

МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
МОРСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ
ИМЕНИ АДМИРАЛА Ф.Ф.УШАКОВА

Кафедра «Судовая электроавтоматика»

СЛЕДЯЩИЕ СИСТЕМЫ СУДОВЫХ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РЕГУЛЯТОРОВ

Учебное пособие

Дисциплина «Теория автоматического управления»
(специальность «Эксплуатация судового электрооборудования
и средств автоматики судов»)

Дисциплина «Электрические системы автоматики судового
энергетического оборудования»
(специальность «Эксплуатация судовых энергетических установок»)

Новороссийск
2010

Настоящее учебно-методическое пособие разработано профессором кафедры СЭА Е.В. Кузнецовым.

Пособие рассмотрено и одобрено на заседании кафедры СЭА
«___» _____ 2010 г, протокол №___.

Профессор
kuzn@rambler.ru

Е.В. Кузнецов

Начальник кафедры СЭА,
Д.Т.Н.

А.Ю. Самойленко

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1 Системы автоматического регулирования со следящей системой	5
2 следящие системы с постоянной скоростью перемещения ИМ.....	14
3 следящие системы с ПЕРЕМЕННОЙ скоростью перемещения ИМ	22
3.2.1 Энкодеры.....	32
3.2.2 Резольверы	36
4 УПРАВЛЕНИЕ БЕСКОНТАКТНЫМИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯМИ ПОСТОЯННОГО ТОКА	41
5 Динамические свойства электрических исполнительных механизмов	58
6 Следящие системы с постоянной скоростью перемещения ИМ.....	66
7 Следящие системы с переменной скоростью перемещения ИМ	76
8 векторное управление БДПТ	89
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	94

ВВЕДЕНИЕ

Современные средства автоматизации судового энергетического оборудования широко используют электрическую, электронную и микропроцессорную технику. Данные средства автоматизации позволяют использовать сложные алгоритмы управления и регулирования, имеющие широкие возможности настройки автоматики на получение требуемого качества работы судовых агрегатов и механизмов.

Типы электрических систем автоматического регулирования судового энергетического оборудования рассмотрены в [12].

Наиболее эффективной электрической системой регулирования можно считать систему с последовательным корректирующим устройством и следящей системой.

В настоящее время такие системы регулирования широко применяются при автоматизации судовых энергетических установок, особенно, в автоматике вспомогательных котлов и главных дизелей судов мирового танкерного флота. Однако, в технической и учебной литературе по автоматизации судовых энергетических установок какие-либо материалы по этим системам практически отсутствуют. Это обстоятельство создает существенные проблемы при подготовке судовых инженеров-механиков и электромехаников на уровне, соответствующем современному состоянию средств судовой автоматики.

В связи с этим в данном пособии рассматривается устройство типовых судовых электрических систем регулирования, имеющих в своем составе следящую систему, а также решаются задачи по определению настроечных параметров следящих систем, обеспечивающих требуемое качество их работы..

Основной характеристикой следящих систем, от которой зависят их рабочие свойства, является тип электродвигателя, используемого в исполнительном механизме:

- асинхронный переменного тока,
- бесконтактный постоянного тока.

В первом случае исполнительный механизм перемещается с постоянной скоростью, во втором – с переменной.

Задачи определения настроечных параметров в данной работе решались на основании полученных динамических характеристик ИМ для обоих видов систем.

Решение выполнялось на разработанных автором в системе визуального моделирования Visual Simulation [5] компьютерных тренажерах систем, содержащих математические модели элементов регуляторов и судовых объектов регулирования [10], [11].

1 СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ СО СЛЕДЯЩЕЙ СИСТЕМОЙ

Наиболее эффективной электрической системой регулирования можно считать систему с последовательным корректирующим устройством (КУ) и следящей системой.

Следящая система [15] перемещает исполнительный механизм таким образом, что положение ИМ с требуемой точностью воспроизводит задающее воздействие, являющееся произвольной функцией времени.

Последовательное КУ позволяет подобрать наиболее подходящий для каждого конкретного элемента судовой энергетической установки закон регулирования и определить настроечные параметры регулятора, обеспечивающее требуемое качество функционирования САР.

Следящая система перемещает исполнительный механизм по выходному сигналу КУ, что обеспечивает формирование регулирующего воздействия на объект регулирования с наименьшим отклонением от закона регулирования.

Кроме того, следящие системы дают возможность дистанционного управления агрегатами и механизмами при отключенном регуляторе или при отказе его элементов.

