая энергия от вала двигателя к рабочему органу передается с помощью механического передаточного устройства, которое в общем случае включает в себя различные механические элементы – шестерни, канаты, валы, муфты сцепления, шкивы и т.д. Эти элементы вращаются или движутся поступательно с разной скоростью, имеют определенную жесткость и момент инерции (массу), а соединения между ними в общем случае содержат зазоры. Наличие этих свойств элементов МПУ вносит определенные искажения в процесс передачи движения от двигателя к исполнительному органу и требует соответствующего учета. Анализ механического движения осуществляется с помощью расчетных схем электропривода, получаемых по определенным правилам.

Механическое движение элементов электропривода описывается с помощью законов электромеханики. Из курса физики известно, что движение материального тела определяется вторым законом Ньютона, причем уравнение этого движения имеет вид:

для твердого тела, вращающегося вокруг неподвижной оси,

$$\sum \vec{M} = J \frac{d\vec{\omega}}{dt}$$

и для поступательно движущегося тела

$$\sum \vec{F} = m \frac{d\vec{v}}{dt},$$

где $\sum \vec{M}$ и $\sum \vec{F}$ - векторные суммы моментов или сил, действующих на тело; J и m – момент инерции и масса тела; $d\vec{\omega}/dt = \vec{\epsilon}$ - угловое ускорение вращающегося тела; $d\vec{v}/dt = \vec{a}$ - ускорение поступательно движущегося тела.

Эти уравнения позволяют однозначно определить характер механического движения электропривода. Если $\sum \vec{M} \neq 0$ или $\sum \vec{F} \neq 0$, то электропривод совершает движение с ускорением. В другом случае, когда

$\sum \vec{M} = 0$ или $\sum \vec{F} = 0$, электропривод движется с установившейся скоростью или находится в состоянии покоя.

Поскольку при движении тела вокруг неподвижной оси или при поступательном движении тела вдоль прямолинейной оси все векторные величины направлены вдоль одной оси, то вместо них можно использовать скалярные величины. Поэтому в дальнейшем не используется запись уравнений в векторном виде.

Элементы механической части привода механически связаны друг с другом и образуют единую кинематическую цепь от двигателя к исполнительному органу. Каждый элемент имеет свою скорость движения и характеризуется моментом инерции или массой, а также совокупностью действующих на него моментов и сил. Учет взаимодействия этого элемента с остальной частью кинематической цепи удобно осуществлять путем приведения моментов и усилий, а также моментов инерции и масс. В результате выполнения этой операции приведения реальная кинематическая схема заменяется расчетной энергетически эквивалентной схемой, основу которой составляет тот элемент, движение которого рассматривается.

Приведение указанных величин может быть осуществлено к любому элементу механической части электропривода, но, как правило, этим элементом является вал электродвигателя. Это позволяет наиболее полно исследовать характер движения привода и режим его работы, точнее формировать законы движения. Зная параметры кинематической схемы, можно определить и вид движения исполнительного органа. В некоторых более редких случаях поступают наоборот, осуществляя приведение всех величин к исполнительному органу.

Для выявления существа операции приведения обратимся к рис. 1.5а, на котором показана кинематическая схема электропривода подъемной лебедки. Двигатель ЭД через соединительную муфту М1, редуктор Р и муфту М2 приводит во вращение барабан Б, на котором навит канат К. К концу каната прикреплен крюк лебедки К_р (исполнительный орган механизма), к которому подвешивается груз массой m . Нагрузка электропривода определяется действием силы тяжести, а также трением движущихся частей. Этот вид

нагрузки привода, называемый обычно потерями на трение, учитывается коэффициентами полезного действия (КПД) редуктора η_p и барабана η_b .

После приведения моментов инерции, масс и сил в схеме рис. 1.5а к валу двигателя получаем эквивалентную расчетную схему рис. 1.5б, в которой подлежат определению приведенные значения момента нагрузки (сопротивления) M_c и момента инерции J . Момент M_c в теории электропривода также называют статическим моментом.

Приведение момента нагрузки осуществляют исходя из равенства механической мощности нагрузки двигателя в реальной (рис. 1.5а) и эквивалентной (рис. 1.5б) схемах. Приведение момента нагрузки выполняют двумя способами в зависимости от направлений потока энергии в механической части. Если производится подъем груза, то двигатель совершает полезную работу по подъему грузу и покрывает потери мощности на трение в кинематической цепи. Энергия направляется от двигателя к исполнительному органу и баланс мощности в этом случае имеет вид

$$M_c \omega = F_{u,o} v_{u,o} / (\eta_p \eta_b),$$

откуда

$$M_c = F_{u,o} v_{u,o} / (\eta_p \eta_b \omega) = F_{u,o} \rho / (\eta_p \eta_b),$$

где M_c – приведенный к валу двигателя момент нагрузки (сопротивления); ω – угловая скорость ротора двигателя; $F_{u,o}$ – сила тяжести; $v_{u,o}$ – скорость подъема груза; $\rho = v_{u,o} / \omega$ – радиус приведения кинематической цепи между двигателем и исполнительным органом.

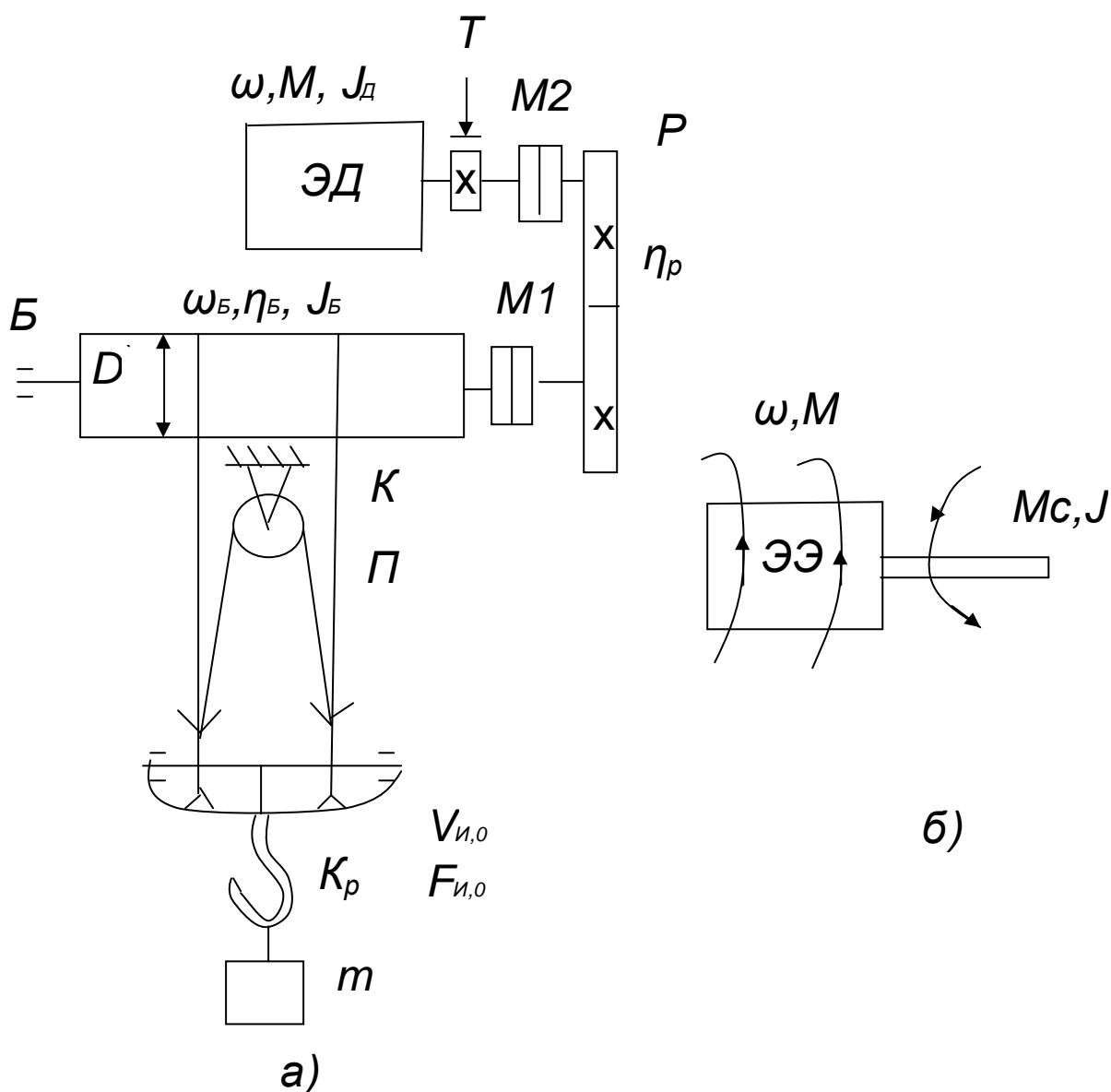


Рис. 1.5-Схема механической части электропривода:
 а – реальная; б – приведенная расчетная

При опускании груза теряемая им потенциальная энергия передается к двигателю. Поэтому потери на трение в кинематической цепи покрываются уже за счет этой энергии и баланс мощностей имеет вид:

$$M_c \omega = F_{и,о} v_{и,о} \eta_p \eta_b,$$

откуда

$$M_c = F_{и,о} \eta_p \eta_b v_{и,о} / \omega = F_{и,о} \eta_p \eta_b \rho.$$

По аналогии с рассматриваемым случаем, если исполнительный орган совершает вращательное движение со скоростью $\omega_{и,о}$ и создает при этом

момент нагрузки $M_{u,o}$, приведенный к валу двигателя момент нагрузки M_c определится по одной из формул

$$M_c = M_{u,o} \omega_{u,o} / (\eta \omega) = M_{u,o} / (\eta i);$$

$$M_c = M_{u,o} \eta \omega_{u,o} / \omega = M_{u,o} \eta / i,$$

где $i = \omega / \omega_{u,o}$ - передаточное число кинематической цепи между валом двигателя и исполнительным органом; η – КПД этой цепи.

Первая формула справедлива при направлении потока энергии от двигателя к исполнительному органу, вторая – при обратном направлении.

Приведение моментов инерции и масс элементов осуществляют исходя из равенства запаса кинематической энергии в реальной и эквивалентной расчетной схемах

$$J \omega^2 / 2 = J_d \omega^2 / 2 + J_6 \omega_6^2 / 2 + m v_{u,o}^2 / 2,$$

откуда находим

$$J = J_d + J_6 \frac{\omega_6^2}{\omega^2} + m \frac{v_{u,o}^2}{\omega^2} = I_d + J_6 / i^2 + m \rho^2,$$

где J – приведенный к валу двигателя момент инерции элементов кинематической схемы; J_d – момент инерции двигателя, муфты М1 и шестерни z_1 ; J_6 – момент инерции шестерни z_2 , муфты М2 и барабана Б.

Обобщая полученный результат, заключаем, что для приведения момента инерции вращающегося элемента к валу двигателя следует разделить момент инерции на квадрат передаточного числа участка кинематической цепи между двигателем и этим элементом, а для приведения массы поступательно движущегося элемента следует умножить массу на квадрат радиуса приведения участка кинематической цепи между двигателем и этим элементом.

В результате выполнения приведения по указанным правилам расчетная схема имеет вид рис. 1.5б. Отметим, что расчетная схема рис. 1.5б в теории электропривода получила название одномассовой механической системы. Она соответствует механической части привода с абсолютно жесткими элементами и без зазоров.

Уравнение, описывающее движения одномассовой механической системы, называют уравнением движения электропривода.

В общей форме записи оно имеет вид:

$$\pm M \pm M_c = J \frac{d\omega}{dt}.$$

В левой части уравнения движения знак «+» ставится в том случае, когда направление M или M_c совпадает с направлением скорости вращения ω , а знак «-», когда они направлены встречно.

Знак «+» перед M соответствует двигательному режиму работы электрической машины: двигатель преобразовывает ЭЭ в МЭ, развивает вращающий момент M и вращает одномассовую систему в направлении вращающего момента.

Знак «-» перед M соответствует режиму электрического торможения. Для перевода в этот режим работающего электропривода схема его включения или её параметры изменяются таким образом, что изменяется на противоположное направление вращающего момента M . А поскольку под действием инерционных сил направление вращения сохраняется, вращающий момент двигателя начинает тормозить движение одномассовой системы. Электрическая машина из двигательного переходит в генераторный режим работы. Она забирает запасённую в механической части привода МЭ, снижая тем самым скорость вращения механической части, преобразовывает её в ЭЭ и либо возвращает ЭЭ в сеть, либо она расходуется на нагрев двигателя.

Знак «+» перед M_c говорит о том, что M_c способствует вращению.

Знак «-» говорит о том, что препятствует.

Все моменты сопротивления можно разделить на две категории: 1- реактивные M_c ; 2 – активные или потенциальные M_c .

В первую категорию входят моменты сопротивления, появление которых связано с необходимостью преодолевать силу трения. Они всегда препятствуют движению электропривода и изменяют свой знак при изменении направления вращения.

Во вторую категорию входят моменты создаваемые силой тяжести, а также силами растяжения, сжатия или скручивания упругих тел. Они связаны с изменением потенциальной энергии отдельных элементов кинематической схемы. Поэтому они могут как препятствовать, так и способствовать движению, не изменяя своего знака при изменении направления вращения.

Правая часть уравнения движения носит название динамического момента M_δ и проявляется только во время переходных режимов. При $M_\delta > 0$ и $\frac{d\omega}{dt} > 0$, т.е. имеет место ускорение механической части привода. При $M_\delta < 0$ и $\frac{d\omega}{dt} < 0$ - имеет место замедление. При $M = M_c$, $M_\delta = 0$ и $\frac{d\omega}{dt} = 0$, т.е. в данном случае привод работает в установившемся режиме и механическая часть вращается с постоянной скоростью.

На примере электропривода подъёмной лебёдки можно рассмотреть все четыре формы записи уравнения движения электропривода.

В первом случае электропривод включён в направлении подъёма груза. Двигатель работает в двигательном режиме. Груз, подвешенный на крюке, создаёт активный момент сопротивления, препятствующий вращению. Тогда уравнение движения будет иметь вид: $+M - M_c = J \frac{d\omega}{dt}$.

Во втором случае в конце подъёма груза двигатель переводится в режим электрического торможения и его момент, как и момент сопротивления, будет препятствовать вращению. Уравнение движения в этом случае имеет вид:

$$-M - M_c = J \frac{d\omega}{dt}.$$

В третьем случае электропривод включён в направлении опускания груза, т.е. двигатель работает в двигательном режиме. Поскольку момент сопротивления, создаваемый поднятым грузом, является активным, то при опускании груза он будет не препятствовать, а способствовать вращению.

Уравнение движения имеет вид: $+M + M_c = J \frac{d\omega}{dt}$.

В четвертом случае в конце опускания груза двигатель опять переводится в режим электрического торможения, а момент сопротивления продолжает вращать двигатель в направлении спуска. В этом случае уравнение движения имеет вид: $-M + M_c = J \frac{d\omega}{dt}$.

Для указанных на рис. 1.5б направлений моментов двигателя и нагрузки, которые относятся к самому распространенному двигательному режиму работы электропривода, когда движение осуществляется под действием вращающего момента двигателя, а момент нагрузки противодействует движению, уравнение движения одномассовой механической системы записывается как

$$M - M_c = J \frac{d\omega}{dt}.$$

Записанное в общем виде и преобразованное по Лапласу, уравнение движения будет иметь вид:

$$Jp\omega(p) = M(p) - M_c(p).$$

Передаточная функция одномассовой системы

$$W(p) = \frac{\omega(p)}{M(p)} = \frac{1}{Jp}.$$

Структурная схема одномассовой системы приведена на рис. 1.6

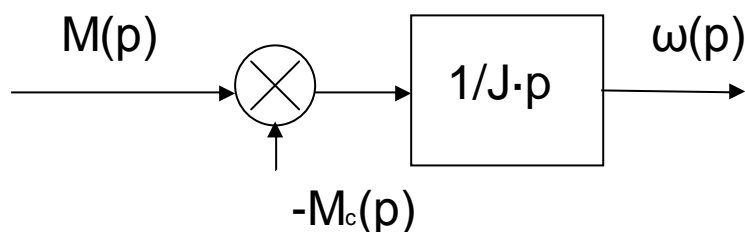


Рис. 1.6 - Структурная схема одномассовой механической системы

Как следует из структурной схемы, вращающий момент двигателя представляет собой управляющее воздействие, а момент сопротивления – возмущающее воздействие.

Механическая часть электропривода в общем случае содержит элементы конечной жесткости. На кинематической схеме подъемной лебедки рис. 1.5а, в качестве таких элементов можно назвать канат К и валы, соединяющие двигатель с редуктором и редуктор с барабаном.

При наличии упругих элементов в результате выполнения операции приведения в ряде случаев не удастся получить одномассовую расчетную схему рис. 1.5б, и в зависимости от числа упругих элементов получаются многомассовые механические системы – двухмассовая, трехмассовая и т.д.

При рассмотрении движения таких систем вводится понятие коэффициента жесткости c упругого элемента. Он представляет собой коэффициент пропорциональности между линейной ΔL или угловой $\Delta\varphi$ деформациями и возникающими в упругом элементе силой F_y или моментом M_y

$$F_y = c_1 \Delta L;$$

$$M_y = c_2 \Delta\varphi.$$

Коэффициент жесткости c_1 и c_2 определяются геометрическими размерами упругого элемента и зависят от материала, из которого он изготовлен. Для упругого стержня при его растяжении или сжатии коэффициент жесткости, Н/м, определяется как

$$c_1 = SE/L,$$

где L – длина стержня, м; S – площадь поперечного сечения, м²; E – модуль упругости, Па.

Для вала радиусом R при его кручении коэффициент жесткости, Н·м,

$$c_2 = J_s G/L,$$

где $J_s = \pi R^4/2$ – момент инерции поперечного сечения вала, м⁴; G – модуль упругости кручения, Па; L – длина вала, м.

Чем больше коэффициент жесткости упругого элемента, тем меньшая деформация в нем возникает. Величина, обратная коэффициенту жесткости, носит название податливости.

При составлении расчетных схем механической части осуществляется приведение к валу двигателя коэффициента жесткости упругого элемента по следующим формулам, которые здесь даются без вывода:

для упругого вала при кручении

$$c = c_2 / i^2;$$

для упругого поступательно движущегося элемента при растяжении и сжатии

$$c = c_1 \rho^2,$$

где i , ρ – соответственно передаточное число и радиус приведения кинематической схемы между валом двигателя и упругим элементом.

Двухмассовая расчетная механическая система получается, если учитывается один упругий элемент в реальной кинематической схеме.

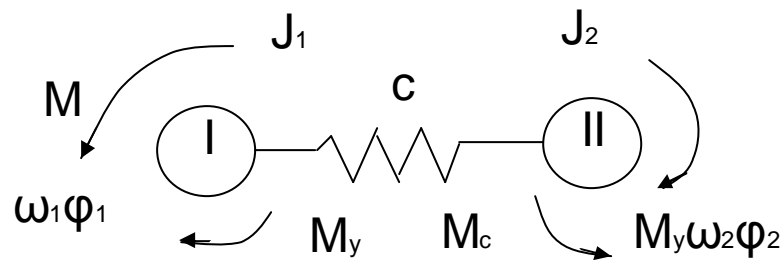


Рис. 1.7 - Расчетная схема двухмассовой системы

Эта система изображена на рис. 1.7. Обычно первую массу *I* образуют масса ротора двигателя и элементов между двигателем и упругим элементом, а вторую массу *II* – исполнительный орган и элементы между ним и упругим элементом. Обе инерционные массы связаны упругим элементом *c* коэффициентом жесткости *c*, и в общем случае их скорости ω_1 и ω_2 , а также углы поворота (положения) ϕ_1 и ϕ_2 соответственно не равны между собой.

Движение двухмассовой системы описывается следующей системой уравнений:

$$M - M_y = J_1 \frac{d\omega_1}{dt} = J_1 \frac{d^2\phi_1}{dt^2};$$

$$M_y - M_c = J_2 \frac{d\omega_2}{dt} = J_2 \frac{d^2\phi_2}{dt^2};$$

$$M_y = c(\phi_1 - \phi_2).$$

Записанная в общем виде и преобразованная по Лапласу она будет иметь вид:

$$J_1 p \omega_1(p) = J_1 p^2 \phi_1(p) = M(p) - M_y(p)$$

$$J_2 p \omega_2(p) = J_2 p^2 \phi_2(p) = M_y(p) - M_c(p)$$

$$M_y(p) = c[\phi_1(p) - \phi_2(p)].$$

Передаточная функция двухмассовой механической системы

$$W(p) = \frac{\omega_2(p)}{M(p)} = \frac{c}{p[J_1 \cdot J_2 \cdot p^2 + c(J_1 + J_2)]}$$

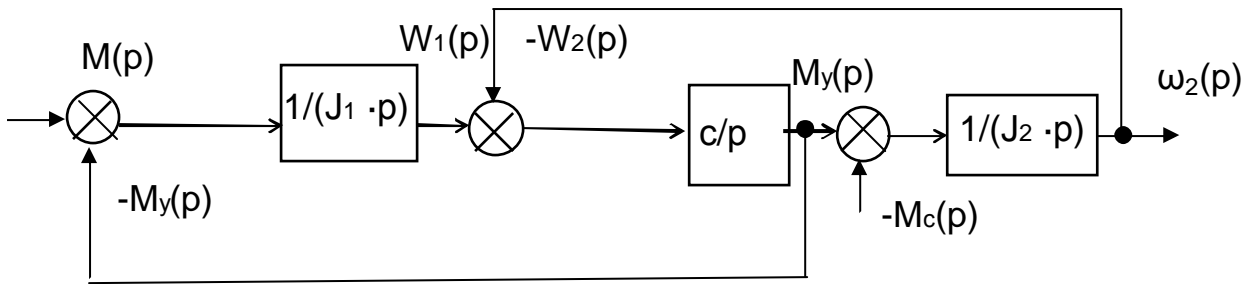


Рис. 1.8 - Структурная схема двухмассовой системы

Движение двухмассовой механической системы оказывается более сложным. Как правило, оно имеет колебательный характер, который определяется процессом обмена энергии между массами через упругий элемент. При этом может возникнуть явление механического резонанса, связанное с резким возрастанием амплитуды движения масс системы.

Лекция 2.

1.2. Схемы включения, математические уравнения и передаточные функции электрических двигателей

Двигатели постоянного тока. Выпускаемые серийно двигатели постоянного тока имеют независимое, последовательное и смешанное возбуждение. Двигатели независимого возбуждения выпускаются с электромагнитной полюсной системой и постоянными магнитами на полюсах. Двигатели последовательного и смешанного возбуждения имеют электромагнитную полюсную систему. Основными сериями двигателей общепромышленного применения являются в настоящее время единые серии П и 2П и их модификации.

Специализированные серии двигателей постоянного тока предназначены для работы в станочных, тяговых, краново-металлургических, судовых, текстильных и других устройствах.

По габаритам двигатели серии П делятся на три группы: 1-11-й габариты мощностью 0,3-200 кВт; 12-17-й – 200-1400 кВт; 18-26-й – свыше 1400 кВт.

Ряд номинальных напряжений питания двигателей постоянного тока общего назначения – 110, 220, 440 В.

Двигатели постоянного тока независимого возбуждения (ДПТ НВ).

Схема включения двигателя постоянного тока независимого возбуждения приведена на рис. 1.9. Здесь L1M – обмотка независимого возбуждения, L2M – обмотка дополнительных полюсов, L3M – компенсационная обмотка двигателя М. Схема рис. 1.9 обеспечивает независимость тока возбуждения от тока якоря вследствие наличия независимого источника питания UZ. Магнитное состояние машины зависит от тока возбуждения и устанавливается по кривой намагничивания.

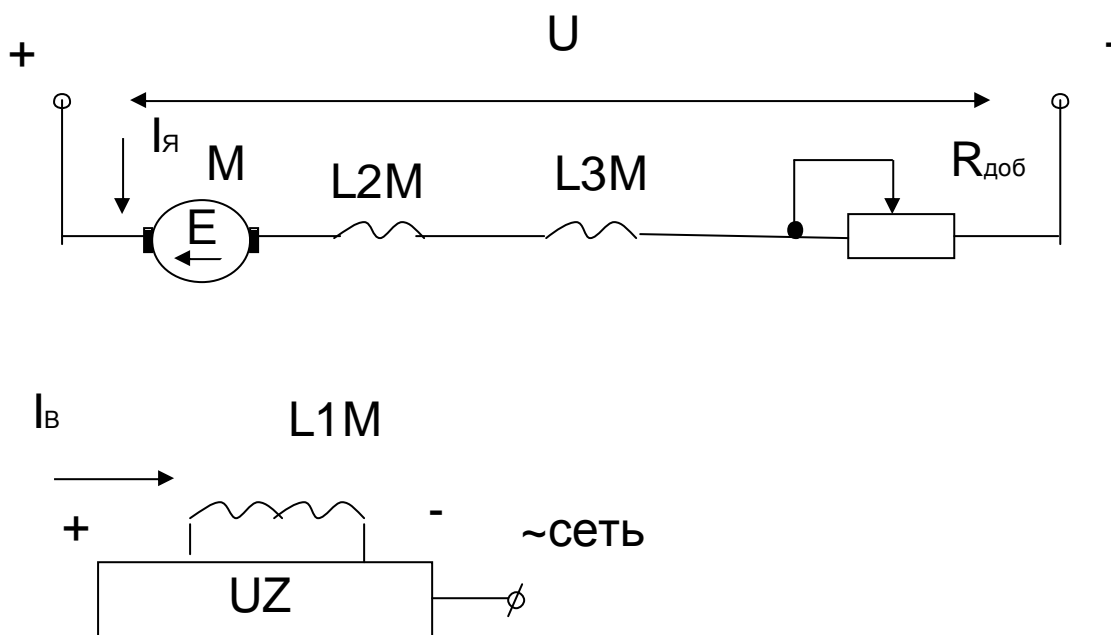


Рис. 1.9 - Схема включения ДПТ НВ

Переходный процесс в ДПТ НВ можно условно разделить на два: электромагнитный переходный процесс в электрической части двигателя и электромеханический – в механической части.

Электромагнитный переходный процесс в якорной цепи описывается уравнением электрического равновесия. В соответствии со вторым законом Кирхгофа и обозначениями на рис. 1.9 имеем:

$$U = I_{я} R_{яц} + L_{яц} \frac{dI_{я}}{dt} + E,$$

где $R_{яц} = R_{я} + R_{ДП} + R_{КО} + R_{ДОБ}$ - полное активное сопротивление якорной цепи, состоящее из сопротивления обмотки якоря $R_{я}$, обмотки дополнительных полюсов $R_{ДП}$, компенсационной обмотки $R_{КО}$ и добавочного пускового сопротивления $R_{ДОБ}$; $L_{яц} = L_{я} + L_{ДП} + L_{КО}$ - полная индуктивность якорной цепи, состоящая из индуктивности обмотки якоря $L_{я}$, обмотки дополнительных полюсов $L_{ДП}$ и компенсационной обмотки $L_{КО}$; $E = k \cdot \Phi_n \cdot \omega$ - э.д.с. вращения, которая наводится в обмотке якоря двигателя; $k = p \cdot N / 2\pi a$ - конструктивный коэффициент двигателя; p, N, a - соответственно число пар полюсов двигателя, активных проводников и параллельных ветвей обмотки якоря; Φ_n - номинальный магнитный поток двигателя; ω - угловая скорость двигателя.

При расчетах электромеханических свойств двигателя значения κ и Φ_n отдельно не используются. Удобнее оперировать произведением этих величин. Оно определяется по паспортным данным двигателя на основании уравнения электрического равновесия для установившегося режима:

$$U_n = I_{ян} R_{яц} + \kappa \Phi_n \omega_n,$$

откуда величина $\kappa \Phi_n$ будет равна:

$$\kappa \Phi_n = U_n / \omega_n - I_{ян} R_{яц} / \omega_n.$$

Значения активных сопротивлений обмоток двигателя приводятся в каталогах. Индуктивность якорной цепи может быть рассчитана по формуле

$$L = \gamma U_n / p \omega_n I_{ян},$$

где $\gamma = 0,25$ для компенсированных и $\gamma = 0,6$ для некомпенсированных двигателей.

Если уравнение электрического равновесия записать в общей форме и разделить его левую и правую части на $R_{яц}$, то оно примет вид:

$$\frac{L_{яц}}{R_{яц}} \frac{dI_{я}}{dt} + I_{я} = \frac{1}{R_{яц}} (U - \kappa \Phi_n \omega),$$

где $L_{яц} / R_{яц} = T_{я}$ - постоянная времени, характеризующая скорость протекания электромагнитного переходного процесса и поэтому называемая электромагнитной постоянной времени.

После преобразования уравнения равновесия по Лапласу получим:

$$T_{я} p I_{я}(p) + I_{я}(p) = \frac{1}{R_{яц}} [U(p) - \kappa \Phi_n \omega(p)].$$

Передаточная функция электромагнитного переходного процесса

$$W(p) = \frac{I_{я}(p)}{U(p)} = \frac{1/R_{яц}}{T_{я} p + 1}.$$

Электромеханический переходный процесс описывается уравнением движения электропривода, которое для одномассовой механической системы имеет вид:

$$M - M_c = J \frac{d\omega}{dt},$$

где $M = \kappa \Phi_n I_{я}$ - вращающий момент двигателя; $M_c = \kappa \Phi_n I_c$ - приведенный момент сопротивления; I_c - ток в якорной цепи при установившемся режиме работы двигателя, называемый током статической нагрузки; J - приведенный момент инерции электропривода.

Разделив обе части уравнения движения на $R_{яц}/(\kappa\Phi_n)^2$ и переписав его в общем виде, получим:

$$\frac{JR_{яц}}{(\kappa\Phi_n)^2} \frac{d\omega}{dt} = \frac{R_{яц}}{\kappa\Phi_n} (I_{я} - I_c),$$

где $JR_{яц}/(\kappa\Phi_n)^2 = T_m$ - постоянная времени, характеризующая скорость протекания электромеханического переходного процесса и поэтому называемая электромеханической постоянной времени.

После преобразования уравнения движения по Лапласу получим

$$T_m p \omega(p) = \frac{R_{яц}}{\kappa\Phi_n} [I_{я}(p) - I_c(p)].$$

Передаточная функция электромеханического переходного процесса

$$W(p) = \frac{\omega(p)}{I_{я}(p)} = \frac{R_{яц}/\kappa\Phi_n}{T_m p}.$$

Структурная схема ДПТ НВ приведена на рис. 1.10.

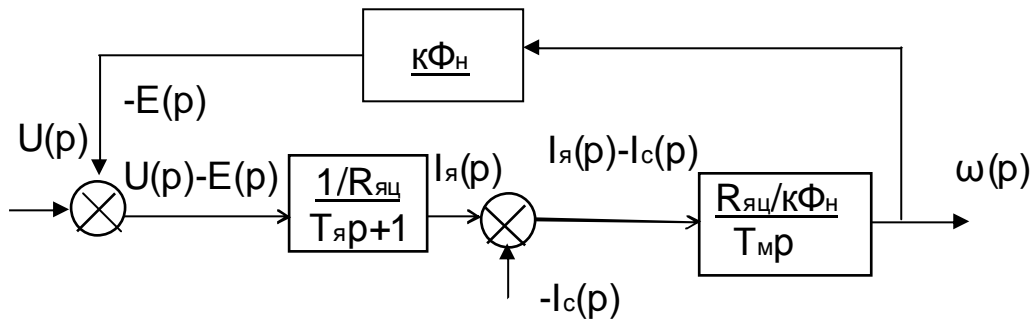


Рис. 1.10 - Структурная схема ДПТ НВ

Воспользовавшись правилами преобразования структурных схем, можно получить передаточную функцию ДПТ НВ по управлению

$$W(p) = \frac{\omega(p)}{U(p)} = \frac{1/\kappa\Phi_n}{T_я T_m p^2 + T_m p + 1}.$$

Переходная характеристика ДПТ НВ зависит от корней характеристического уравнения $T_я T_m p^2 + T_m p + 1 = 0$

$$p_{1,2} = \frac{-1 \pm \sqrt{1 - 4T_я/T_m}}{2T_я}.$$

При $T_m < 4T_я$ корни характеристического уравнения будут комплексные сопряженные с отрицательными вещественными частями $p_{1,2} = -\alpha \pm j\beta$. Переходный процесс будет носить характер затухающих колебаний. Такое соотношение

справедливо при отсутствии в якорной цепи двигателя добавочных резисторов, т.е. при расчете переходных процессов разгона, торможения, наброса и сброса нагрузки в случаях, когда двигатель работает на естественной характеристике.

Включение добавочных резисторов в якорную цепь двигателя приводит к уменьшению $T_я$. При $T_м > 4T_я$ корни характеристического уравнения становятся вещественными и колебательный процесс вырождается в аperiodический второго порядка.

Обычно величина электромеханической постоянной времени $T_м$ существенно превышает $T_я$. Поэтому для практических расчетов значением $T_я$ можно пренебречь, т.е. считать $T_я = 0$. В этом случае графики переходных процессов будут представлять собой экспоненты первого порядка.

Электромеханическая постоянная времени $T_м$ однозначно определяет длительность экспоненциального переходного процесса. Теоретически время таких переходных процессов равно бесконечности. Практически за условное время окончания переходного процесса принимается время, за которое регулируемая величина достигла 95% установившегося значения. Это время равно $3T_м$.

Для построения с достаточной для практики точностью экспоненты первого порядка следует помнить, что касательная к начальному участку экспоненты отсекает от установившегося значения отрезок, равный $T_м$. При этом регулируемая величина за время $T_м$ достигает 0,632 от установившегося значения.

Сказанное иллюстрирует график переходного процесса пуска ДПТ НВ в одну ступень под нагрузкой, приведенный на рис. 1.11.

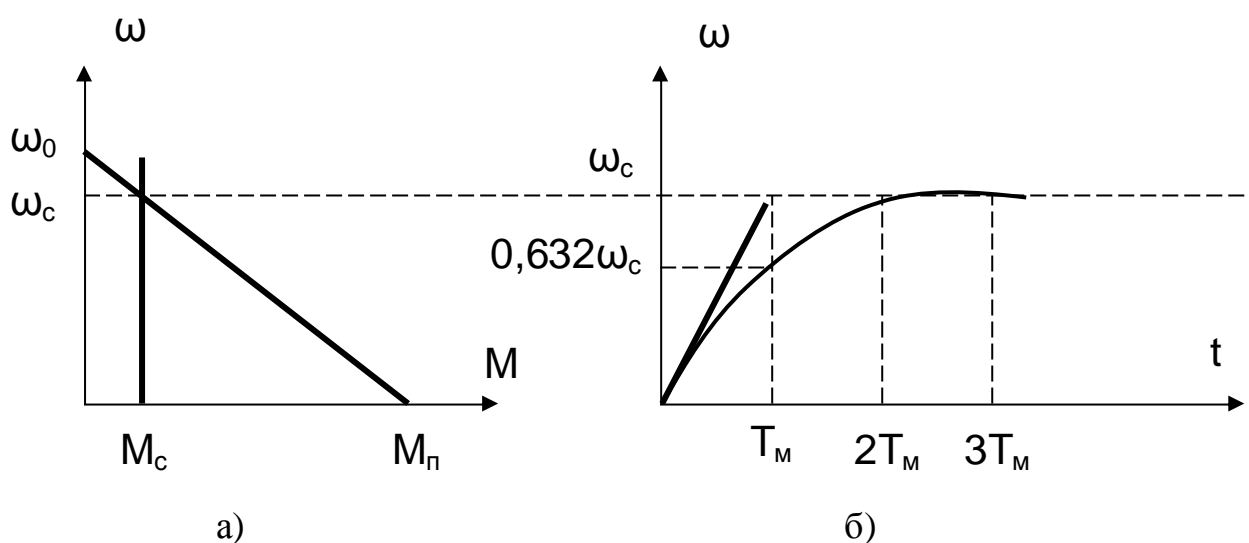


Рис. 1.11 - Механическая характеристика (а) и график переходного процесса (б) пуска ДПТ НВ

Двигатели постоянного тока последовательного возбуждения (ДПТ ПВ)

Схема включения ДПТ ПВ приведена на рис. 1.12. Обмотка возбуждения $L1M$ двигателя включается последовательно с якорем и обмоткой дополнительных полюсов $L2M$. Поэтому ток возбуждения I_b , а следовательно, и поток возбуждения Φ определяются нагрузкой на валу двигателя.

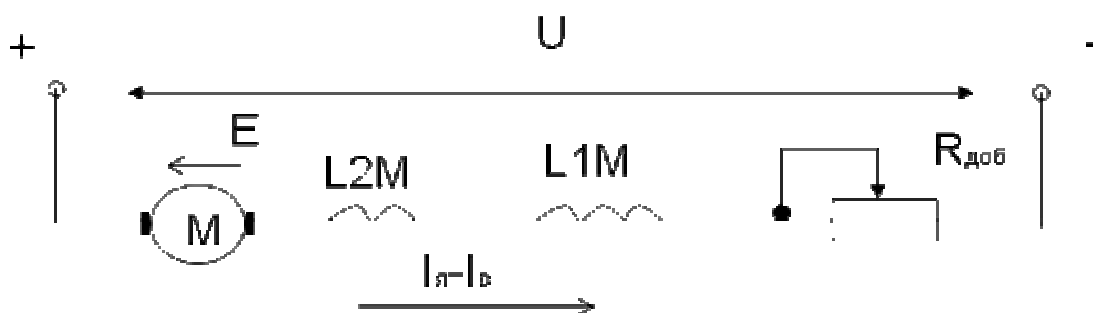


Рис. 1.12 - Схема включения ДПТ ПВ

Кривая намагничивания $\Phi = f(I_a)$ имеет вид нелинейности типа «зона насыщения». Точка, соответствующая номинальному току якоря $I_{я\text{ ном}}$, располагается на колене кривой намагничивания. При $I_a > I_{я\text{ ном}}$ незначительное увеличение потока компенсируется реакцией якоря и результирующий поток, пересекающий обмотку якоря, практически остается постоянным ($k\Phi \approx const$). Поэтому расчет переходных процессов и динамических свойств ДПТ ПВ аналогичен расчету для ДПТ НВ. При $I_a < I_{я\text{ ном}}$ линейные методы расчета переходных процессов непригодны и следует пользоваться не линейными методами.

Двигатели постоянного тока со смещенным возбуждением (ДПТ СВ)

Схема включения ДПТ СВ приведена на рис. 1.13.

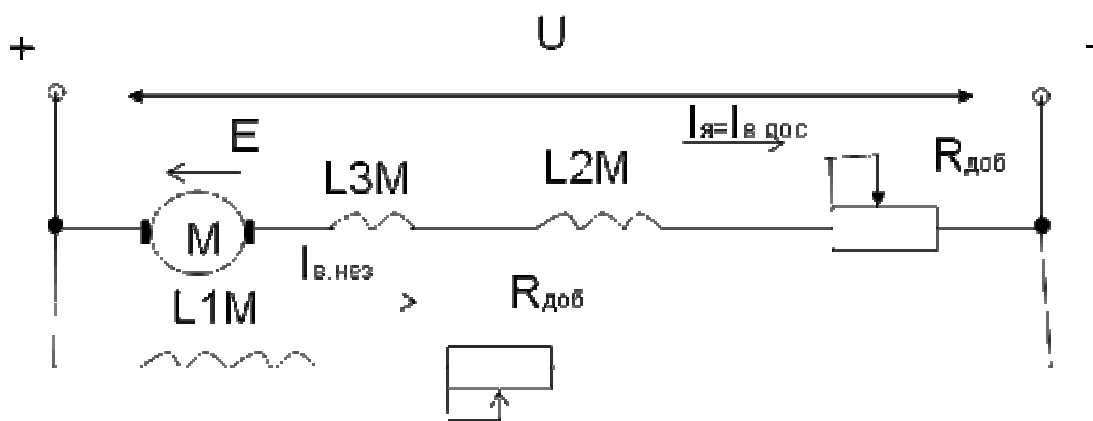


Рис. 1.13 - Схема включения ДПТ СВ

Двигатель имеет две обмотки возбуждения: независимую L1M и последовательную L2M. В двигательном режиме, для которого на рис. 1.13 показаны направления токов в обмотках возбуждения, магнитные потоки обмоток направлены согласно. При этом большая часть магнитного потока при номинальном режиме работы обеспечивается независимой обмоткой и в зависимости от типа двигателя может составлять $\Phi_{нез} = (0,615 \div 0,72) \Phi_{ном}$. Характеристики ДПТ СВ приближаются к соответствующим характеристикам ДПТ НВ или ДПТ ПВ в зависимости от отношения потоков $\Phi_{нез}$ и $\Phi_{посл}$. Скорость идеального холостого хода ДПТ СВ при $\Phi_{посл}=0$ составляет $(1,3 \div 1,6) \omega_{ном}$. Она несколько выше, чем соответствующее значение для ДПТ НВ, но существенно ниже, чем для ДПТ ПВ.

По перегрузочной способности ДПТ СВ также занимают промежуточное положение. Если при допустимом токе якоря $I_{я доп} = 2,5 I_{я ном}$ допустимый момент $M_{доп}$ для ДПТ НВ составляет $M_{доп} = 2,5 M_{ном}$, для ДПТ ПВ $M_{доп} = 3 M_{ном}$, то для ДПТ СВ $M_{доп} = 2,7 M_{ном}$.

Расчет переходных процессов и динамических свойств ДПТ СВ аналогичен расчету для ДПТ ПВ.

Асинхронный двигатель (АД). Самый распространенный вид двигателей, т.к. они более просты в устройстве и надежны в эксплуатации, при равной мощности имеют меньшую массу, габариты и стоимость чем ДПТ. Схемы включения АД приведены на рис. 1.14.

Выпускаются АД сериями и предназначены для питания от трехфазной сети 0,4 кВ с частотой 50 Гц при синхронных скоростях от $\omega_0 = 314$ рад/с и менее.

В обозначение типа АД всех серий общепромышленного применения входит буква А – асинхронный. Промышленностью выпускается серия двигателей 4А, которые имеют стандартную шкалу мощностей от 0,06 кВт до 400 кВт при всех скоростях вращения.

Кроме общепромышленных, выпускаются специальные серии АД: крановые АД с фазным ротором серий МТФ и МТН и с короткозамкнутым ротором серий МТКФ и МТКН.

Асинхронный двигатель представляет собой сложное электромеханическое устройство, состоящее из магнитосвязанных обмоток статора и ротора, непрерывно изменяющий свое взаимное положение в пространстве. Вследствии этого возникающие электромагнитные переходные процессы отличаются большой сложностью. Переходные токи в обмотках статора и ротора в общем случае содержат вынужденную, свободную составляющие и изменяются по сложным колебательным зависимостям. Вследствии этого и электромагнитный момент АД в переходных процессах имеет колебательный характер и является сложной функцией времени. Магнитные поля, образуемые свободными составляющими токов, могут либо усиливать, либо ослаблять основное поле, создаваемое вынужденными составляющими токов, вызывая соответствующее усиление или ослабление переходного электромагнитного момента. Их влияние проявляется в значительных пиках переходного электромагнитного момента двигателя, которые при пуске в 3-5 раз, а при реверсе в 12-18 раз превышают номинальный момент АД.

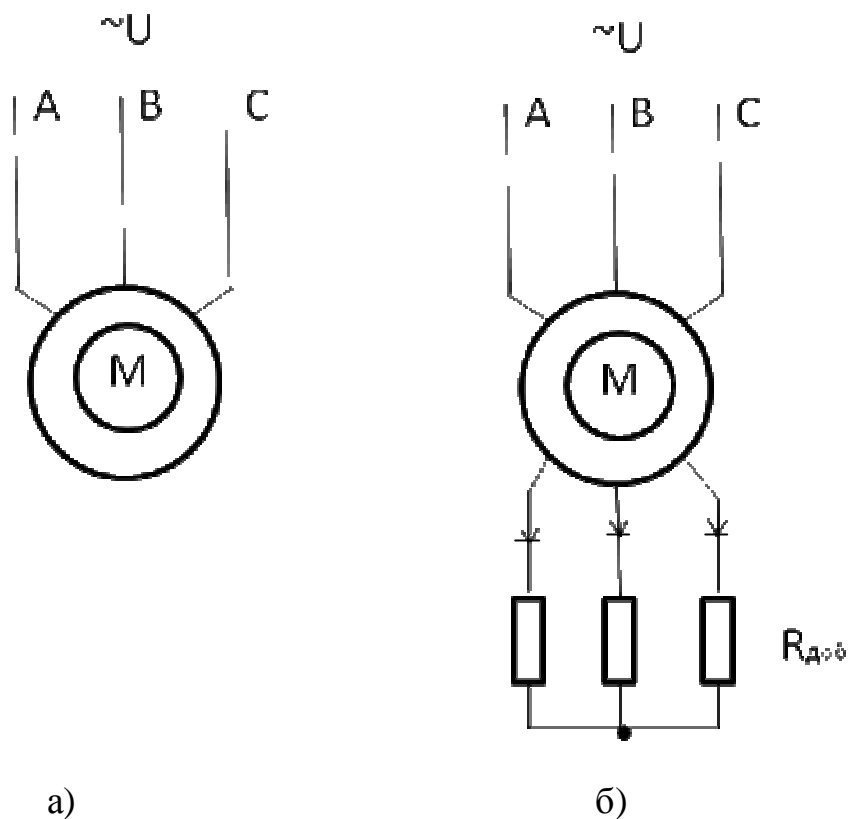


Рис. 1.14: а) схема включения АД с короткозамкнутым ротором;
 б) схема включения АД с фазным ротором

Математически переходные процессы в АД описываются сложными дифференциальными уравнениями, которые по своей природе нелинейны и содержат периодические коэффициенты. Даже при использовании ЭВМ и принятии ряда упрощений решение этой системы уравнений оказывается затруднительным.