В нормативной документации по судовой автоматике отсутствуют какие-либо особые требования к следящим системам. Исходя из их назначения, можно сформулировать следующие требования к качеству работы следящих систем судовых регуляторов [15]:

- отсутствие статической ошибки,
- максимальное быстродействие системы,
- максимально допустимое динамическое отклонение (перерегулирование) 5%.

Основным элементом следящей системы является исполнительный механизм.

Достаточно подробное описание конструкций электрических исполнительных механизмов, их особенностей и характеристик можно найти в [7], [17].

Исполнительный механизм представляет собой устройство, перемещающее регулируемый орган в соответствии с алгоритмом работы регулятора.

Регулирующими органами судовых объектов регулирования являются:

- клапаны,
- золотники,
- поворотные затворы,
- задвижки и др.

Электрические ИМ состоят из следующих основных элементов:

- электродвигатель, служащий источником силового механического воздействия на регулируемый орган;
- редуктор как передаточно-преобразовательное устройство, предназначенное для получения определенной скорости регулирующего органа и требуемого перестановочного усилия на нем;
- датчик положения выходного вала редуктора ИМ;
- концевые выключатели, предназначенные для автоматической остановки регулирующего органа в конечных или промежуточных положениях;
- тормозное устройство, фиксирующее положение регулирующего органа при отсутствии питания электродвигателя,
- устройства защиты электродвигателя по току и тепловому режиму и др.

Как правило, в регуляторах судовых агрегатов и механизмов применяются однооборотные ИМ, выходной вал редуктора которых поворачивается на некоторый угол, лежащий в пределах одного оборота.

Блок-схема электрического исполнительного механизма приведена на рис. 1.1.

Конструктивно электрический исполнительный механизм выполняется как блок, содержащий следующие упомянутые выше элементы:

- электродвигатель ЭД,
- блок ручного управления РУ, позволяющий вручную перемещать регули-

- рующий орган,
- тормозное устройство Т,
 - редуктор Р,
 - датчик положения исполнительного механизма ДП,
 - блок конечных выключателей КВ.

Подачей напряжения на электродвигатель управляет усилитель У. Выходной вал редуктора через механическую передачу перемещает регулирующий орган РО. Сигнал ДПИМ может подаваться на прибор ПП, показывающий положение ИМ (и РО).

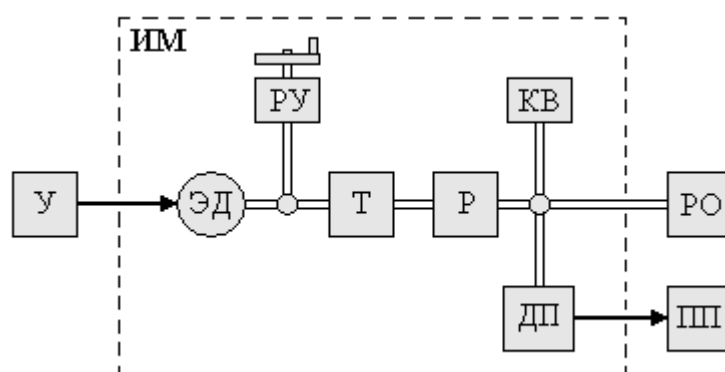


Рис. 1.1 Блок-схема электрического исполнительного механизма.

Примеры общего вида электрических исполнительных механизмов показаны на рис. 1.2.

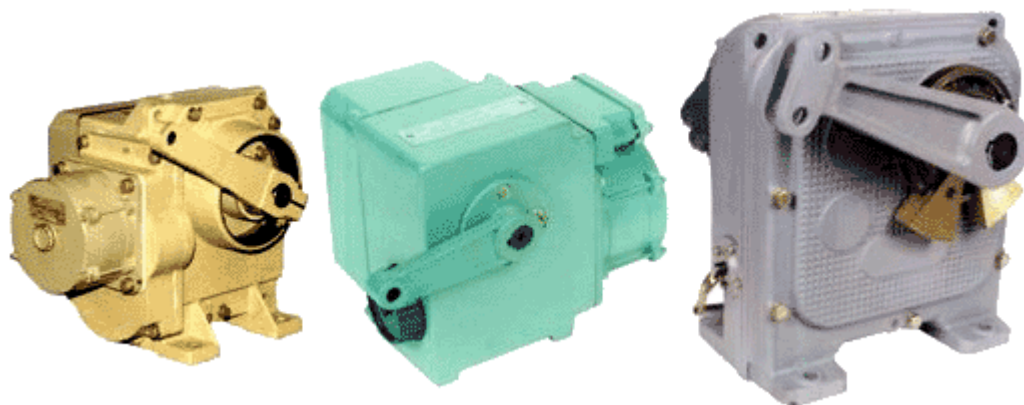


Рис. 1.2 Примеры общего вида электрических исполнительных механизмов.