В связи с этим, анализ переходных процессов в асинхронном электроприводе целесообразно проводить в двух направлениях. Одно из них должно предусматривать оценку максимальных значений электромагнитного переходного момента АД. Другое направление посвящено рассмотрению только механических переходных процессов, что позволяет получить оценочное представление об общем характере изменения координат во времени, в том числе оценить время переходных процессов.

При питании от сети механические переходные процессы в асинхронном электроприводе описываются уравнением движения электропривода

$$M(s) - M_c(\omega) = J \frac{d\omega}{dt},$$

в котором вращающий момент двигателя $M(s)$ и приведенный момент сопротивления $M_c(\omega)$ в общем случае являются нелинейными функциями скольжения s и скорости ω . Один из возможных путей получения зависимостей $\omega(t)$ и $M(t)$ состоит в использовании линейной аппроксимации нелинейных механических характеристик АД и технологической машины.

Получение общих аналитических выражений для измерения скорости и момента двигателя во времени проведем при предположении линейности механических характеристик двигателя и исполнительного органа. Аналитически эти характеристики могут быть соответственно представлены как:

$$\begin{aligned} M &= M_{к.з} - \beta\omega, \\ M_c &= M_{c0} + \beta_c\omega, \end{aligned}$$

где $M_{к.з}$ и M_{c0} – моменты двигателя и исполнительного органа при $\omega=0$; β , β_c – коэффициенты пропорциональности.

Выражая в уравнении движения электропривода M и M_c с помощью последних уравнений и решая его относительно скорости ω , получаем

$$j \frac{d\omega}{dt} + (\beta + \beta_c)\omega = M_{к,з} - M_{с0}.$$

Поделив левую и правую части уравнения почленно на $\beta + \beta_c$, найдем линейное неоднородное дифференциальное уравнение первого порядка

$$T_m \frac{d\omega}{dt} + \omega = \omega_{уст},$$

где $T_m = \frac{J}{(\beta + \beta_c)}$ - электромеханическая постоянная времени процесса, с;

$\omega_{уст} = \frac{(M_{к,з} - M_{с0})}{(\beta + \beta_c)}$ - установившаяся (конечная) скорость движения.

Решение неоднородного уравнения будем искать как сумму общего решения линейного однородного уравнения (свободной составляющей движения)

$$T_m \frac{d\omega}{dt} + \omega = 0$$

и частного решения неоднородного уравнения (вынужденной составляющей движения), т.е. в виде:

$$\omega = \omega_{св} + \omega_{пр}.$$

Свободную составляющую движения найдем в виде $\omega_{св} = Ae^{pt}$, где A - некоторая константа, а p - корень характеристического уравнения

$$T_m p + 1 = 0.$$

Находим корень характеристического уравнения $p = -1/T_m$ и для свободной составляющей имеем:

$$\omega_{св} = Ae^{-t/T_m}.$$

Принужденная составляющая движения может быть получена, если в неоднородном уравнении положить $d\omega/dt = 0$. Выполнив это, найдем

$$\omega_{пр} = \omega_{уст}.$$

С учетом полученного, представим решение неоднородного уравнения в виде:

$$\omega = Ae^{-t/T_m} + \omega_{уст}.$$

Константу A находим по начальным условиям переходного процесса: при $t = 0$ $\omega = \omega_{нач}$, откуда $A = \omega_{нач} - \omega_{уст}$.

Окончательно для скорости получаем:

$$\omega = (\omega_{нач} - \omega_{уст})e^{-t/T_m} + \omega_{уст}.$$

Так как скорость и момент двигателя связаны с линейной зависимостью, закон изменения момента в функции времени имеет аналогичный вид

$$M = (M_{нач} - M_{уст})e^{-t/T_m} + M_{уст}.$$

Полученные выражения могут использоваться для анализа переходных процессов различного вида – пуска, реверса, торможения и т.д. Для пользования ими в каждом конкретном случае должна быть определена электромеханическая постоянная времени T_m , а также начальные и конечные значения координат $\omega_{нач}$, $\omega_{уст}$, $M_{нач}$, $M_{уст}$. В частном случае, когда $M_c = const$ и $\beta_c = 0$, эти величины могут быть определены по формулам

$$T_m = \frac{J}{\beta} = \frac{J\Delta\omega}{\Delta M} = \frac{J\omega_0}{M_{к,з}};$$

$$\omega_{уст} = \omega_0 - \frac{M_c}{\beta}; M_{уст} = M_c$$

Выражения для скорости и момента позволяют определить время $t_{п,п}$ изменения скорости или момента от какого-либо начального значения до значений ω_i или M_i

$$t_{п,п} = T_m \ln \frac{\omega_{уст} - \omega_{нач}}{\omega_{уст} - \omega_i} = T_m \ln \frac{M_{нач} - M_{уст}}{M_i - M_{уст}}.$$

Используем приведенные выше формулы при рассмотрении механических переходных процессов в электроприводе передвижения мостового крана. Статические характеристики двигателя и графики изменения его скорости и момента приведены на рис. 1.15.

Двигатель начинает разгон по характеристике противовключения 1 в течение времени срабатывания контактора противовключения. Пусковой момент на характеристике 1 небольшой. Это обеспечивает плавное, без рывков и ударов, натяжение канатов и замыкание зазоров механических передач. При шунтировании ступени противовключения $Rq_{пр}$ двигатель переходит на характеристику 2.

Начальные значения скорости и момента двигателя на первом этапе переходного процесса в соответствии со статическими характеристиками рис. 1.15.а составляют: $\omega_{нач}=0$; $M_{нач}=M_2=1,25M_H=1,25\cdot 224,9=281,2$ Н·м. Конечные значения этих координат соответствуют точке 1 пересечения характеристики 2 с механической характеристикой нагрузки $\omega(M_c)$ при $M_c=const$. Они равны: $M_c=0,5M_H=0,5\cdot 224,9=112,45$ Н·м; $\omega_{уст1}=0,59\omega_0=0,59\cdot 104,7=61,7$ рад/с.

Электромеханическая постоянная времени на первом этапе переходного процесса $T_{м1}$ с учетом суммарного приведенного момента инерции электропривода моста при перемещении номинального груза J_Σ будет равна:

$$T_{м1} = J_\Sigma \cdot \frac{\omega_0}{M_2} = 17,6 \frac{104,7}{281,2} = 6,5 \text{ с.}$$

Изменение скорости и момента происходит по экспоненциальному временному закону.

В момент времени t_1 , когда скорость двигателя достигает значения $\omega_2=0,46\omega_0$, а момент снизится до значения момента переключения M_1 , шунтируется первая ступень пускового реостата R_{qn1} .

Двигатель переходит на характеристику 3. При этом момент двигателя скачкообразно (так как электромагнитная инерция двигателя не учитывается) возрастает до значения M_2 , а кривая скорости претерпевает излом.

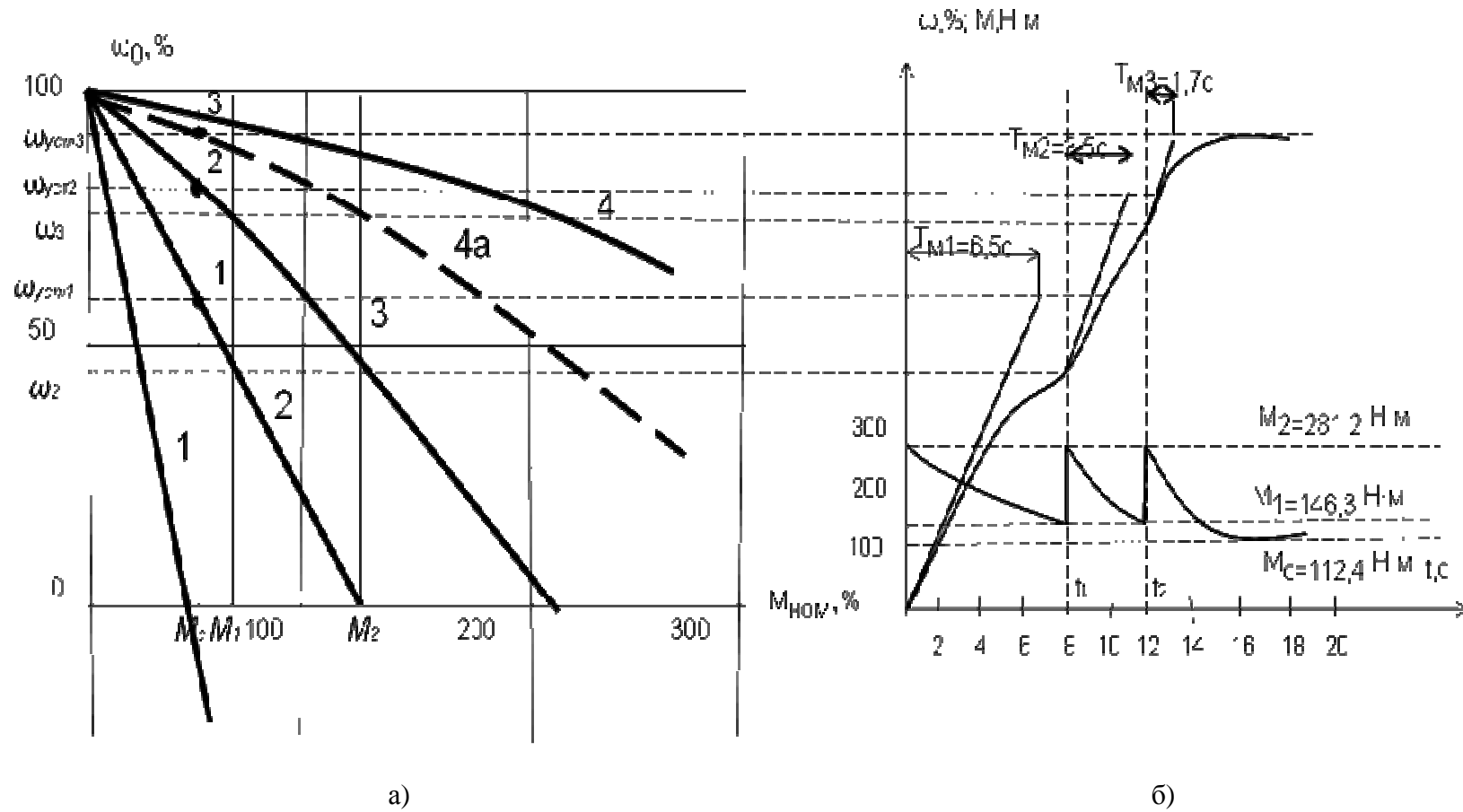


Рис. 1.15 - Переходной процесс при пуске электропривода передвижения крана.

- а) статические характеристики двигателя;
 б) графики изменения скорости и момента двигателя

Скорость продолжает по экспоненте увеличиваться, стремясь к значению $\omega_{уст2}=0,8\omega_0$ и M_c являются координатами точки 2 установившегося режима работы двигателя на характеристике 3.

Электромеханическая постоянная времени $T_{м2}$, характеризующая экспоненциальные зависимости $\omega(t)$ и $M(t)$ на втором этапе разгона, отличается от постоянной времени первого этапа и определяется как

$$T_{м2} = J_{\Sigma} \cdot \frac{\omega_0 - \omega_2}{M_2} = 17,6 \frac{104,7 - 0,46 \cdot 104,7}{281,2} = 3,5с.$$

В момент времени t_2 , когда скорость двигателя достигнет значения $\omega_3=0,74\omega_0$, а момент снизится до значения момента переключения M_1 , шунтируется вторая ступень пускового реостата R_{qn2} .

Двигатель переходит на характеристику 4а. Скорость двигателя продолжает по экспоненте увеличиваться, стремясь к значению $\omega_{уст.3}$, а момент вновь начинает снижаться, стремясь к M_1 . Значения $\omega_{уст.3}=0,9\omega_0$ и M_c являются координатами точки 3 установившегося режима работы двигателя на характеристике 4а после окончания разгона.

Электромеханическая постоянная времени $T_{м3}$ на третьем этапе разгона будет равна:

$$T_{м3} = J_{\Sigma} \cdot \frac{\omega_0 - \omega_3}{M_2} = 17,6 \frac{104,7 - 0,74 \cdot 104,7}{281,2} = 1,7с.$$

По результатам расчетов на рис. 1.15б построены графики изменения скорости и момента двигателя во времени разгона. Анализ графиков показывает, что касательные к начальным участкам экспонент, отсекающие от установившегося значения отрезки, равные постоянной времени T_m на этапе разгона, имеют одинаковый наклон.

Это означает, что механические характеристики на рис. 1.15б обеспечивают плавный, с постоянным по величине ускорением разгон двигателя, исключая возможность раскачивания груза.

Лекция 3

1.3. Схемы включения, математические уравнения и передаточные функции преобразователей постоянного и переменного тока, управляющих и функциональных элементов

Применение тиристорных преобразователей в электроприводах постоянного тока позволяет повысить быстродействие электропривода, расширить диапазон регулирования скорости до 1000:1 и более, улучшить энергетические показатели электропривода. В частности, к.п.д. системы тиристорный преобразователь - двигатель на 5-7 % выше к.п.д. системы генератор - двигатель. Вместе с тем, тиристорный преобразователь имеет повышенную чувствительность к перегрузкам, а пульсирующий характер выпрямленного тока увеличивает потери в двигателе и уменьшает его коммутационную способность.

В реверсивном электроприводе для питания якоря двигателя необходимо использовать реверсивный тиристорный преобразователь. Изменение полярности напряжения на зажимах якоря работающего двигателя переводит его в режим торможения противовключением, что обеспечивает минимальное время торможения. После остановки двигатель сразу же начинает разгон в противоположном направлении. Это обеспечивает минимально возможное время реверса и поэтому способствует повышению производительности технологической машины.

Функциональная схема реверсивного тиристорного преобразователя типа АТЕР приведена на рис. 1.16. Они выпускаются мощностью до 1150 кВт [5]. Преобразователи с номинальным выпрямленным напряжением 460 В подключаются непосредственно к сети с линейным напряжением 380 В, а преобразователи с номинальным выпрямленным напряжением 230 В подключаются к сети 380 В через согласующий трансформатор.

Схема выпрямления преобразователей трехфазная, мостовая полностью управляемая. Реверсивность обеспечивается встречно-параллельным включением двух трехфазных мостовых выпрямителей БТ1 и БТ2 с отдельным

управлением каждым выпрямителем. Для этого импульсы управления тиристорами с выхода системы импульсно-фазового управления (СИФУ) подаются на ключ К, который по команде логического переключающего устройства Л в зависимости от необходимого направления вращения двигателя подает импульсы управления на один из выпрямителей.

Система импульсно-фазового управления выполняется по вертикальному принципу с линейным опорным напряжением. Сигнал управления U_y на вход СИФУ подается с выхода полупроводникового усилителя УП, который осуществляет алгебраическое суммирование входных сигналов и усиление результирующего сигнала.

Коррекция динамических характеристик электропривода и ограничение тока перегрузки осуществляется посредством устройств коррекции и токоограничения УКТ.

Защита силовых цепей от токов короткого замыкания осуществляется быстродействующими устройствами токовой защиты УТЗ, а защита тиристоров от перенапряжения - устройством УЗП.

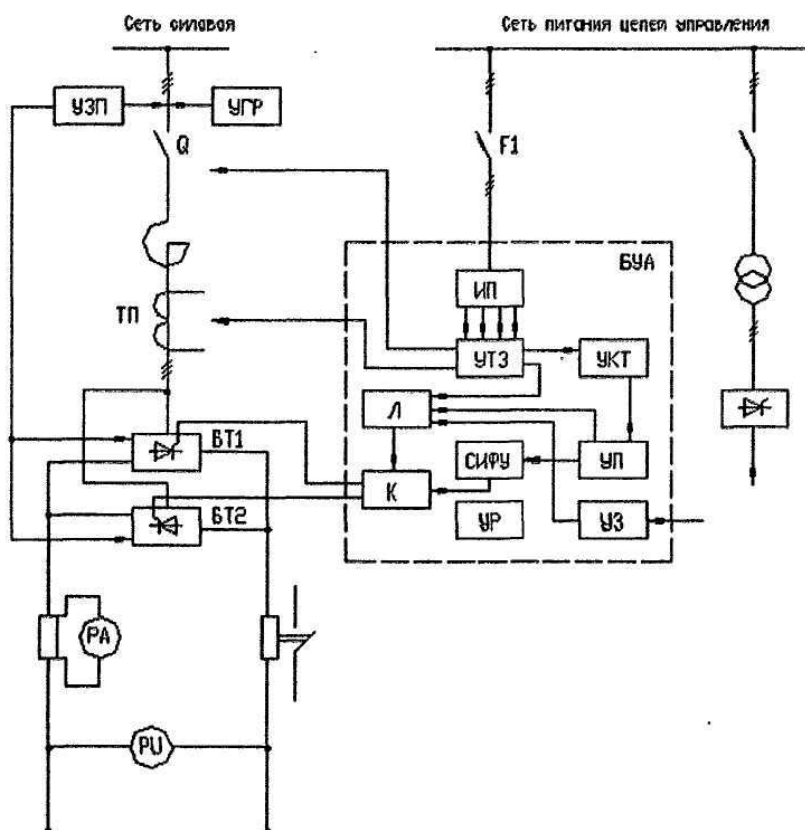


Рис.1.16 - Функциональная схема тиристорного преобразователя

Входным элементом системы управления системы ТП является узел задания УЗ. В нем определяется сигнал ошибки управления $\Delta U = U_3 - U_{oc}$.

Выбор тиристорного преобразователя производится по номинальному выпрямленному напряжению $U_{тп.ном}$ и номинальному выпрямленному току $I_{тп.ном}$. Для двигателей с номинальным напряжением 220 В выбирается преобразователь с номинальным выпрямленным напряжением 230 В. Номинальный выпрямленный ток преобразователя должен быть ближайшим большим по отношению к номинальному току двигателя.

Преобразователь с безынерционной системой управления при отсутствии в канале управления апериодических звеньев практически эквивалентен звену чистого запаздывания с постоянной времени $\tau = 1/(2mf_c)$, т.е. его передаточная функция в зоне линейности регулировочной характеристики будет

$$W(p) = \Delta e_{т.п.}(p) / \Delta u_y(p) = k_{т.п.} e^{-\tau p},$$

где $k_{т.п.} = \Delta E_{т.п.} / \Delta U_y$ – коэффициент усиления ТП по напряжению.

Для преобразователя с инерционной системой управления, имеющей постоянную времени $T_{y.п.} > 0,0064$ с, или при безынерционной системе управления, но со специально включенным звеном ограничения скорости нарастания входного сигнала ТП (апериодическим звеном с постоянной времени $T_0 \geq 0,0064$ с), чистое запаздывание учитывать не нужно. Тогда передаточная функция преобразователя по каналу управляющего воздействия

$$W(p) = k_{т.п.} / (T_{y.п.} p + 1)$$

или

$$W(p) = k_{т.п.} / (T_0 p + 1).$$

Тиристорный регулятор напряжения. Одна из распространенных схем тиристорного регулятора напряжения (ТРН) приведена на рис. 1.17. В простейшем случае ТРН используют как переключатель— статический контактор — для включения и отключения асинхронных двигателей, в частности короткозамкнутых. В реверсивных схемах добавляют еще один комплект тиристоров. Возможна также реализация режима динамического торможения двигателя. Регулирование угла отпирания тиристоров α

(отсчитываемого от начала положительной полуволны фазного напряжения сети) в пределах от нуля до 150 эл. градусов соответствует практически изменению напряжения на двигателе U_d от напряжения сети U_c до нуля. Поэтому, например, плавно изменяя при пуске двигателя угол α от 150° до нуля, можно нести до минимума вредное влияние электромагнитных переходных процессов в обмотке двигателя.

Для двигателей с фазным ротором ТРН применяют и как управляемый преобразователь в системах стабилизации скорости двигателя.

Особенности динамики ТРН определяются постоянной времени T_y системы управления тиристорами и чистым запаздыванием $\tau \approx 0,0067$ с. В линейном приближении передаточная функция ТРН имеет вид:

$$W(p) = \frac{\Delta\alpha(p)}{\Delta u_y(p)} = \left[\frac{k_{m.p.n.}}{T_y z + 1} \right] e^{-\tau p},$$

где $k_{m.p.n.} = \frac{\Delta\alpha}{\Delta U_y}$ находят по характеристике устройства импульсно-фазового управления тиристорами.

Часто на практике можно пренебречь величинами T_y и τ , считая ТРН безынерционным звеном.

Тиристорный коммутатор. Для бесконтактного импульсного регулирования величины добавочного сопротивления в роторе асинхронного двигателя применяют схему, изображенную на рис. 1.18. Добавочное сопротивление $R_{доб}$ последовательно с обмоткой ротора через выпрямительный мост B_n и сглаживающий реактор PC . Сопротивление $R_{доб}$ либо полностью вводят в схему, либо замыкают накоротко при помощи тиристорного коммутатора ТК, представляющего собой тиристорный ключ постоянного тока.

При достаточно большой частоте коммутации ключа можно считать, что в цепь выпрямленного тока ротора помещено регулируемое «импульсное» добавочное сопротивление $R_{доб\text{ имп}}$, величина которого плавно изменяется от 0 до $R_{доб}$.

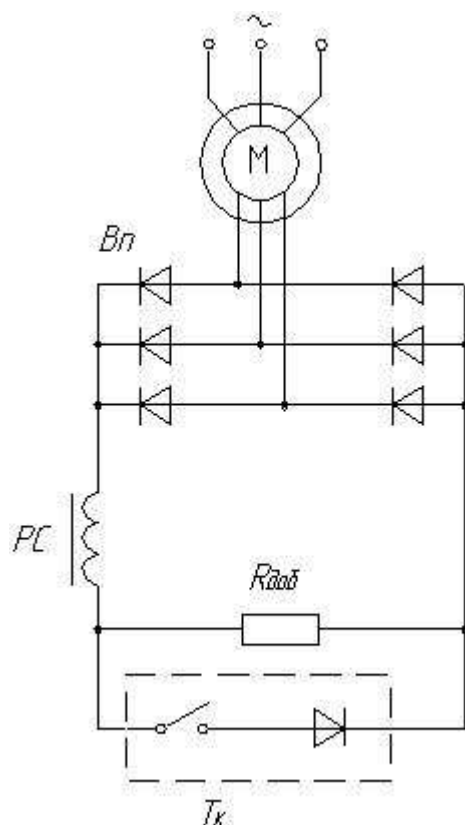


Рис. 1.17 - Функциональная схема тиристорного коммутатора

Тиристорный коммутатор, так же, как и рассмотренный тиристорный регулятор напряжения, практически можно считать безынерционным звеном.

Тиристорный преобразователь частоты (ТПЧ) для регулируемых электроприводов выполняют обычно по схеме с промежуточным звеном **Замкнутые электропривода с использованием преобразователей частоты.**

В общем случае частотное управление двигателя, реализуемое с помощью преобразователей частоты, может быть осуществлено по трем вариантам:

- параметрическое управление, при котором управляющим воздействием на двигатель являются частота и действующее значение подаваемого на двигатель напряжения;
- частотно-токовое управление, при котором управляющим воздействием на двигатель являются частота и действующее значение тока двигателя;

- векторное управление, связанное с регулированием мгновенных значений питающих напряжений и токов с целью формирования электромагнитного момента двигателя нужной величины.

Замкнутый электропривод с параметрическим частотным управлением.

С использованием этого принципа построены многие частотно-регулируемые асинхронные электроприводы. В них за счет использования различных обратных связей и функциональных блоков формируются жесткие рабочие участки механических характеристик двигателя для качественного регулирования его скорости, ограничиваются ток и момент и обеспечивается требуемое соотношение между регулируемой частотой и напряжением. Обобщенная схема такого электропривода представлена на рис. 1.18.

В качестве силового преобразователя используется преобразователь частоты со звеном постоянного тока, состоящий из неуправляемого выпрямителя В и инвертора напряжения, выполненного на шести силовых модулях, состоящих из транзистора и диода. Между выпрямителем и инвертором включен фильтр, состоящий из реактора L и конденсатора С, обеспечивающий сглаживание выходного напряжения выпрямителя и необходимую циркуляцию реактивной энергии в силовой части схемы.

Инвертор работает в режиме широтно-импульсной модуляции и преобразует нерегулируемое напряжение постоянного тока на выходе фильтра в регулируемое по частоте и амплитуде напряжение на статоре двигателя М. Силовая схема электропривода неререверсивная и не предусматривает электрического торможения.

Управление инвертором осуществляется сигналами f_y и U_y , определяющими значения выходных частоты и напряжения преобразователя частоты. Формирование этих сигналов осуществляется схемой управления, в состав которой входят регулятор скорости РС, регулятор тока РТ, датчики скорости ТГ и тока ДТ, суммирующие усилители (пропорциональные регуляторы) $\Sigma 1$ и $\Sigma 2$, блок ограничения БО сигнала РС, функциональный преобразователь ФП, задатчик интенсивности ЗИ.

Регулятор скорости РС в совокупности с задатчиком интенсивности ЗИ и сумматором Σ_2 , обеспечивают требуемое регулирование скорости и ускорения двигателя в установившемся и переходных режимах работы электропривода с помощью сигнала f_y .

Ограничение тока статора и момента двигателя производится регулятором тока РТ, когда ток статора двигателя меньше тока уставки I_m , сигнал на выходе РТ равен нулю и схема управления обеспечивает режим поддержания заданной скорости. Когда ток статора превысит уставку тока I_m , резко увеличивается сигнал на выходе РТ, из-за чего резко снижается и сигнал на выходе сумматора Σ_1 . Это приводит к уменьшению частоты и напряжения на статоре двигателя и тем самым к ограничению тока статора и момента двигателя.

Функциональный преобразователь ФП, характеристика которого в виде ломаной линии $Oabc$ показана над его условным изображением на рис. 1.18, а, обеспечивает требуемое соотношение между частотой и выходным напряжением преобразователя частоты. Отрезком Oa создается начальное напряжение на выходе преобразователя, необходимое для преодоления падения напряжения на обмотке статора двигателя при малых частотах напряжения. Участок ab обеспечивает пропорциональное изменение частоты и напряжения

(закон частотного управления $U/f = \text{const}$), при котором магнитный поток двигателя поддерживается постоянным. На участке bc величина напряжения на статоре остается неизменной, хотя при этом его частота может увеличиваться.

Для уменьшения влияния падения напряжения в цепи статора на величину магнитного потока двигателя и тем самым на его момент в схеме предусмотрена положительная обратная связь по току (так называемая IR -компенсация), сигнал которой поступает на вход сумматора Σ_2 . При увеличении нагрузки двигателя возрастает его ток и увеличивается сигнал U_y , за счет чего возрастает выходное напряжение преобразователя и тем самым компенсируется падение напряжения в обмотке статора.

В современных электроприводах этого типа реализация блоков управления схемы рис. 1.18, а осуществляется с использованием микропроцессорных средств,

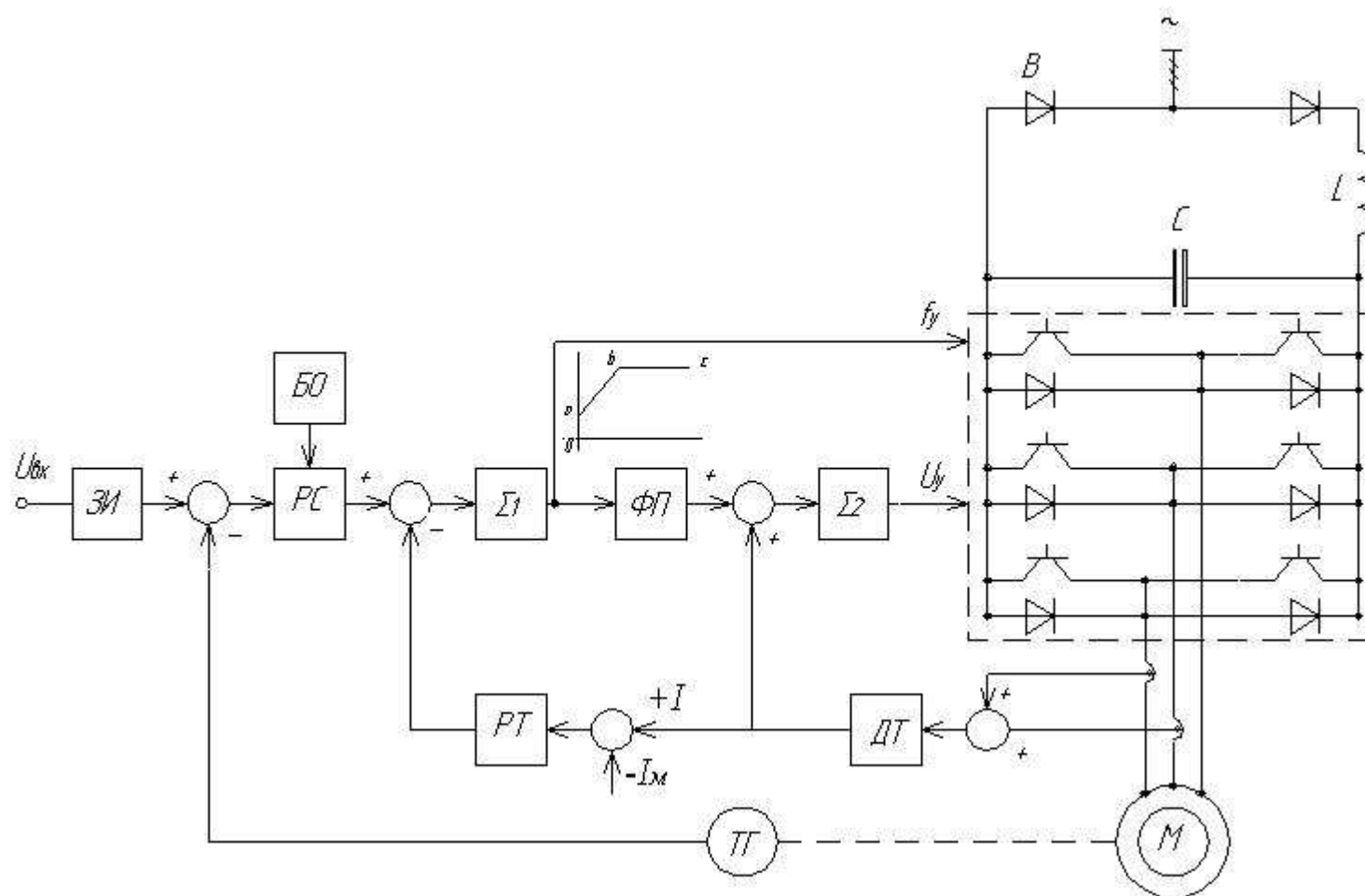


Рис. 1.18 - Схема асинхронного электропривода при частотном управлении

а настройка их параметров и характеристик производится программным путем.

В ряде случаев требуемое регулирование скорости может быть получено и в разомкнутой схеме без обратной связи по скорости. В этом случае в схеме отсутствуют РС и ТГ, а сигнал с выхода ЗИ непосредственно поступает на вход сумматора Σ_1 ; во всем остальном схема остается без изменения.

Схема частотно-токового управления АД. Схема электропривода представлена на рис. 1.19. Тиристоры VS1—VS6 образуют схему управляемого выпрямителя УВ, а тиристоры VS7—VS12 — схему автономного инвертора тока АИТ. Между этими блоками включен реактор L большой индуктивности с тем, чтобы придать инвертору свойства источника тока. Конденсаторы C1—C6 с диодами VD1—VD6 образуют цепи искусственной коммутации тиристоров VS7—VS12. Остальные элементы схемы имеют следующее назначение: СУВ и СУИ— схемы управления тиристорами выпрямителя и инвертора; РТ, ДТ— соответственно регулятор и датчик тока статора; ДС—датчик скорости; УО — усилитель-ограничитель; ФП— функциональный преобразователь. Схема работает следующим образом.

Задающий сигнал $U_{з.с.}$ задает частоту переключения тиристоров инвертора и тем самым частоту тока статора двигателя М. После вычитания из сигнала $U_{з.с.}$ сигнала обратной связи по скорости U_{ω} получается сигнал U_{β} , пропорциональный относительной частоте ротора $\beta=f_2/f_{1ном}$ (величину β называют также абсолютным скольжением двигателя). Она связана со скольжением s двигателя следующим соотношением: $\beta = \alpha s$, где $\alpha=f_1/f_{1ном}$.

Сигнал U_{β} , пройдя через УО, вместе с сигналом U_{ω} поступает на вход СУИ. Частота на выходе инвертора определяется сигналом $U_{\omega s} = U_{\omega} + U_{\beta}$; СУИ настроена таким образом, что пока УО работает в линейной зоне, частота на выходе инвертора будет постоянной и независимой от нагрузки. Двигатель при этом имеет жесткие механические характеристики.

Сигнал U_{β} , после прохождения через ФП является также сигналом для контура регулирования тока. Так как этот сигнал пропорционален абсолютному скольжению, то и ток двигателя при всех частотах будет ему пропорционален.

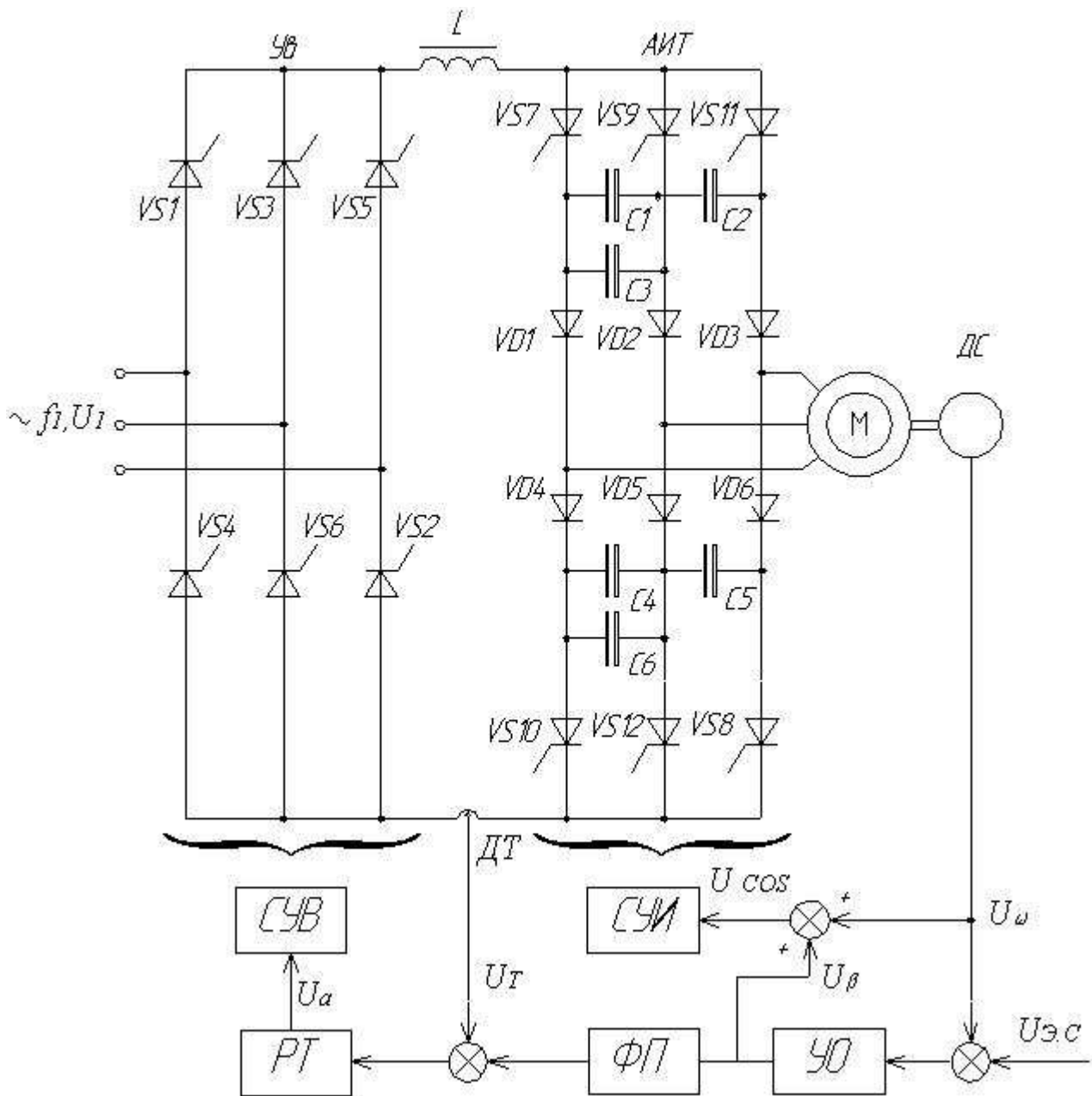


Рис. 1.19 - Схема асинхронного электропривода при частотно-токовом управлении

При резких изменениях задающего сигнала или при значительных перегрузках двигателя УО входит в зону ограничения (постоянства) своего выходного сигнала U_β , ограничивая тем самым на требуемом уровне и задание для тока. Двигатель при этом работает при любой скорости с постоянными значениями абсолютного скольжения и тока, т.е. механическая характеристика становится абсолютно мягкой.

Схема позволяет осуществлять торможение двигателя с рекуперацией (отдачей) энергии в сеть, для чего инвертор переводится в режим выпрямления, и выпрямитель — в режим инвертирования тока.

Схемы векторного управления асинхронными двигателями. При необходимости получения высокого качества и диапазонов регулирования переменных асинхронного электропривода в установившемся и переходных режимах применяются так называемые схемы векторного управления, в которых решение этих задач обеспечивается за счет формирования электромагнитного момента двигателя. Принцип формирования момента может быть показан следующим образом.

Уравнение электромагнитного момента асинхронного двигателя может иметь различные формы записи в зависимости от используемых в этих уравнениях переменных и выбранной системы координат для их представления. При построении систем векторного управления процессы в двигателе удобно рассматривать в системе координат X—Y, в которой ось X совпадает по направлению с потокоцеплением ротора Ψ_2 и вращается с его скоростью. В этом случае уравнение электромагнитного момента трехфазного асинхронного двигателя имеет вид:

$$M = \frac{3pL_{12}\Psi i_{1y}}{2L_2},$$

где p — число пар полюсов двигателя; L_{12} — взаимоиндуктивность между статором и ротором; i_{1y} — составляющая тока статора по оси Y; L_2 — полная индуктивность ротора.

Так как составляющая тока статора i_{1x} по оси X определяет потокоцепление ротора Ψ_2 , то из рассмотрения формулы следует, что за счет регулирования i_{1x} и i_{1y} можно обеспечивать формирование момента двигателя. Составляющая i_{1x} может рассматриваться как намагничивающая реактивная составляющая тока статора двигателя, а i_{1y} его активная составляющая, идущая на создание момента двигателя.

осуществляется системой трехфазных напряжений U_{A3} , U_{B3} , U_{C3} , которые формируются преобразователем координат ПК на основе сигналов регуляторов РТК и РГЦ и сигнала, пропорционального частоте f_l .

Управляющие и функциональные элементы. Требования высокой точности регулирования и высокого быстродействия, которые предъявляются к современному электроприводу, обуславливают применение замкнутых систем. Только замкнутые системы позволяют осуществить реализацию в электроприводе двух основных принципов:

1. Регулируемая величина на выходе электропривода (скорость, угол, момент и т.д.) должна по возможности точнее повторять задающий (входной) сигнал.

2. Регулируемая величина на выходе электропривода по возможности не должна зависеть от возмущающих воздействий на электропривод. Такими возмущающими воздействиями могут быть напряжение питания, температура, момент нагрузки, временные зависимости параметров и т.д.

Поэтому основным принципом управления является принцип обратной связи, позволяющий осуществить контроль качества регулирования по отклонению управляемого параметра от заданного. Каждый элемент функциональной схемы электропривода описывается в статике и динамике передаточной функцией.

В электроприводе в основном применяются три структуры построения систем уравнения:

1. С промежуточным суммирующим элементом;
2. С независимым регулированием параметров;
3. С подчиненным регулированием.

Из всех перечисленных способов построения преимущественное распространение получили системы с подчиненным регулированием. В них на вход каждого регулятора $W_{p1}(p) - W_{pn}(p)$ подается сигнал с предыдущего каскада (рис. 1), соответствующий задаваемому уровню регулируемой величины, и сигнал с выхода данного каскада, отвечающий фактическому уровню. Важным

достоинством данной структуры является возможность простыми средствами осуществить ограничение любой из координат системы. Для этого достаточно ограничить задание данной координаты.

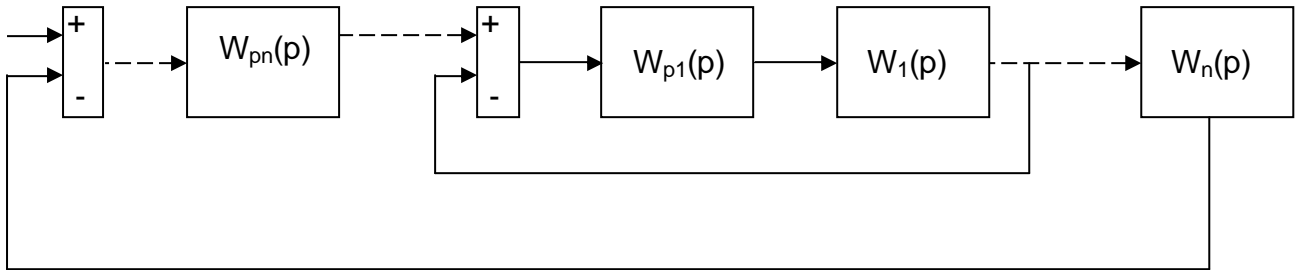


Рис. 1.21 - Структура схемы подчиненного электропривода

Рассмотрим последовательный синтез регуляторов, начиная с внутреннего контура, который принимаем за первый.

Передаточная функция регулятора подбирается так, чтобы при его включении последовательно с соответствующим звеном системы $W_1(p) - W_n(p)$ была скомпенсирована большая постоянная времени T и взамен ее действовала существенно меньшая постоянная времени T_0 .

В системах подчиненного регулирования используются регуляторы четырех типов:

- пропорциональные (П) с передаточной функцией $W_p(p) = k_{II}$;

- интегральные (И), $W_p(p) = \frac{1}{T_0 p} = \frac{k_{II}}{p}$;

- пропорционально-интегральные (ПИ),

$$W_p(p) = \frac{1 + T_1 p}{T_0 p} = \frac{1}{T_0 p} + \frac{T_1}{T_0} = \frac{k_{II}}{p} + k_{PI};$$

- пропорционально-интегро-дифференциальные,

$$W(p) = \frac{(1 + T_1 p)(1 + T_2 p)}{T_0 p} = \frac{1}{T_0 p} + \frac{T_1 + T_2}{T_0} + \frac{T_1 T_2}{T_0} p = \frac{k_{II}}{p} + k_{PI} + k_{D} p.$$

В приведенных выше выражениях:

$$\kappa_{И} = \frac{1}{T_0}, \kappa_{П} = \frac{T_1 + T_2}{T_0}, \kappa_{Д} = \frac{T_1 + T_2}{T_0} \quad - \text{коэффициенты усиления интегрального,}$$

пропорционального и дифференциального регуляторов соответственно.

Рассмотрим последовательность синтеза регуляторов в подчиненных системах электропривода.