Функциональная схема системы регулирования с последовательным КУ и наиболее простой по устройству следящей системой (первого типа) приведена на рис. 1.3.

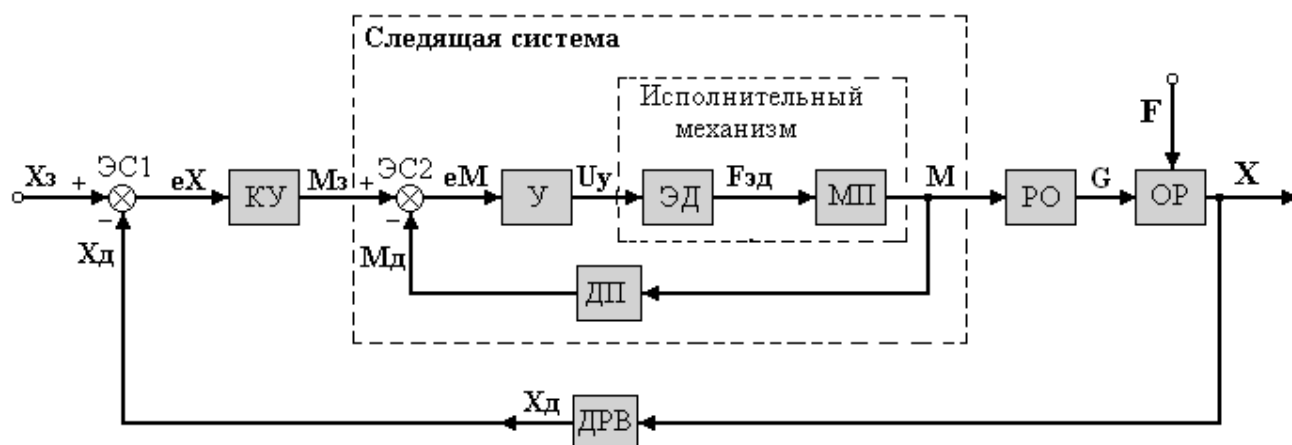


Рис. 1.3 Функциональная схема системы автоматического регулирования со следящей системой первого типа.

Данная САР является двухкаскадной, в которой первый (внутренний) каскад составляет следящая система.

Система регулирования содержит следующие функциональные элементы:
ОР - объект регулирования, состояние которого характеризуется следующими переменными величинами:

X - регулируемая величина,

G - регулирующее воздействие,

F - возмущающее воздействие (нагрузка объекта).

З - задатчик, формирующий сигнал X_3 заданного значения регулируемой величины;

ДРВ - датчик регулируемой величины (измерительный элемент), выходной сигнал которого X_d соответствует действительному значению регулируемой величины X ;

- ЭС1 - элемент сравнения, формирующий сигнал eX отклонения регулируемой величины от заданного значения ($eX = X_z - X_d$);
- КУ - последовательное корректирующее устройство, предназначенное для обеспечения требуемого качества работы САР (допустимого изменения регулируемой величины);
- ЭС2 - элемент сравнения, формирующий сигнал отклонения положения ИМ от заданного ($eM = M_z - M_d$);
- У - усилитель, который повышает мощность входного сигнала eM до уровня U_y , необходимого для перемещения ИМ (и регулирующего органа регулятора) с требуемой скоростью;
- ЭД - электродвигатель, частота вращения которого $F_{эд}$ определяется выходным сигналом усилителя U_y ;
- МП - механическая передача, состоящая из понижающего редуктора, рычагов и тяг, преобразующая частоту вращения ЭД $F_{эд}$ в механическое перемещение M ;
- ДП - датчик положения исполнительного механизма, выходной сигнал которого M_d соответствует фактическому положению механизма M ;
- РО - регулирующий орган, связанный с ИМ и преобразующий перемещение M в непосредственное регулирующее воздействие на ОР G .

Электродвигатель и механическая передача представляют собой единый механический блок – исполнительный механизм (ИМ).

Рассматриваемая система регулирования содержит следящую систему, которая состоит из элементов, входящих в контур системы (см. рис. 1.3).