Для первого контура результирующее эквивалентное звено, состоящее из исходного звена с передаточной функцией $W_1(p)$ и регулятора с передаточной функцией $W_{р1}(p)$, всегда можно привести к интегрирующему, с передаточной функцией $W_{PE3.1}(p) = \frac{1}{T_0 p}$, то есть регулятор всегда должен быть построен так,

$$\text{чтобы } W_{PE3.1}(p) = W_1(p)W_{р1}(p) = \frac{1}{T_0 p}.$$

Если в основной цепи имеется интегрирующее звено $W_1(p) = \frac{1}{Tp}$, то регулятор должен быть пропорциональным, причем

$$W_{р1}(p) = \kappa_{П}; W_{PE3.1}(p) = \frac{\kappa_{П}}{Tp} = \frac{1}{T_0 p},$$

где $T_0 = \frac{T}{\kappa_{П}}$; при $\kappa_{П} \rightarrow \infty$ постоянная времени T_0 может иметь любое малое

значение. После создания замкнутого контура, его передаточная функция будет соответствовать апериодическому звену с малой постоянной времени

$$W_{зам.1}(p) = \frac{1}{1 + \frac{1}{T_0 p}} = \frac{1}{1 + T_0 p}.$$

Если исходное звено является апериодическим с передаточной функцией $W_1(p) = \frac{1}{1 + Tp}$, то регулятор должен иметь передаточную функцию, соответствующую ПИ-регулятору,

$$W_{р1}(p) = \frac{1 + Tp}{T_0 p} = \frac{1}{T_0 p} + \frac{T}{T_0} = \frac{\kappa_{И}}{p} + \kappa_{П}.$$

Если исходная система представляет собой колебательное звено с передаточной функцией $W_1(p) = \frac{1}{T^2 p^2 + 2T\xi p + 1}$, то в соответствии с изложенным подходом регулятор должен быть ПИД-регулятором с передаточной функцией

$$W_{p1}(p) = \frac{T^2 p^2 + 2T\xi p + 1}{T_0 p} = \frac{T^2}{T_0} p + \frac{2T\xi}{T_0} + \frac{1}{T_0 p} = \kappa_D p + \kappa_I + \frac{\kappa_{II}}{p}.$$

В этом случае передаточные функции разомкнутой и замкнутой системы примут вид:

$$W_{РАМ.1}(p) = \frac{1}{T_0 p}, W_{ЗАМ.1}(p) = \frac{1}{1 + T_0 p}.$$

Таким образом, практически для всех реальных ситуаций первый внутренний контур электропривода с подчиненным управлением можно представить аperiodическим звеном с достаточно малой постоянной времени.

Перейдем к рассмотрению второго контура. Если исходное звено второго контура является интегрирующим с передаточной функцией $W_2(p) = \frac{1}{T_2 p}$, то общая передаточная функция первого и исходного второго звена будет равна:

$$W_{РАЗ.2}(p) = \frac{1}{(T_0 p + 1)T_2 p}.$$

Для таких и более сложных систем, о чем будет сказано ниже, регулятор синтезируется таким образом, чтобы в замкнутом контуре получить желаемую передаточную функцию. В качестве желаемых передаточных функций в системах электропривода в основном используются две:

1. Передаточная функция колебательного звена, настроенного на так называемый технический оптимум (оптимум по модулю, Vietrage-optimum).
2. Передаточная функция колебательного звена, настроенного на так называемый симметричный оптимум.

В первом случае передаточная функция разомкнутой системы должна иметь вид:

$$W_{РАЗ.2}(p) = \frac{1}{2T_0 p(T_0 p + 1)},$$

то есть регулятор должен быть пропорциональным с коэффициентом усиления

$\kappa_{II} = \frac{T_2}{2T_0}$. В этом случае передаточная функция замкнутого контура будет иметь

вид $W_{зам.2} = \frac{1}{2T_0^2 p^2 + 2T_0 p + 1}$. Переходная характеристика такого замкнутого

звена будет иметь следующие параметры:

- перерегулирование $\delta = 4,3\%$;
- время первого согласования $t_1 = 4,71T_0$;
- время переходного процесса $t_p = 8,4T_0$.

Звено, настроенное на оптимум по модулю, не всегда обеспечивает заданное качество переходного процесса по возмущению. Поэтому внешние контуры в электроприводе (контур скорости или угла) часто настраиваются на симметричный оптимум.

Передаточная функция разомкнутой системы в этом случае должна иметь вид:

$$W_{раз.2}(p) = \frac{4T_0 p + 1}{8T_0^2 p^2 (T_0 p + 1)},$$

то есть в качестве регулятора должен быть использован ПИ-регулятор с передаточной функцией:

$$W_{рег.2}(p) = \frac{T_2(4T_0 p + 1)}{8T_0^2} = \frac{T_2}{2T_0} + \frac{T_2}{8T_0^2 p}.$$

Передаточная функция замкнутого контура, настроенного на симметричный оптимум, имеет вид:

$$W_{зам.2}(p) = \frac{1}{8T_0^2 p^2 + 4T_0 p + 1}.$$

Переходная характеристика системы, настроенной на симметричный оптимум, имеет следующие параметры:

- перерегулирование $\delta = 4,3\%$;
- время первого согласования $t_1 = 3,1T_0$;
- время переходного процесса $t_p = 16,5T_0$.

Если исходным звеном второго контура является аperiodическое звено с передаточной функцией $W_2(p) = \frac{1}{1+T_2p}$, передаточная функция разомкнутого контура с учетом передаточной функции первого контура будет иметь вид:

$$W_{PA3.2}(p) = \frac{1}{(T_0p+1)(T_2p+1)}.$$

В этом случае для реализации в этом контуре оптимума по модулю регулятор должен иметь передаточную функцию следующего вида:

$$W_{PEF.2}(p) = \frac{T_2}{2T_0} + \frac{1}{2T_0p}.$$

Содержательный модуль 1.2. Электрические расчеты и анализ типовых узлов автоматического управления пуском и торможением двигателей

Лекция № 4

2.1. Принципы автоматического управления пуском и торможением двигателей

Наибольшее распространение во всех отраслях промышленности получили электроприводы, обеспечивающие автоматическое управление процессами пуска, торможения и реверса двигателей. Их долевое участие в общем количестве используемых в Украине электроприводов превышает 80%. В таких системах применяют контактные и бесконтактные электрические аппараты релейного действия. В силовых цепях, которые питают обмотки двигателей, используются электромагнитные контакторы переменного и постоянного тока, электромагнитные пускатели, тиристорные переключатели. В цепях управления различные реле времени, напряжения, тока, частоты, мощности и др. Команды на выполнение той или иной операции подаются с помощью кнопочных постов управления и т.п. Кроме этого сигналы на пуск, остановку, реверсирование или изменение скорости двигателя могут поступить

в систему управления от путевых или конечных выключателей, датчиков давления, температуры и других датчиков, контролирующих работу технологических машин.

В рассматриваемой группе электроприводов автоматизация процесса пуска наиболее просто осуществляется для АД с короткозамкнутым ротором: после подачи команды на пуск операции управления сводятся к включению обмоток двигателя на полное напряжение сети, т.е. к прямому пуску двигателя. Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором и синхронные двигатели большой мощности (больше 100кВт) запускаются при пониженном напряжении.

При пуске ДПТ и АД с фазным ротором автоматически выключаются ступени пускового реостата из цепи протекания тока якоря или ротора соответственно.

Автоматизация процесса торможения работающего двигателя при любом виде электрического торможения предусматривает выполнение двух основных операций управления: 1 – после подачи команды на торможение совершаются переключения в силовых цепях двигателя, приводящие к изменению направления вращающего момента двигателя, т.е. делающие его тормозным; 2 – в конце торможения при скорости близкой к нулю, двигатель, тормозящийся для остановки, отключается от сети и затормаживается механическим тормозом. В другом случае в главных цепях производятся переключения, необходимые для реверса двигателя, т.е. для разгона его в противоположном направлении.

Системы автоматического управления пуском, торможением и реверсом, реализующие указанные выше операции, конструктивно выполняют в виде комплектных стандартизованных устройств – станций управления. Кроме названного, станции управления обеспечивают возможность регулирования скорости двигателя, т.е. различные по величине скорости установившегося режима работы двигателя. На станциях управления устанавливаются аппараты электрической защиты главных цепей и цепей управления двигателем.

Командоаппараты, пускорегулировочные и тормозные резисторы, токоограничивающие реакторы и другие элементы располагают чаще всего вне станций управления.

У электрических аппаратов станций управления предусмотрены запасные контакты, которые могут быть использованы для сигнализации и различных блокировок. Возможно также подключение в цепи управления станций контактов конечных выключателей, технологических датчиков и аппаратов других автоматических устройств.

В электрических схемах станций управления широко применяются типовые узлы управления и защиты. Принципы построения типовых узлов рассмотрим на примере реостатного пуска ДПТ с независимым возбуждением с двумя ступенями пускового сопротивления. Схема включения двигателя приведена на рис. 2.1а, диаграмма скорости двигателя ω и тока якоря $I_{я}$ – на рис.2.1б.

В первую очередь подключается к источнику напряжения U_B обмотка возбуждения LM. Ток возбуждения I_B , протекая по LM, создает магнитный поток Φ . После этого к источнику якорного напряжения U подключается якорная цепь двигателя.

При разомкнутых контактах контакторов ускорения КМ2 и КМ3 в момент времени $t=0$ замыкается контакт контактора линейного КМ1. Пусковой ток якоря $I_{я1}$ протекает по обеим ступеням пускового сопротивления $R_{дп1}$ и $R_{дп2}$. Если величина пускового сопротивления $R_{п}=R_{дп1}+R_{дп2}$ выбрана

правильно, то пусковой ток $I_{я1} = \frac{U}{R_{я} + R_{д} + R_{дп1} + R_{дп2}}$ не будет превышать

допустимого значения $I_{я1} \leq I_{я доп} \leq 2,5 I_{я н}$. На якорь двигателя при скорости $\omega=0$ начинает действовать пусковой момент $M_{п}$. Если $M_{п}$ больше момента сопротивления M_c , момент динамический имеет положительную величину $M_{д}>0$, то в соответствии с уравнением движения электропривода при пуске

$M_{\Gamma} - M_C = J \frac{d\omega}{dt}$, величина углового ускорения $\frac{d\omega}{dt}$ будет положительна и скорость вращения якоря двигателя ω будет возрастать.

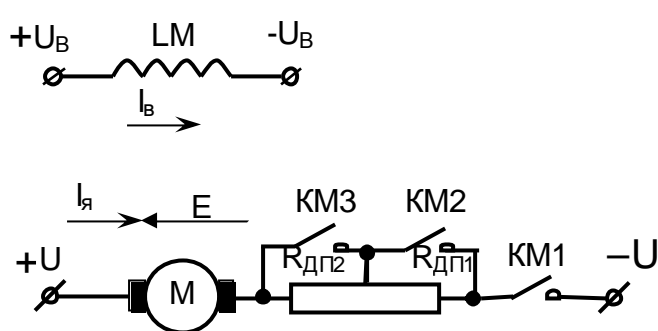
В обмотке якоря двигателя, вращающейся в магнитном потоке Φ , будет находиться э.д.с. вращения $E = k\omega\Phi$. Как следует из схемы включения двигателя на рис. 2.1а, э.д.с. вращения E по отношению к источнику якорного напряжения U направлена встречно. Поэтому с увеличением ω будет

увеличиваться E и уменьшаться якорный ток $I_{Я1} = \frac{U - E}{R_{Я} + R_{Д} + R_{ДП1} + R_{ДП2}}$. С

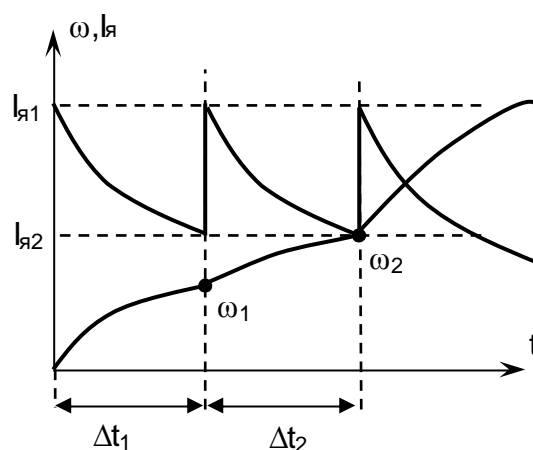
уменьшением $I_{Я}$ будет уменьшаться и вращающий момент двигателя $M = k\Phi I_{Я}$. Это, в свою очередь, приведет к уменьшению динамического момента

$M_{Д} = M - M_c$ и ускорения $d\omega/dt$. Как следует из диаграммы на рис. 2.1б по истечении промежутка времени Δt_1 двигатель достиг скорости ω_1 , а якорный ток величины $I_{Я2}$. Вращающий момент двигателя M стал равным M_c , т.е. $M_{Д} = 0$ и поэтому увеличение скорости вращения якоря двигателя прекратилось.

Двигатель из переходного режима работы с $\frac{d\omega}{dt} > 0$ при $\omega = \omega_1$ перешел в установившийся режим с $\frac{d\omega}{dt} = 0$.



а)



б)

Рис. 2.1 - Реостатный пуск ДПТ НВ в две ступени:

а) схема включения двигателя; б) диаграмма скорости двигателя ω и тока якоря $I_{Я}$

Для того, чтобы продолжить разгон, необходимо замкнуть контакт первого контактора ускорения КМ2 и шунтировать первую ступень пускового сопротивления $R_{ДП1}$. При этом якорный ток практически мгновенно увеличится до значения $I_{Я1}$, что приведет к появлению положительного $M_{Д}$ и росту скорости. По истечении промежутка времени Δt_2 двигатель достигнет скорости ω_2 , а якорный ток уменьшится до величины $I_{Я2}$. Двигатель перейдет в установившийся режим работы со скоростью ω_2 . Для продолжения разгона необходимо замкнуть контакт второго контактора ускорения КМ3 и шунтировать $R_{ДП2}$. Вновь увеличится $I_{Я}$, появится $M_{Д} > 0$ и продолжится рост скорости, который прекратится при $M = M_c$.

Из графиков изменения во времени скорости и тока ДПТ при реостатном пуске с 2 ступенями пускового сопротивления видно, что автоматическое выключение (шунтирование) ступеней пускового сопротивления может производиться: 1- через определенные промежутки времени ($\Delta t_1, \Delta t_2$); 2- при определенных значениях скорости (ω_1, ω_2); 3- при определенной величине тока $I_{Я2}$.

Таким образом, автоматическое управление пуском, суть которого заключается в шунтировании ступеней пускового реостата, может быть осуществлено: 1 – в функции времени; 2 – в функции скорости; 3 - в функции тока якоря.

Управление в функции времени предполагает наличие в схеме автоматического управления реле времени, настраиваемых на отсчет заданных выдержек времени.

Управление в функции скорости производится при помощи реле, контролирующих скорость двигателя непосредственно или косвенно.

Управление в функции тока реализуется применением реле минимального тока. Все аппараты подают команды на включение контакторов ускорения.

Управление торможением может производиться в функции тех же самых величин и средств автоматизации, что и при пуске.

Все сказанное справедливо для ДПТ с последовательным возбуждением и АД с фазным ротором.

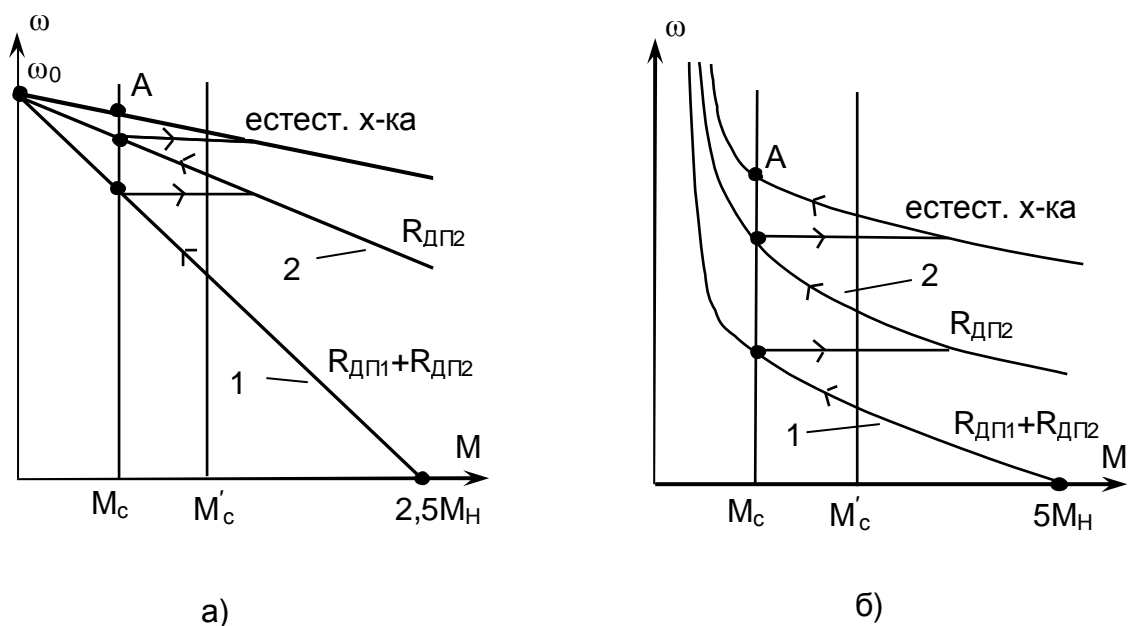


Рис. 2.3 - Механические характеристики двигателя при пуске:
 а) механические характеристики ДПТ НВ; б) механические характеристики ДПТ ПВ

При подаче напряжения на главные цепи и цепи управления включается электромагнитное реле времени первой ступени КТ1 и, размыкая свой контакт, исключает возможность включения контакторов ускорения КМ2 и КМ3.

При нажатии на кнопку SB1 включается контактор КМ1, который своим главным контактом подключает к напряжению якорную цепь двигателя, замыкающими контактами шунтирует SB1 (КМ1 становится на самопитание) и подготавливает цепь включения КМ2, КМ3, а размыкающим контактом разрывает цепь питания катушки реле КТ1 и реле начинает отсчет выдержки времени. Двигатель начинает разгоняться по реостатной механической характеристике 1. При протекании пускового тока по $R_{дп1}$ срабатывает реле времени второй ступени КТ2, т.к. падение напряжения от пускового тока на $R_{дп1}$ велико. Контакт реле КТ2 размыкается в цепи питания катушки контактора КМ3. Реле времени КТ1 по истечении заданной выдержки времени отключается и замыкает свой контакт. Получает питание катушка КМ2. Контактор КМ2 включается и закорачивает $R_{дп1}$. Двигатель переходит на механическую реостатную характеристику 2. Катушка реле КТ2 теряет

питание. Реле КТ2 отсчитав заданную выдержку времени отключается и замыкает свой контакт. Включается КМ3, закорачивает $R_{ДП2}$ и двигатель переходит на естественную характеристику. Достоинством управления в функции времени является простота и надежность реле времени, удобство регулировки их уставок, применение однотипных реле для двигателей различной мощности. Кроме того, при увеличении M_c до величины M_c' и той же выдержке времени реле РУ1 двигатель на первой характеристике разгонится до меньшей скорости, но бросок момента при переключении будет большим. Поэтому средний динамический момент при пуске останется приблизительно тем же и время пуска почти не изменится. При управлении в функции времени в отличие от управления в функции скорости или тока, отсутствует опасность «застревания» двигателя на первой характеристике при $M_c' > M_c$. Все это обусловило широкое распространение управления в функции времени.

Типовой узел, обеспечивающий автоматический пуск ДПТ с независимым возбуждением в функции скорости в две ступени, механические характеристики двигателя и диаграмма напряжения на зажимах якоря двигателя приведены на рис. 2.4.

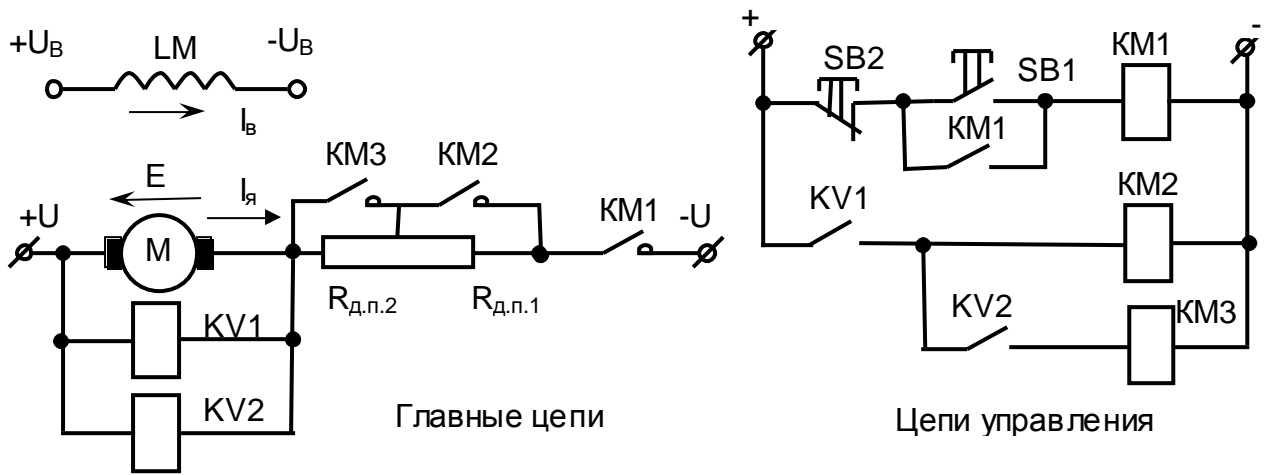
Катушки реле напряжения KV1 и KV2 включены на зажимы якоря двигателя. Напряжение на зажимах якоря $U_{Я}$ отличается от E только на небольшое по величине падения напряжение от тока якоря на якорном сопротивлении $I_{Я} \cdot R_{ЯЦ}$. Следовательно KV1 и KV2 являются аппаратами, контролирующими э.д.с. вращения двигателя. Поскольку э.д.с. при постоянном магнитном потоке пропорциональна скорости вращения двигателя $E = k\Phi_n\omega$, то рассматриваемый узел осуществляет управление пуском в функции скорости при ее косвенном контроле.

При нажатии на SB1 включается КМ1. Напряжение на катушках KV1 и KV2 мало и равно падению напряжения на якорном сопротивлении броска пускового тока $I_{П}R_{ЯЦ}$. Поэтому KV1 и KV2 не срабатывают. Контактors КМ2 и КМ3 отключены и в цепь якоря введено $R_{ДП1} + R_{ДП2}$. Двигатель запускается по характеристике 1. По мере увеличения скорости двигателя возрастает E и $U_{Я}$.

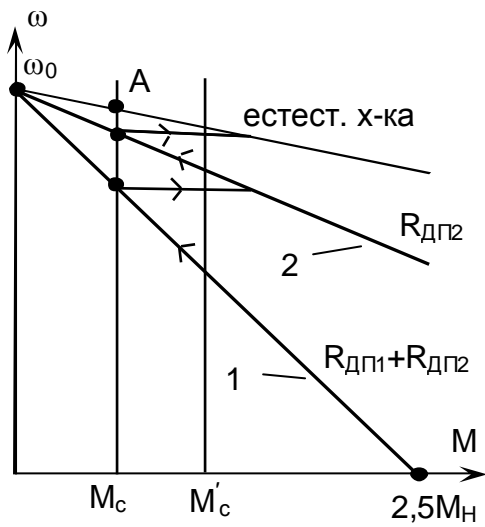
При $U_{я1} = U_{ср. KV1}$ включается KV1 и включает KM2, который своим главным контактом закорачивает первую ступень сопротивления $R_{ДП1}$. Двигатель переходит на характеристику 2. Скорость двигателя продолжает расти, поэтому возрастает и э.д.с. При $U_{я2} = U_{ср. KV2}$ включается KV2 и включает контактор KM3. Шунтируется вторая ступень сопротивления $R_{ДП2}$ и двигатель выходит на естественную характеристику. Типовой узел, обеспечивающий автоматический пуск ДПТ с независимым возбуждением в функции тока якоря $I_{я}$ приведен на рис. 2.5.

Он применяется при разгоне двигателя до скорости выше основной путем ослабления магнитного потока. Это позволяет расширить диапазон регулирования скорости. На рисунке не показаны цепи управления контакторами KM1, KM2, KM3. Пуск до основной скорости может осуществляться одним из рассмотренных выше способов. Контроль $I_{я}$ осуществляется токовым реле КА.

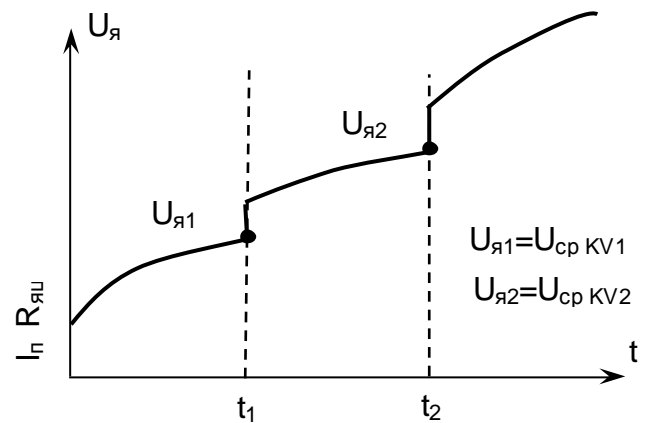
Работа типового узла начитается после включения контактора KM3 при выходе двигателя на естественную характеристику. При замыкании главного контакта KM3 от броска $I_{я}$ срабатывает реле КА и замыкает свой контакт, шунтирующий реостат возбуждения $R_{ДВ}$. До этого он был зашунтирован размыкающим контактом KM3. Следовательно магнитный поток двигателя Φ сохраняется равным Φ_H и двигатель продолжает разгон по естественной характеристике. Ток якоря уменьшится, когда $I_{я}$ снизится до величины тока отключения КА $I_{возв КА}$, реле отключается, размыкает свой контакт и последовательно с LM вводится $R_{ДВ}$. Происходит ослабление потока Φ и рост скорости ω . При этом ток якоря увеличивается и, когда он достигнет значения тока включения КА $I_{сраб КА}$, реле включится, контакт замкнется. Начинается усиление Φ и снижение $I_{я}$. Скорость M будет продолжать расти,



а)

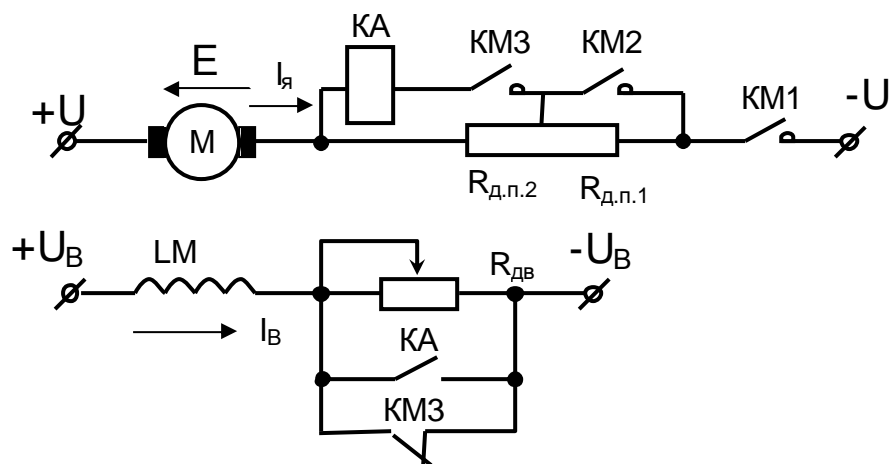


б)

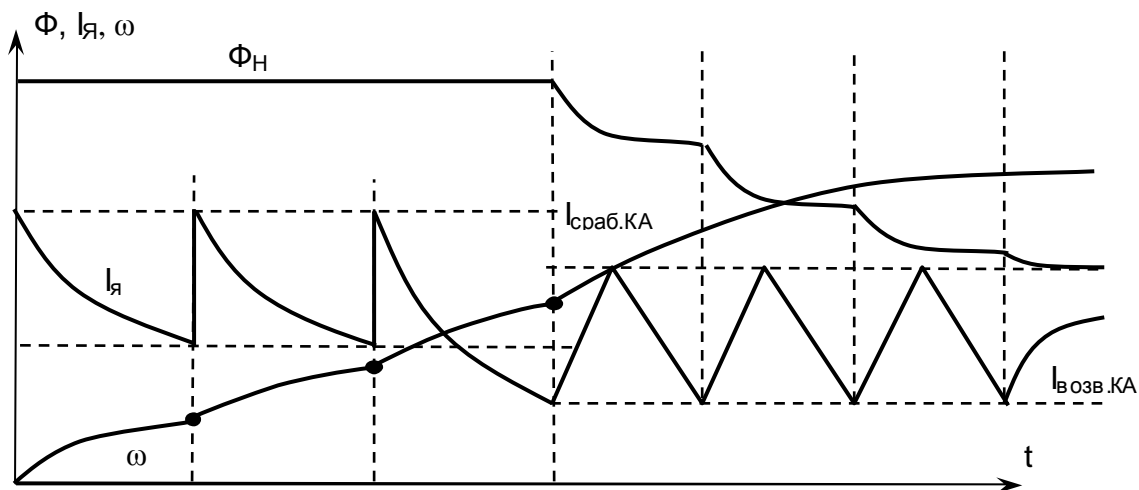


в)

Рис. 2.4 - Типовой узел управления пуском ДПТ НВ в функции скорости:
 а) схема включения двигателя; б) механические характеристики двигателя;
 в) диаграмма напряжения на зажимах якоря



а)



б)

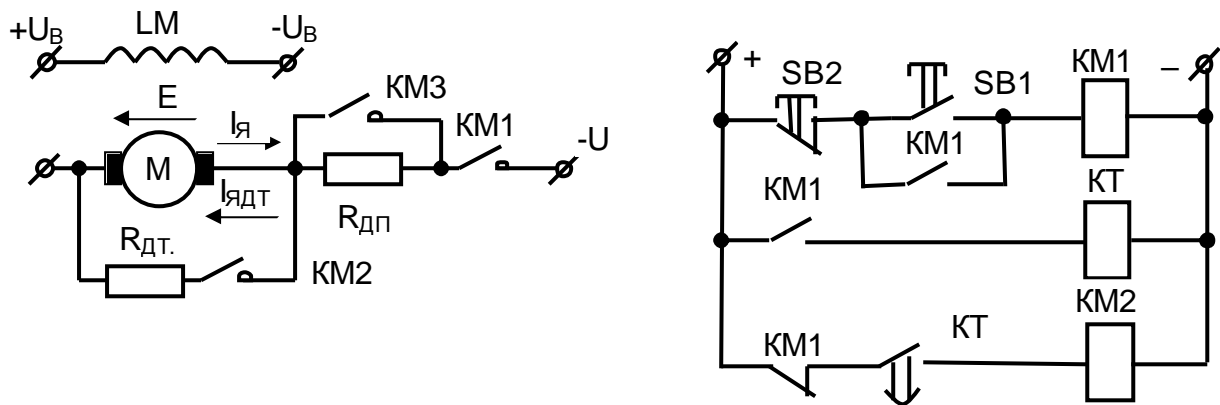
Рис. 2.5 - Типовой узел управления пуском ДПТ НВ в функции тока якоря: а) схема включения двигателя; б) диаграмма Φ , $I_{я}$, ω

т.к. за счет увеличения $I_{я}$ вращающий момент двигателя будет больше момента сопротивления $M > M_c$. При спадаении $I_{я}$ до величины $I_{возв. KA}$ реле вновь разомкнет свой контакт, что повлечет за собой ослабление Φ и т.д. Реле КА срабатывает несколько раз, прежде чем двигатель достигнет скорости, заданной положением ползунка реостата $R_{ДВ}$.

Лекция 6

2.3. Типовые узлы схем автоматического управления торможением ДПТ

Управление торможением двигателей производится в функции времени, скорости или тока с применением тех же технических средств, что и при пуске. Автоматизация процесса торможения при любом его виде предусматривает выполнение двух основных операций:



а)

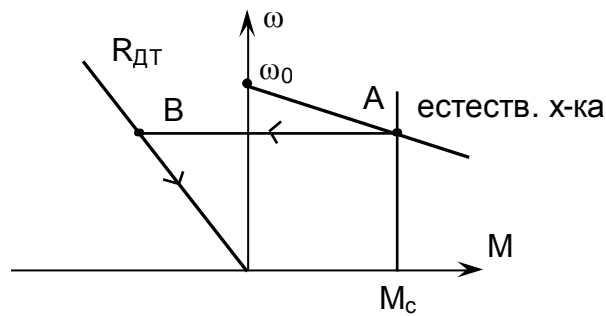


Рис. 2.6 - Типовой узел управление динамическим торможением ДПТ НВ в функции времени: а) схема включения двигателя; б) механические характеристики

1) после подачи команды на торможение в силовых цепях работающего двигателя производятся переключения, в результате которых изменяется направление момента двигателя;

2) в конце торможения при скорости близкой к нулю, двигатель автоматически отключается от сети, либо в силовых цепях производятся переключения, необходимые для реверса.

Типовой узел, обеспечивающий автоматическое управление динамическим торможением ДПТ с независимым возбуждением в функции времени приведен на рис. 2.6. Пуск двигателя показан условно в одну ступень. Управление КМ3 при пуске может осуществляться одним из ранее рассмотренных методов. По окончании пуска двигатель работает в точке А на естественной характеристике. Направление э.д.с. вращения E и тока якоря $I_{я}$ на рис. 2.6.а показано для двигательного режима работы.

При пуске замыкающий контакт КМ1 подает питание на катушку реле динамического торможения КТ и реле срабатывает. Замыкающий контакт КТ в цепи питания катушки контактора динамического торможения КМ2 замкнется. Однако КМ2 не включится, т.к. в цепи питания его катушки разомкнут контакт КМ1.

При нажатии на кнопку «стоп» SB2 отключится контактор КМ1 и якорная цепь двигателя будет отключена от источника якорного напряжения U . Потеряет питание катушка реле КТ. Однако реле КТ, электромагнитное реле времени, останется во включенном состоянии и будет вести отсчеты выдержки времени. Включится контактор КМ2 и к зажимам якоря двигателя будет подключено сопротивление динамического торможения $R_{дт}$. В образовавшемся контуре под действием э.д.с. вращения E будет протекать ток динамического торможения $I_{я дт}$, направленный встречно к току двигательного режима $I_{я}$. Поэтому изменит направление и станет тормозным вращающий момент двигателя. Двигатель из точки А перейдет в точку В на характеристике динамического торможения и его скорость будет снижаться. По окончании отсчета выдержки времени реле КТ отключится, разомкнет свой контакт в цепи питания катушки КМ2 и отключит его.

Управление торможением в функции времени применяется только при реактивном M_c . Уставка КТ должна быть равной или немного большей времени

торможения. При активном M_c его увеличение уменьшает действительное время торможения. За время уставки реле КТ. Двигатель останавливается и под действием активного M_c начинает разгон в противоположном направлении.

Автоматическое управление динамическим торможением ДПТ с независимым возбуждением при активном M_c осуществляется в функции скорости при ее прямом или косвенном контроле. Схема типового узла приведена на рис. 2.7.

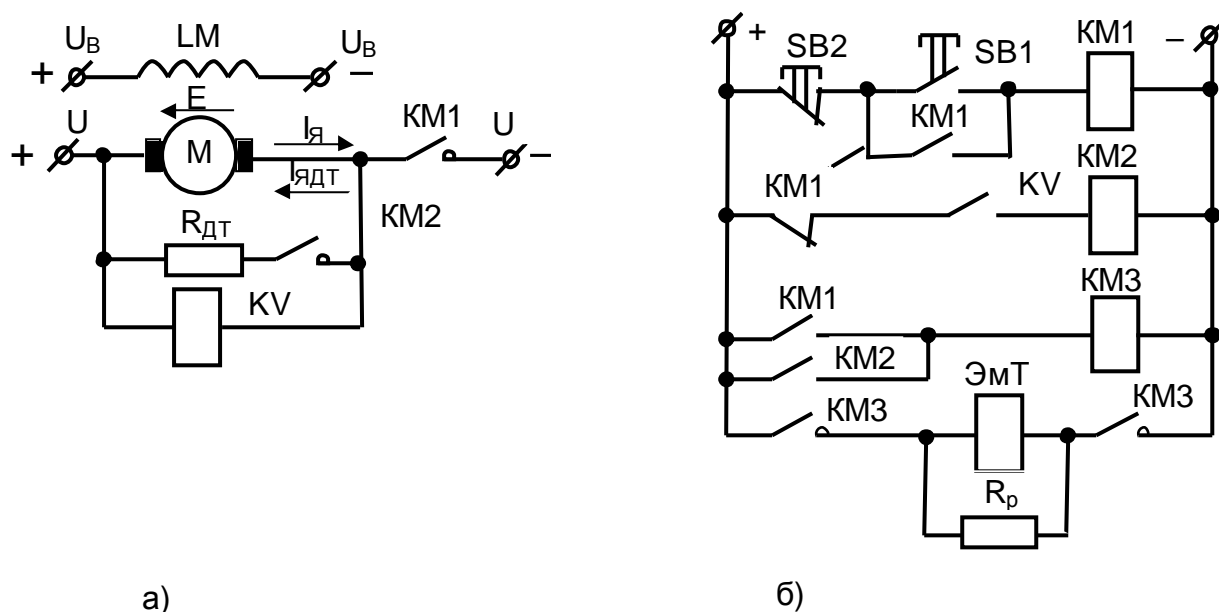


Рис. 2.7 - Типовой узел управления динамическим торможением ДПТ НВ в функции скорости: а) главные цепи; б) цепи управления

Скорость двигателя определяется косвенно по величине э.д.с. вращения E . Контроль э.д.с. осуществляет реле напряжения KV . Катушка KV включена на зажимы якоря двигателя. Пусковые сопротивления и контакторы ускорения на схеме не показаны. Реле KV срабатывает во время пуска при $U_{я}=0,6 \div 0,7U_H$. При отключении $KM1$ включается $KM2$. На зажимы якоря подключается $R_{ДТ}$ и двигатель тормозится. Когда скорость станет достаточно малой, KV отключится и отключит $KM2$. Вал двигателя свободен, когда электромагнит механического тормоза $ЭМТ$ получает питание. Поэтому тормозной контактор

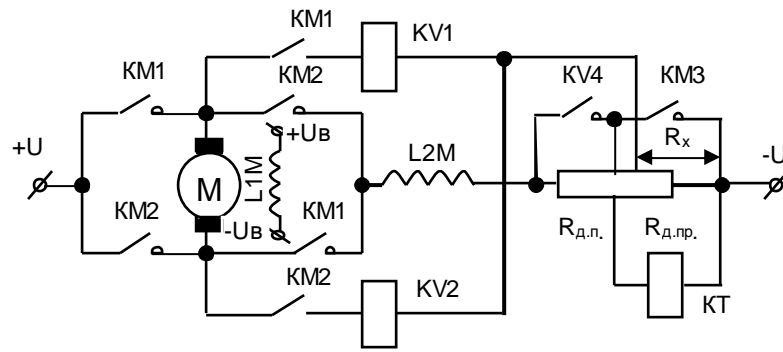
КМЗ включен как в двигательном режиме, так и в режиме электрического торможения.

При реверсивной схеме включения ДПТ с независимым или последовательным возбуждением автоматическое управление процессом торможения противоключением осуществляется в функции скорости при косвенном контроле ее величины по э.д.с. вращения двигателя. Схема включения двигателя приведена на рис. 2.8а. На ней показаны обмотки независимого L1M и последовательного L1M возбуждения. Механические характеристики, соответствующие схеме включения ДПТ НВ, приведены на рис. 2.8б, а схема цепей управления на рис. 2.8в. В ней используется не кнопочное, а более удобное командоконтроллерное управление. Вертикальные штриховые линии означают фиксированные положения рукоятки командоконтроллера (КК). В данном случае их три: 0 – нулевое (среднее) положение; В – вперед; Н – назад. Точка на штриховой линии под контактом означает, что контакт в данном положении замкнут. В нашем случае контакты командоконтроллера К1 и К2 в нулевом положении рукоятки разомкнуты; в положении «вперед» замкнут К1, а К2 разомкнут; в положении «назад» - наоборот.

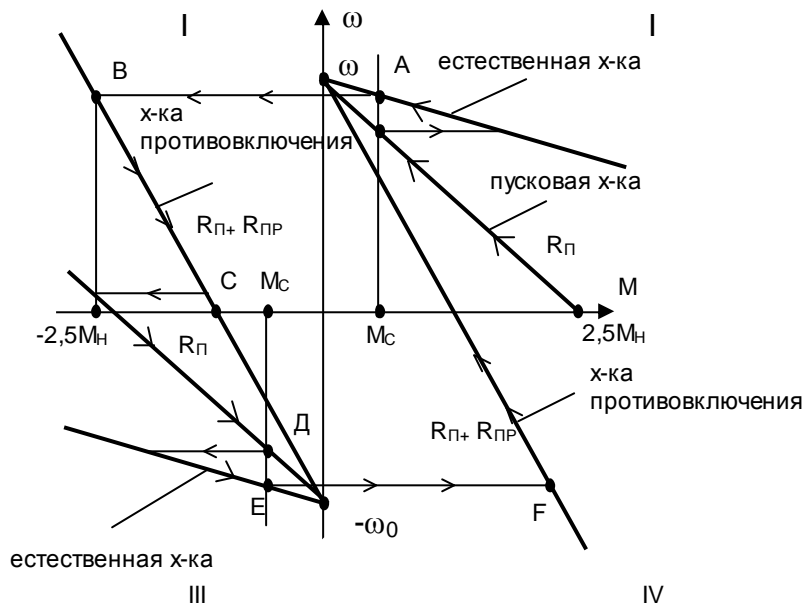
Пуск двигателя показан условно в одну ступень в функции времени. Для пуска двигателя в направлении «вперед» необходимо перевести рукоятку командоконтроллера из положения «0» в положение «В». Замкнется контакт К1 командоконтроллера и получит питание катушка контактора «вперед» КМ1. Контактор КМ1 срабатывает и своими главными контактами подключает якорь двигателя к источнику напряжения U . Катушки контакторов противоключения КМЗ и ускорения КМ4 питания не получают, контакторы отключены и их главные контакты разомкнуты. Пусковой ток протекает по $R_{ДП}$ и $R_{ДПР}$. Поэтому двигатель начинает разгон по характеристике противоключения в I квадранте. Появляется падение напряжения от пускового тока на $R_{ДПР}$ и поэтому получает питание катушка реле КТ. Реле ускорения КТ включится и разомкнет свой контакт в цепи питания катушки КМ4.

Замыкающий контакт КМ1 подает питание на катушку реле противовключения «вперед» KV1. Реле KV1 срабатывает и своим замыкающим контактом подает питание на катушку КМ3. Контакт КМ3 срабатывает и своим главным контактом шунтирует $R_{ДПР}$. Двигатель с характеристики противовключения переходит на пусковую характеристику. Одновременно с этим теряет питание катушка КТ и реле начинает отсчет выдержки времени. По окончании выдержки времени реле КТ отключится, его контакт в цепи питания катушки КМ4 замкнется и контактор ускорения КМ4 сработает. Главный контакт КМ4 замкнется и зашунтирует $R_{ДП}$. Двигатель перейдет на естественную характеристику, где будет работать в точке А.

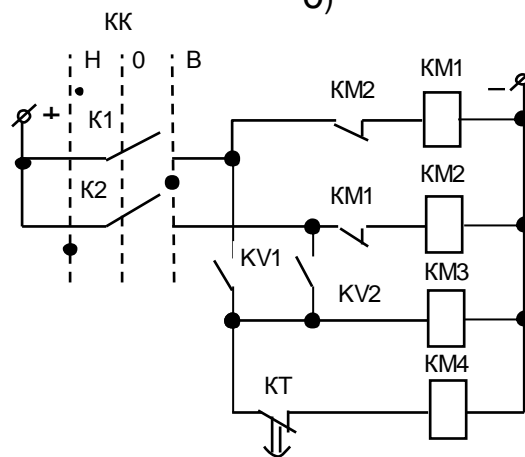
Для перевода двигателя в режим торможения противовключением необходимо рукоятку командоконтроллера из положения «В» перевести в положение «Н». При переходе рукоятки через положение «0» оба контакта командоконтроллера оказываются разомкнутыми, поэтому катушки КМ1, КМ3, КМ4 теряют питание и контакторы отключаются. В цепь протекания якорного тока включаются $R_{ДП}$ и $R_{ДПР}$, т.е. двигатель подготавливается к режиму торможения противовключением. В положении рукоятки «Н» замыкается контакт К2. Получает питание катушка контактора «назад» КМ2 и контактор КМ2 срабатывает. Главные контакты КМ2 замыкаются и изменяют полярность напряжения на зажимах якоря двигателя. Изменяется направление якорного тока и вращающего момента двигателя. Он становится тормозным. Двигатель из точки А переходит в точку В на характеристике торможения противовключением. Замыкающий контакт КМ2 в цепи питания катушки реле противовключения «назад» KV2 замкнется, однако реле KV2 не включится. Это обеспечивается подключением правого по схеме вывода катушки KV2, т.е. величиной R_{xx} . Катушки КМ3 и КМ4 питание не получают, контакторы отключены и двигатель тормозится по характеристике



а)



б)



в)

Рис. 2.8 - Типовой узел управления торможением противовключением ДПТ:
а) реверсивная схема включения ДПТ; б) механические характеристики ДПТ с независимым возбуждением; в) схема цепей управления противовключения.

Реле КТ включено и его контакт в цепи питания катушки КМ4 разомкнут.