Следящая система перемещает ИМ в положение M , заданное сигналом на входе контура M_z , следовательно, она представляет собой внутренний контур регулирования положения ИМ.

Пример работы следящей системы при скачкообразном изменении сигнала заданного положения ИМ M_z приведен на рис. 1.4.

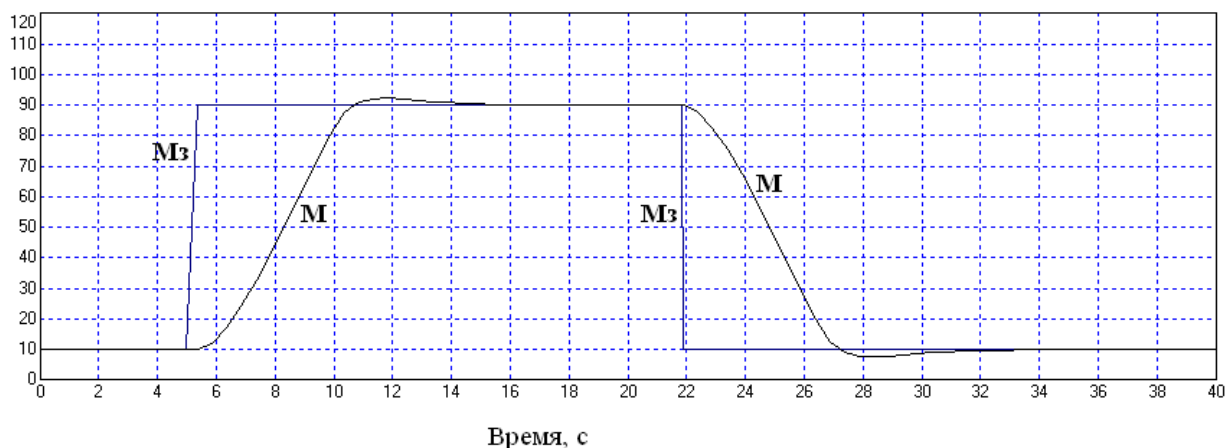


Рис. 1.4 Примеры графиков работы 1-го типа следящей системы.

Графики изменения величин на рис. 1.4 показывают, что после изменения сигнала заданного положения ИМ M_z на входе системы выходной рычаг ИМ M начинает перемещаться и занимает положение M , равное сигналу задания.

Рассмотрим принцип действия следящей системы при увеличении сигнала заданного положения ИМ по графикам рис. 1.4:

- в начальном состоянии сигнал заданного положения ИМ $M_z=10\%$ и, соответственно, положение ИМ $M=10\%$;
- сигнал задания ИМ увеличивается до $M_z=90\%$;
- при пока еще неизменном положении ИМ и, следовательно, неизменном сигнале M_d на выходе ДП будет возрастать сигнал отклонения положения ИМ от заданного $e_M = M_z - M_d$;
- напряжение на выходе усилителя U_y увеличивается;
- электродвигатель начнет вращаться с увеличивающейся частотой $F_{эд}$ и через механическую передачу увеличивать положение ИМ M ;
- возрастание M приведет к соответствующему росту сигнала M_d на выходе датчика ДП;
- сигнал e_M отклонения положения ИМ от заданного начнет уменьшаться;
- это вызовет уменьшение сигнала U_y на выходе усилителя и соответствующее

уменьшение частоты вращения электродвигателя $F_{эд}$, а также скорости перемещения ИМ;

- в конечном результате сигнал отклонения eM становится равным нулю, вращение ЭД прекращается, а положение ИМ становится равно заданному, то есть $M=M_3=90\%$.

Принцип действия САР со следящей системой (см. рис. 1.5) рассматривается для конкретного случая – увеличения нагрузки объекта регулирования:

- в начальном состоянии системы регулирования значение регулируемой величины постоянно и равно заданному значению $X = X_3$;
- увеличение нагрузки ОР вызовет уменьшение регулируемой величины X ;
- уменьшится сигнал X_d на выходе датчика ДРВ;
- возрастет сигнал ошибки регулирования $eX = X_3 - X_d$;
- после преобразования в КУ сигнала ошибки по заложенному в КУ закону регулирования возрастет сигнал на выходе КУ M_3 ;
- контур позиционирования будет увеличивать положение ИМ M ;
- регулирующий орган начнет увеличивать регулирующее воздействие на ОР G ;
- регулируемая величина X возрастет и ошибка регулирования eX уменьшится;
- если система регулирования устойчива, то с течением времени ИМ займет положение, при котором значение регулирующего воздействия G будет соответствовать новой нагрузке ОР F и регулируемая величина X снова станет постоянной и равной ее заданному значению X_3 .