С уменьшением скорости двигателя напряжение на катушке КV2 увеличивается. При скорости, близкой к нулю, КV2 включится и своим замыкающим контактом подает питание на катушку КМ3. Контакт КМ3 сработает и своим главным контактом зашунтирует $R_{ДПР}$. Двигатель перейдет на пусковую характеристику. Потеряет питание катушка КТ и реле начнет отсчет выдержки времени. Двигатель по пусковой характеристике затормозится и сразу же начнет разгон в направлении «назад». По окончании выдержки времени КТ отключится и включит КМ4. Главный контакт КМ4 зашунтирует $R_{ДП}$, двигатель перейдет на естественную характеристику, где будет работать в точке Е. Для ДПТ с последовательным возбуждением процессы аналогичны.

Лекция 7

2.4. Типовые узлы схем автоматического управления пуском и торможением двигателей переменного тока

Графики изменения во времени скорости и тока двигателя при пуске на рис. 2.1.б, построенные для ДПТ НВ справедливы и для АД с фазным ротором, т.к. рабочая часть механической характеристики АД линейна как и механическая характеристика ДПТ с независимым возбуждением. С ростом сопротивления в цепи ротора наклон рабочей части характеристик к оси абсцисс увеличивается. Поэтому автоматическое управление пуском и торможением АД с фазным ротором осуществляется в функции тех же величин, что и ДПТ.

Типовой узел, обеспечивающий автоматический пуск АД с фазным ротором в две ступени в функции времени, приведен на рис. 2.9.

Цепи управления питаются от сети постоянного тока. При большой частоте включения двигателя используют контакторы переменного тока с катушками постоянного тока и электромагнитные реле времени, электрические аппараты постоянного тока. Схема отличается от схемы управления пуском

ДПТ лишь тем, что катушка реле времени КТ2 включена в цепь управления через размыкающий контакт КМ1. Таким образом КТ2 включается при подаче напряжения на схему, а отсчёт выдержки времени КТ2 начинается с момента размыкания контакта контактора КМ2.

Для СД всегда применяют асинхронный пуск. Поэтому в статорных цепях СД осуществляются так же переключения, как и при пуске АД: – статорные обмотки включаются на полное напряжение (прямой пуск) либо на пониженное напряжение с последующим переключением в функции времени на полное.

Специфическая особенность пуска СД – управления подачей в обмотку возбуждения постоянного тока от возбудителя. В качестве последних используют генераторы постоянного тока или тиристорные преобразователи. Для быстроходных СД вал возбудителя соединяют с валом двигателя, для тихоходных СД привод возбудителя выполняют на основании АД с короткозамкнутым ротором.

Если позволяют питающая сеть и двигатель, то применяют прямой пуск с постоянно подключённым возбудителем при M_c на валу СД, не превышающем $0,4M_n$. Если $M_c > 0,4M_n$, то возбудитель подключается на подсинхронной скорости.

При пуске на пониженном напряжении различают: «лёгкий» пуск, при котором возбуждение подаётся до включения обмотки статора на полное напряжение (при небольшом M_c) и «тяжёлый» пуск – подача возбуждения происходит при полном напряжении на обмотке статора (при значительном M_c).

На рисунке 2.10.а – схема прямого пуска с наглухо подключённым возбудителем G. Управление пуском состоит во включении линейного контактора КМ1. По мере разгона M напряжение G растёт, растёт и ток возбуждения. При подсинхронной скорости он оказывается достаточным для вхождения M в синхронизм.

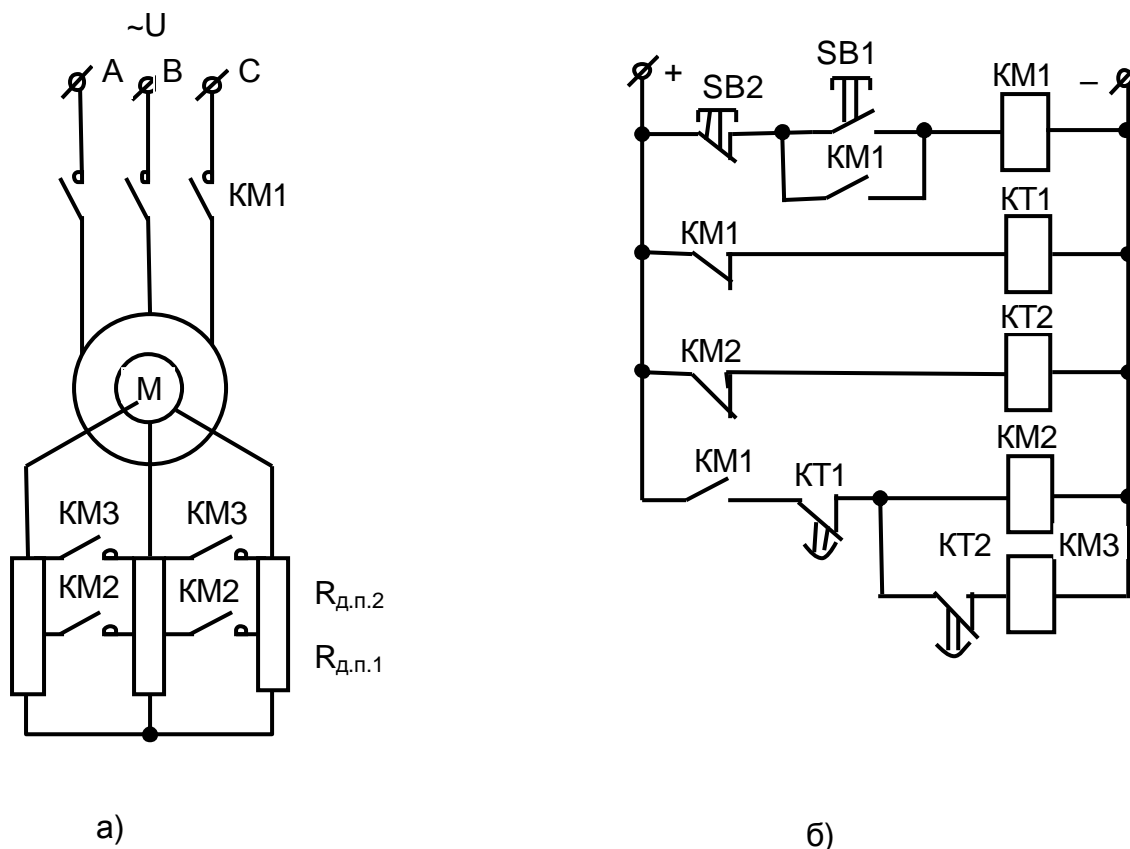


Рис. 2.9 - Типовой узел управления пуском: а) главные цепи; б) цепи управления

Схемы на рисунке 2.10.б и 2.10.в применяют при более тяжёлых условиях пуска. Начинается пуск с включения $KM1$. Обмотка возбуждения LM либо замкнута на разрядное сопротивление R_p , либо подключена к возбудителю последовательно с R_p . Подачей возбуждения можно управлять в функции скорости (скольжения) или тока статора M . Первый способ рис. 2.10.б. реализуют при помощи электромагнитного реле времени KT . Его катушка включена через диод VD на часть R_p . При подключении обмотки статора M к сети в обмотке возбуждения наводится переменная э.д.с. По катушке KT начнёт протекать выпрямленный диодом ток $i_{кам}$, в виде импульсов, амплитуда и частота которых пропорциональны скольжению s . В самом начале пуска, когда $s=1$, амплитуды импульсов тока $i_{кам}$ достаточно велики, а временные интервалы между ними малы, поэтому KT включится. По мере разгона M амплитуда импульсов уменьшается, а временные интервалы между ними увеличиваются. При подсинхронной скорости эти интервалы станут равными времени выдержки и KT отключится. Его

контакт замкнётся и включит КМ2. Из-за разброса выдержек КТ схема не обеспечивает чёткого вхождения M в синхронизм.

В основном применяют управление в функции тока статора M (рис. 2.10.в.). Токовое реле КА получает питание от трансформатора тока ТА, включённого в фазу статорной цепи. Известно, что при асинхронном пуске ток статора в зоне подсинхронной скорости резко уменьшится. Это обстоятельство и используют для фиксации момента подачи возбуждения. При нажатии на SB1 срабатывает КМ1. От броска пускового тока срабатывает и КА. Его размыкающий контакт в цепи катушки КМ2 размыкается, а замыкающий контакт включает блокировочное реле КV. Реле КV становится на самопитание и подготавливает цепь включения КМ2. На подсинхронной скорости ток статора снижается, КА отключается. Включается КМ2. Его контакты закорачивают R_p и катушку КА, чтобы реле не сработало от броска тока статора при вхождении M в синхронизм.

Типовой узел, обеспечивающий автоматическое управление динамическим торможением АД с фазным ротором в функции времени, приведен на рис. 2.11.

Узел применяется при отсутствии цепи постоянного тока. Две обмотки статора питаются через выпрямитель US. Управление пуском условно показано в одну ступень в функции времени. При работе M включены КМ1 и КМ2. Реле времени КТ2 также включено и его контакт в цепи катушки КМ3 замкнут. При нажатии на SB2 контакторы КМ1 и КМ2 отключаются. Статор отключается от сети. В ротор вводится $R_{ДП}$. Замыкающий контакт SB2 включает КМ3, который своими главными контактами подключает две обмотки статора к выпрямителю US. Двигатель переходит в режим динамического торможения. Теряет питание катушка КТ2. После окончания выдержки времени размыкается замыкающий $R_{ДТ}$ в цепи катушки КМ3 и КМ3 отключается. Торможение заканчивается. Условия применения типового узла такие же, как и для ДПТ. При наличии сети постоянного тока обмотки статора питаются непосредственно от сети через добавочное сопротивление и два замыкающих главных контакта КМ3.

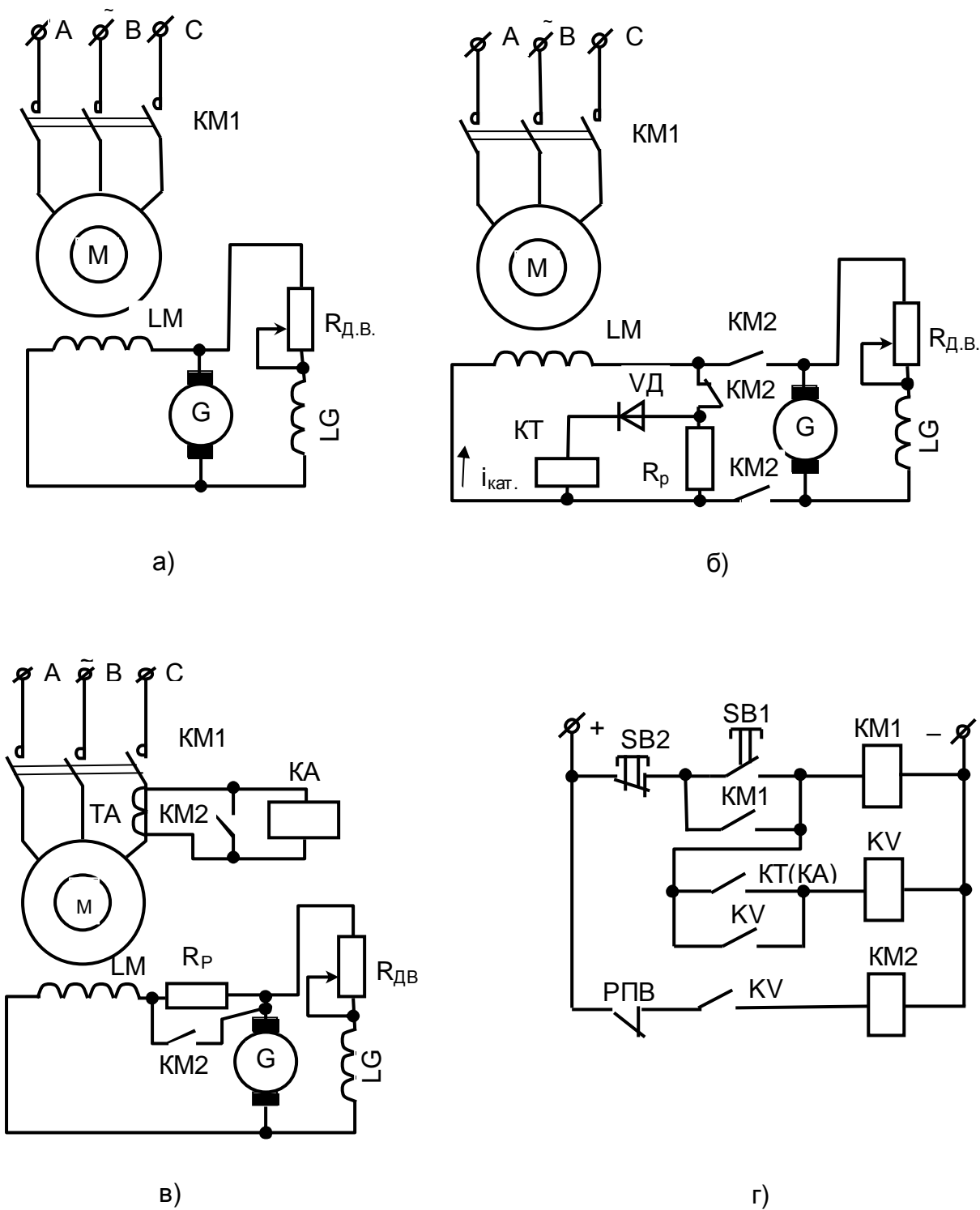
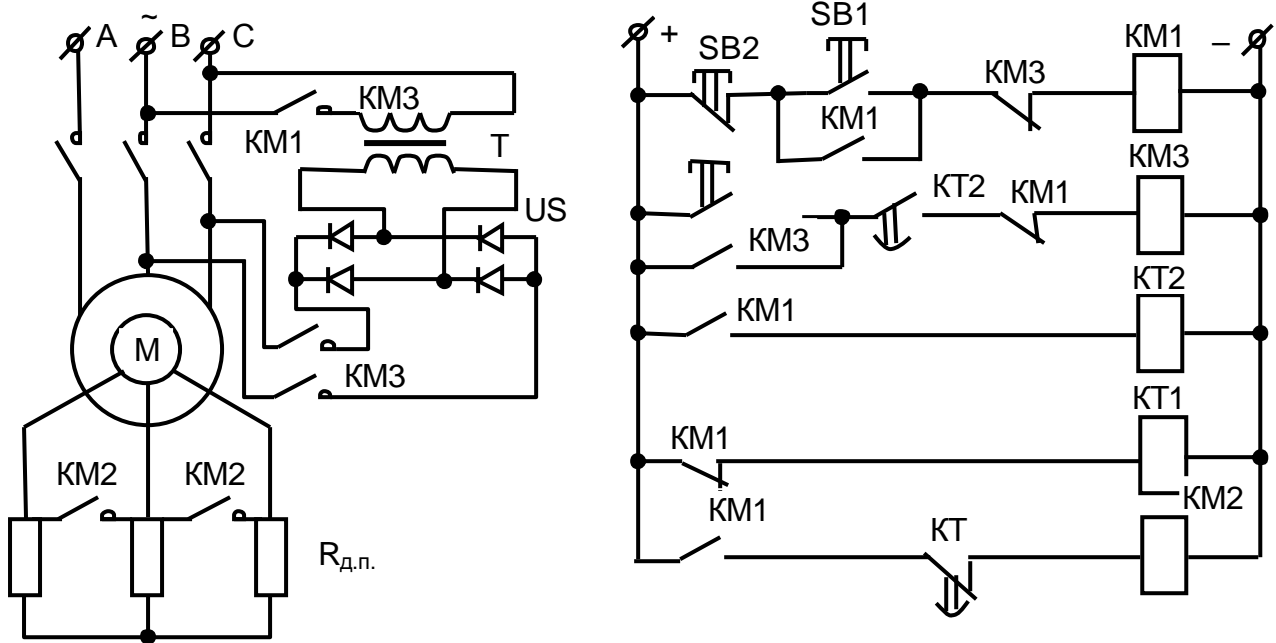


Рис. 2.10 - Типовые узлы автоматического управления пуском СД:
 а) схема прямого пуска СД; б) схема пуска в функции скорости;
 в) схема пуска в функции тока; г) схема цепей управления



а)

б)

Рис. 2.11 - Типовой узел управления динамическим торможением АД с фазным ротором в функции времени: а) силовые цепи; б) цепи управления

Автоматическое управление процессом торможения противовключением АД с короткозамкнутым ротором осуществляется с помощью реле контроля скорости КΩ. Схема типового узла приведена на рис. 2.12.

Схема применяется для остановки реверсивного двигателя. При работе двигателя переключающий контакт реле контроля скорости в зависимости от направления вращения находится в положении 1–3 («вперёд») или 1–2 («назад»). Введение КΩ в действие осуществляется только при подаче команды на остановку. Это обеспечивается блокировочным реле КV. В остальном эта схема обеспечивает управление реверсивным АД с к.з. ротором. Допустим, что *M* работал в направлении «вперёд», т.е. был включен КМ1 и переключающий контакт КΩ замкнут в положении 1–3. При нажатии на SB3 включается КV. Размыкающий контакт КV отключает КМ1, а замыкающий контакт КV через контакты 1–3 КΩ и замкнувшийся контакт КМ1 включит КМ2. Кнопка SB3 может быть отпущена т.к. КV становится на самопитание. Двигатель переходит в режим торможения переключателем. При $\omega \approx 0$ размыкается контакт 1–3 реле

РКС и статор отключается от сети. При вращении двигателя в направлении «назад» и нажатии на SB3 схема действует аналогично.

Если необходимо реверсировать M без остановки, то нажимают на кнопку противоположного направления. Например, M работал в направлении «вперёд». При нажатии на SB2 её размыкающий контакт отключит КМ1, а затем включится КМ2. Двигатель переходит в режим торможения противовключением, а потом разгоняется в направлении «назад», т.к. катушка КМ2 продолжит получать питание через размыкающий контакт KV до тех пор, пока не будет нажата кнопка SB3.

Типовой узел, обеспечивающий управление процессом торможения противовключением АД с фазным ротором при косвенном контроле скорости двигателя приведен на рис. 2.13.

Косвенный контроль скорости M осуществляется с помощью реле противовключения KV2. Его катушка через выпрямитель US подключена на зажимы обмотки ротора. Напряжение на катушке KV2 пропорционально скольжению s двигателя: $U_{KV2} \approx E_{2H}s$, где E_{2H} – э.д.с. ротора при $s=1$. С помощью $R_{РЕГ}$ реле настраивается так, чтобы оно срабатывало в самом начале процесса торможения, т.е. при $s \approx 2$ и отпускало свой якорь при скорости, близкой к нулю, т.е. при $s \approx 1$. При пуске KV2 не включится. На схеме цепи управления пуском представлены одной ступенью $R_{ДП}$,

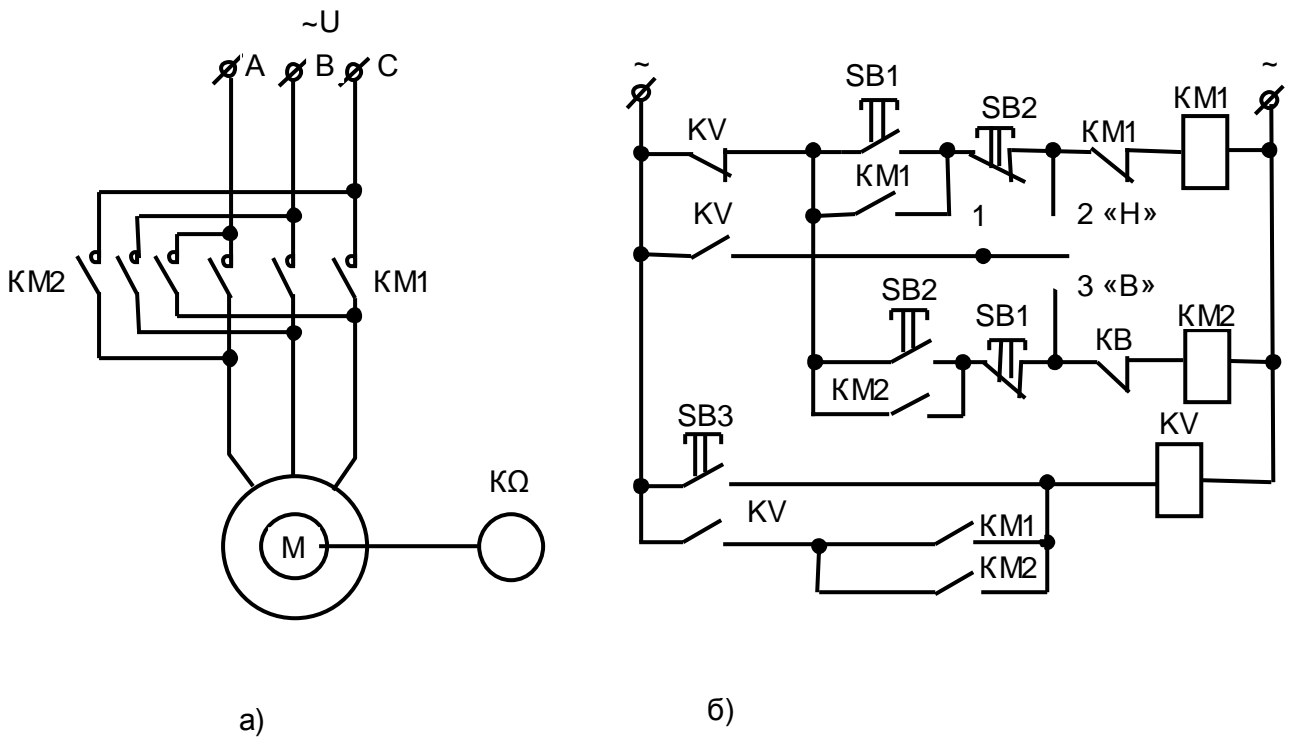


Рис. 2.12 - Типовой узел управления торможением противовключением АД с короткозамкнутым ротором в функции скорости:
 а) главные цепи; б) цепи управления

контактором KV4 и электромагнитным реле времени КТ. Отсчёт времени КТ начинается с момента включения КМ3.

Предположим, что *M* работал в направлении «вперёд». При нажатии на SB2 отключаются контакторы КМ1 и КМ3. В цепь ротора вводится $R_{ДП}+R_{ДПР}$. Затем включится КМ2 и *M* переходит в режим торможения противовключением. При этом включается KV2 и размыкает свой контакт в цепи катушки КМ3, не позволяя ему включиться и обеспечивая в цепи ротора $R_{ДП}+R_{ДПР}$. Для повышения надёжности этой операции применяют блокировочное реле KV1. Оно отключается при отключении КМ1 и включится

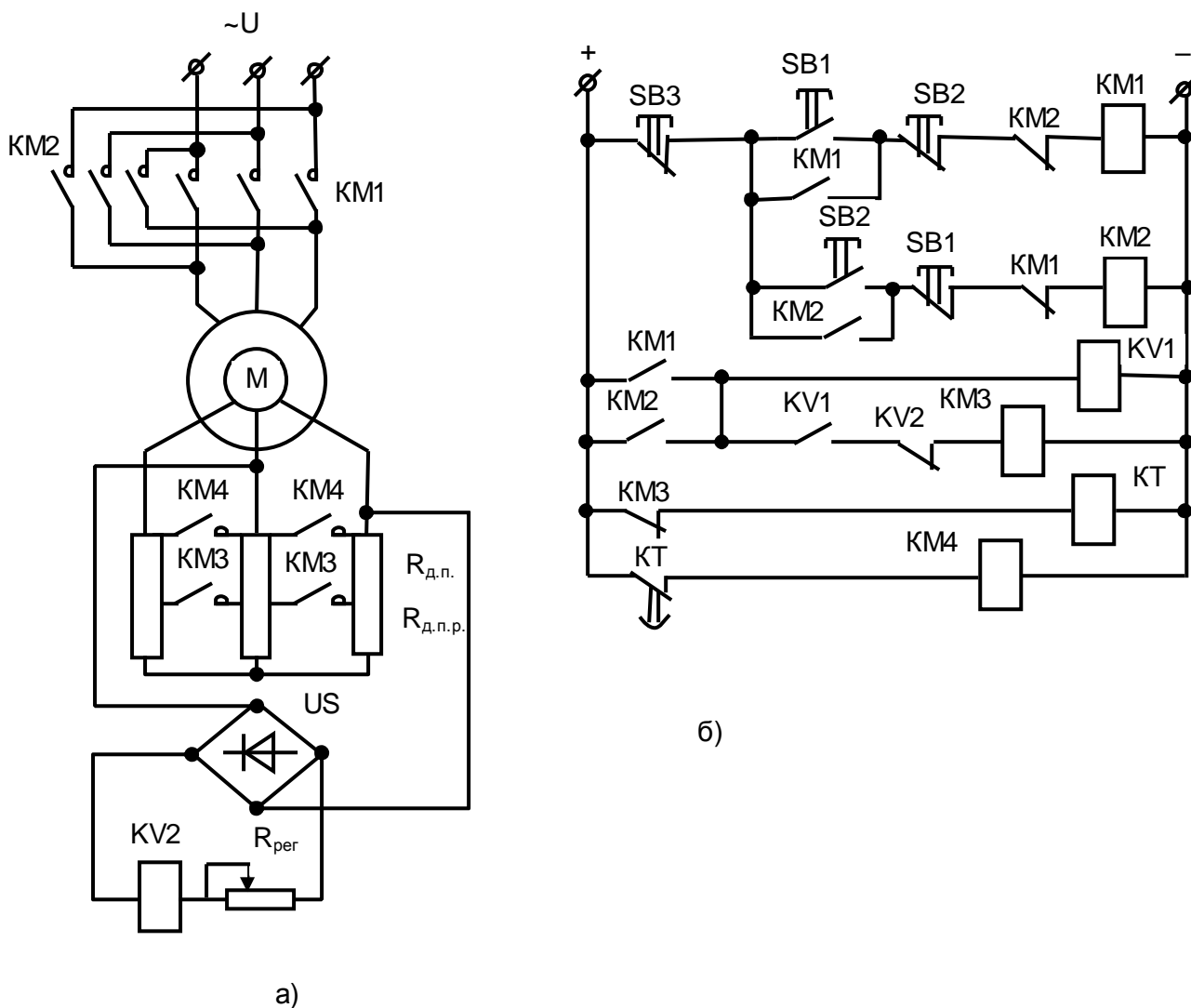


Рис. 2.13 - Типовой узел управления торможение противовключением АД с фазным ротором в функции скорости: а) главные цепи; б) цепи управления

только после срабатывания $KM2$. Тем самым создаётся временный разрыв в цепи катушки $KM3$. Когда контакт $KV1$ замкнется, реле $KV2$ уже успеет сработать и разомкнуть свой контакт. В конце торможения контакт $KV2$ замыкается, включается контактор $KM3$. Двигатель переходит на реостатную характеристику и разгоняется в направлении «назад». При обратном реверсе схема работает аналогично. При нажатии на $SB3$ M отключается от сети и тормозится под действием M_c .

Содержательный модуль 1.3. Электрические расчеты и анализ типовых узлов защиты систем автоматизированного электропривода

Лекция 8

3.1. Узлы электрической защиты двигателей и схем управления

Для предотвращения выхода из строя и повышения надёжности электропривода применяют различные виды электрических защит.

Максимально–токовая защита. При коротком замыкании (к.з.) обеспечивает немедленное отключение от напряжения цепи, в которой произошло к.з. Осуществляется предохранителями с плавкими вставками FU; автоматами с электромагнитными расцепителями QF; максимальными токовыми реле КА1 и КА2. При мощности M до 10 кВт цепи управления защищают при к.з. теми же аппаратами, что и силовые цепи либо своими FU и QF. Примеры включения аппаратов защиты приведены на рис. 3.1.

Номинальный ток плавкой вставки $I_{вст.н.}$ и ток срабатывания $I_{уст.}$ QF и КА для защиты АД с к.з. ротором с начальным пусковым током I_n : $I_{вст.н.} \geq 0,4I_n$, при $t_n < 5с$ – лёгкий пуск; $I_{вст.н.} \geq (0,5-0,6)I_n$; $I_{уст.} = (1,3-1,5)I_n$. при $t_n > 10с$ – тяжёлый пуск.

Для защиты АД с фазным ротором и ДПТ $I_{вст.н.} = (1-1,25)I_n$; $I_{уст.} = (1,2-1,3)I_n$. Значение номинального тока I_n для двигателей S3 – режима берут при $PВ=25\%$. Для защиты цепей управления $I_{вст.н.} = I_{уст.} = 2,5I_{кат.Σ}$, $I_{кат.Σ}$ – максимальный суммарный ток одновременно включённых аппаратов.

Защита двигателей от перегрева, вызванного перегрузкой по току осуществляется: при продолжительном режиме работы – с помощью тепловых реле КК или автоматических выключателей QF с тепловыми расцепителями; при повторно-кратковременном режиме работы – с помощью двух токовых реле КА1 и КА2, поскольку в этом режиме трудно согласовать тепловые характеристики реле и двигателя. В этом случае одновременно обеспечивается защита M от работы на двух фазах. Примеры включения аппаратов защиты приведены на рис. 3.2.

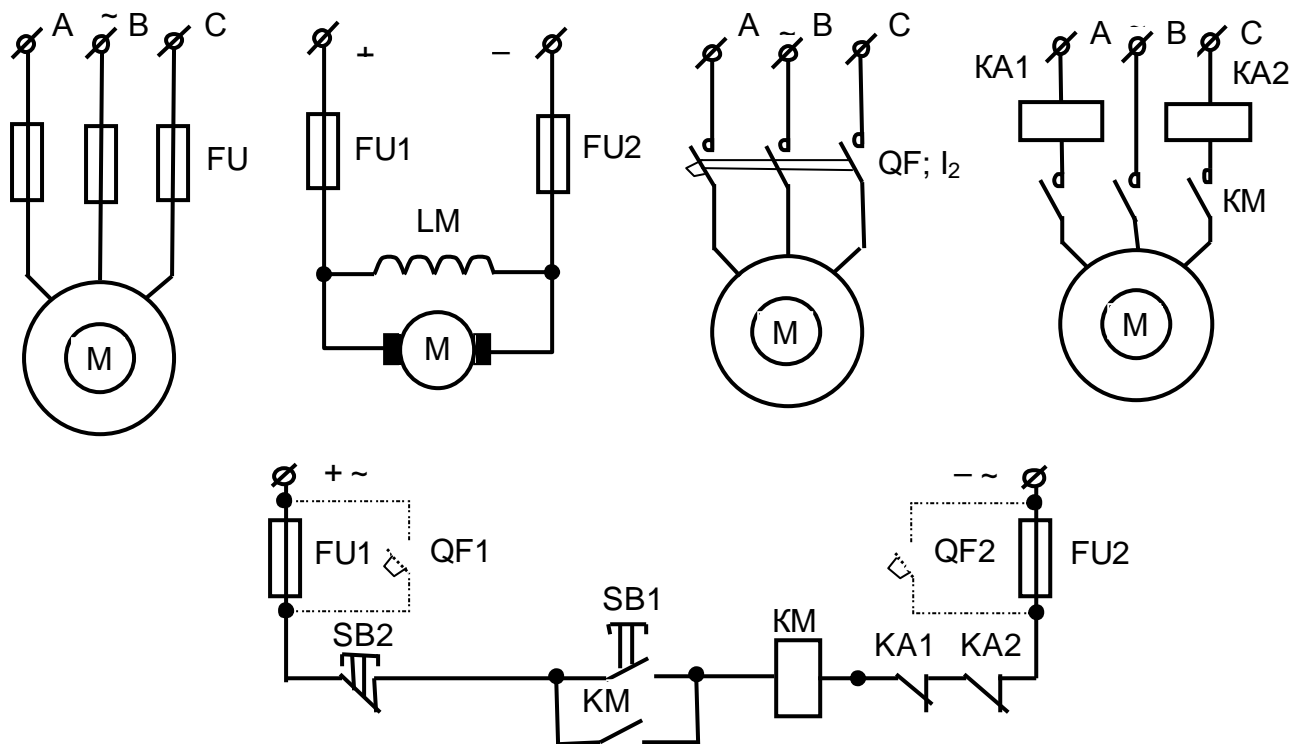


Рис. 3.1 - Схемы включения аппаратов защиты от токов короткого замыкания

Реле КТ исключает возможность срабатывания КА1 и КА2 при пуске. Реле КА3 служит для защиты при к.з. Номинальный ток нагревательного элемента теплового реле $I_{нагр.н.}$ или теплового расцепителя QF $I_{расц.н.}$ выбирают из условия $I_{нагр.н.} = I_{расц.н.} \approx I_n$. Ток уставки КА1, КА2 $I_{3\phi} < I_{уст.} < I_{2\phi}$, где $I_{3\phi}$ и $I_{2\phi}$ – токи M при работе на двух и трёх фазах.

Защита от самозапуска (нулевая защита). Схема, приведенная на рис. 3.3 обеспечивает отключение двигателя при исчезновении или чрезмерном снижении напряжения сети и предотвращает самозапуск - самопроизвольный пуск M после восстановления напряжения. При кнопочном управлении её осуществляет КМ. При управлении с помощью командоконтроллера – реле напряжения KV. В этом случае

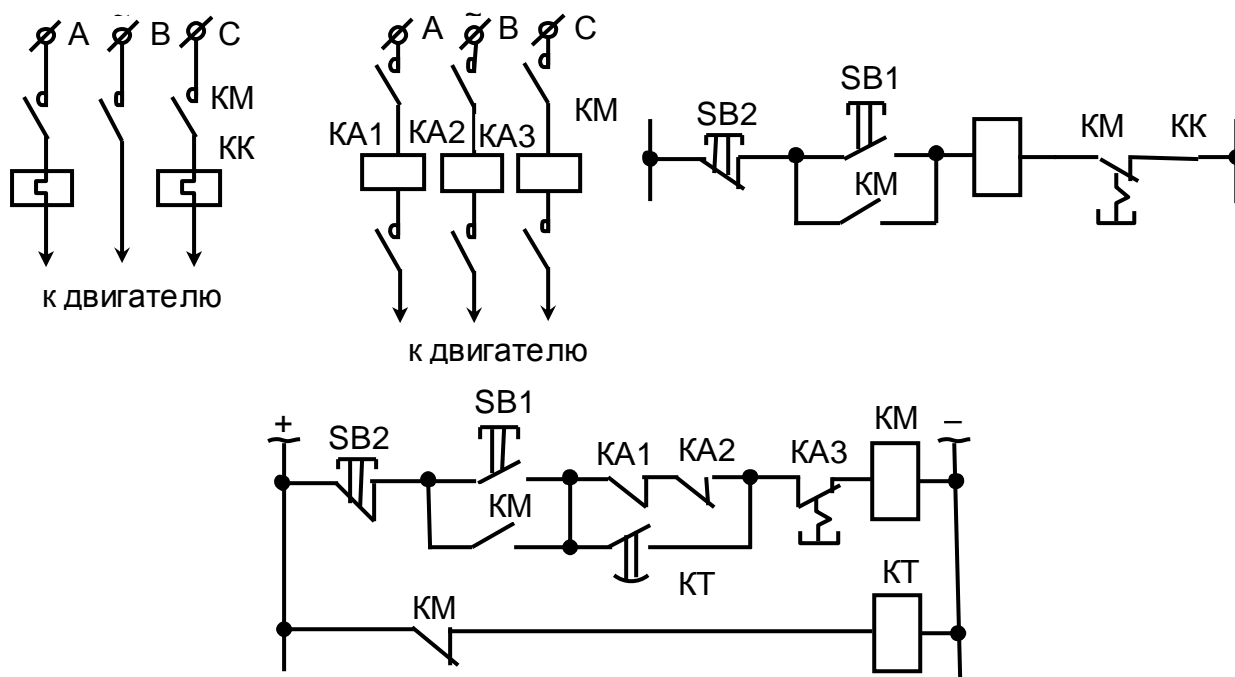


Рис. 3.2 - Схемы включения аппаратов тепловой защиты

пуск возможен только после установки рукоятки командоконтроллера КК в нулевое положение. В цепь катушки КV включаются контакты других аппаратов защиты. Если, наоборот, требуется обеспечить самозапуск *M*, то кнопки управления заменяют выключателями.

Защита при обрыве поля, т.е. при обрыве цепи питания обмотки возбуждения ДПТ и СД осуществляется при помощи минимального токового реле КА, схема приведена на рис. 3.4. При обрыве в цепи питания ЛМ КА выключается и отключает двигатель. Защита от перенапряжения на ЛМ при её отключении осуществляется разрядным сопротивлением R_p . Диод VD устраняет потери энергии при работе двигателя.

Защиту от затянувшегося пуска СД, схема которой приведена на рис. 3.5, выполняют при помощи токового реле КА и реле времени КТ. Защита необходима, т.к. пусковая обмотка рассчитана на кратковременный режим работы. Выдержка КТ соответствует допустимой продолжительности пуска. Если к моменту срабатывания КТ ток возбуждения не достиг своего

номинального значения и КА не включилось, то промежуточное реле KV срабатывает и двигатель отключится.

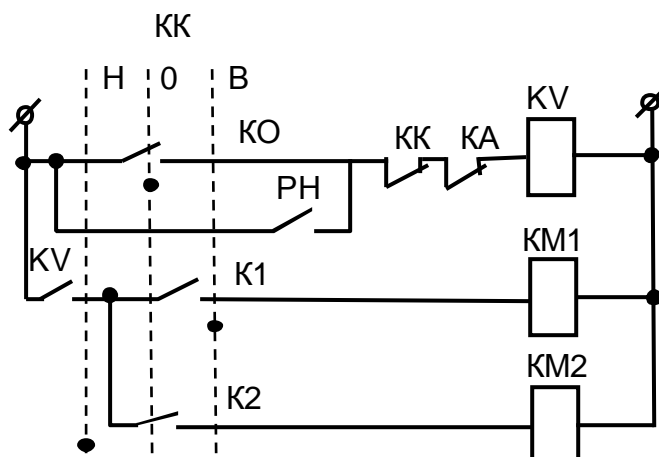


Рис. 3.3 - Схема включения защиты от самозапуска

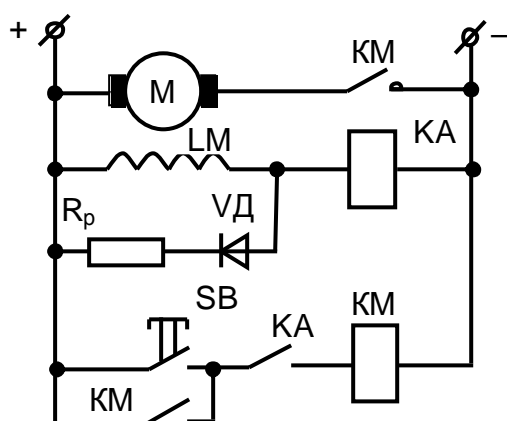


Рис. 3.4 - Схема включения защиты от обрыва поля

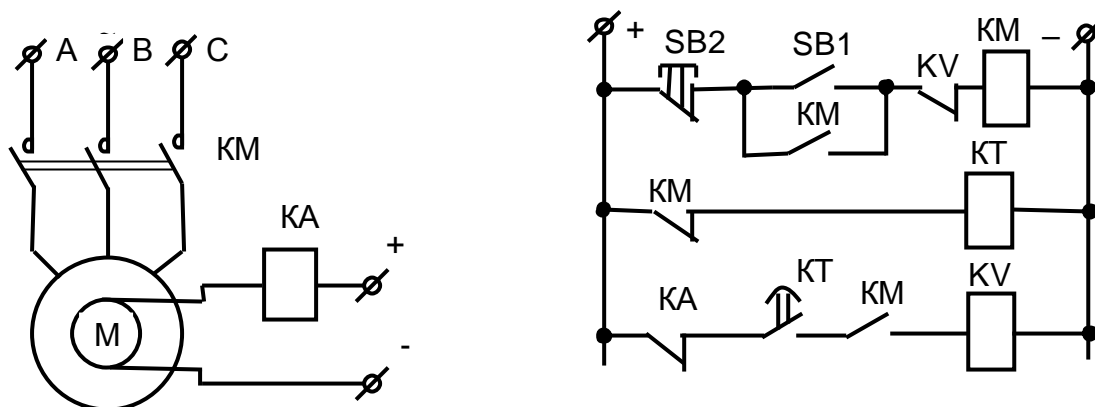


Рис. 3.5 - Схема включения защиты от затянувшегося пуска СД

Защита от выпадания из синхронизма СД, схема которой приведена на рис. 3.6, применяется для двигателей с резко изменяющейся нагрузкой на валу. Для сохранения перегрузочной способности M при снижении напряжения сети на 15–20% отключится реле минимального напряжения KV. Замыкается его контакт и включает контактор фазировки KM2. Последний своим контактом шунтирует реостат $R_{дв}$ в цепи питания LG. Напряжение возбудителя, ток возбуждения и максимальный момент двигателя возрастают.

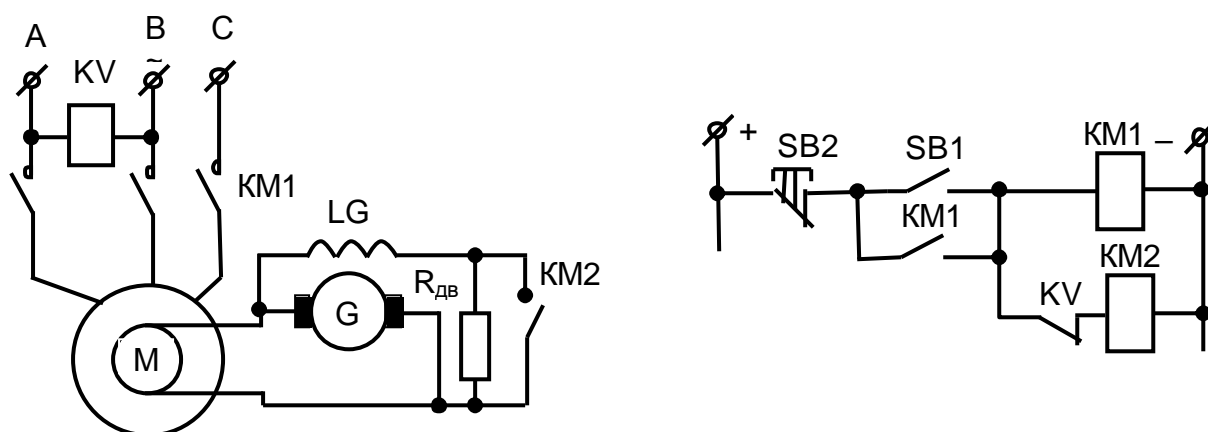


Рис. 3.6 - Схема включения защиты СД от выпадания из синхронизма

Список литературы

1. Капунцов Ю.Д., Елисеев В.А., Ильяшенко Л.А. Электрооборудование и электропривод промышленных установок. – М.: Высшая школа, 1979 – 359с.
2. Типовой электропривод промышленных установок/ Под. общ. ред. Волотковского С.А. - Киев: Высшая школа, 1983 – 312 с
3. Зимин Е.Н., Яковлев В.И. Автоматическое управление электроприводами. – М.: Высшая школа, 1979 – 318с.
4. Решеневский С.Н. Характеристики двигателей в электроприводе. М.: Энергия, 1967 – 471с.
5. Москаленко В.В. Автоматизированный электропривод. – М.: Энергоатомиздат, 1986 – 416 с.
6. Справочник по преобразовательной технике /Под. ред. Чиженко И.М./ - Киев: Техніка, 1978 – 448 с.
7. Справочник по проектированию автоматизированного электропривода и систем управления технологическими процессами /Под. ред. Круповича В.И., Барыбина Ю.Г., Самовера М.Л. - М.: Энергоатомиздат, 1982 – 400 с.
8. Справочник по автоматизированному электроприводу /Под. ред. Елисеева В.А., Шинянского А.В. - М.: Энергоатомиздат, 1983 – 616 с.
9. Гарнов В.К., Рабинович В.Б., Вишневецкий Л.М. Унифицированные системы управления электроприводом в металлургии. М.: Металлургия, 1971 – 216 с.
10. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0: Учебное пособие. – СПб.: КОРОНА принт, 2007. – 320 с., ил.

Навчальне видання

Андрійченко Володимир Павлович,

Фатєєв Віктор Миколайович

«ЕЛЕМЕНТИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ»

Конспект лекцій

для студентів 3,4 курсів усіх форм навчання напрямку підготовки 6.050702 (0922) «Електромеханіка» спеціальності «Електромеханічні системи автоматизації і електроприводу».

(Рос. мовою)

Редактор *З.І. Зайцева*

Комп'ютерне верстання *І.В. Волосожарова*

План 2009, поз. 74 Л

Підп. до друку 30.03.10	Формат 60x84/16.	Папір офісний
Друк на ризографі	Ум. друк. арк. 3,5	Зам. №
Тираж 50 пр.		

Видавець і виготовлювач:

Харківська національна академія міського господарства,

вул. Революції, 12, Харків 61002

Електронна адреса: rectorat@ksame.kharkov.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи: ДК № 731 від 19.12.2001