Графики на рис. 1.5 показывают, что вследствие достаточного медленного изменения сигнала заданного положения ИМ M_3 перемещение ИМ M в данном примере практически совпадает с заданием.

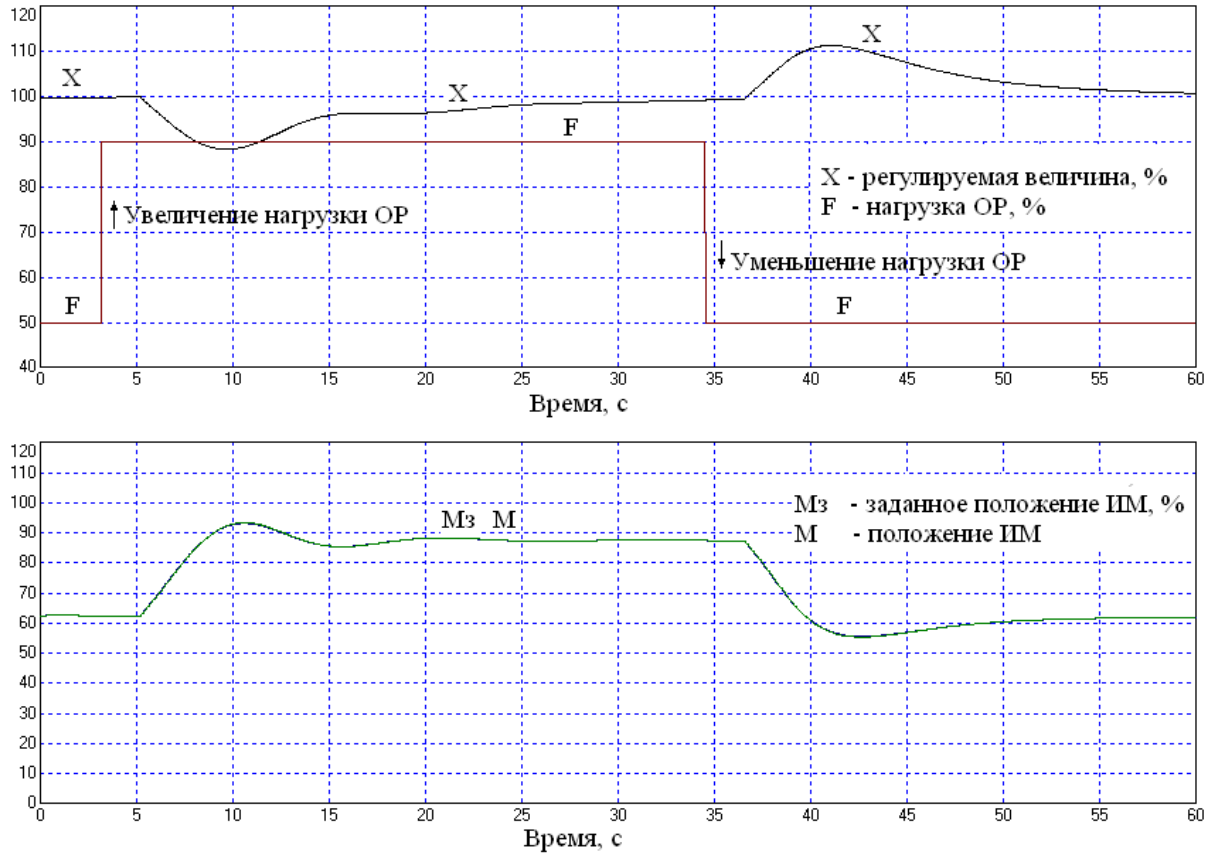


Рис. 1.5 Пример переходных процессов в САР со следящей системой.

В следящей системе первого типа, требуемое качество ее работы можно обеспечить за счет выбора:

- коэффициента усиления усилителя,
- времени полного хода ИМ.

Данные параметры регулятора являются конструктивными, то есть их нельзя изменять при настройке регулятора.

По этой причине более удобным для настройки является следящей система второго типа с внутренним корректирующим устройством положения КУП, схема которой представлена на рис. 1.6.

Система регулирования также является двухкаскадной.

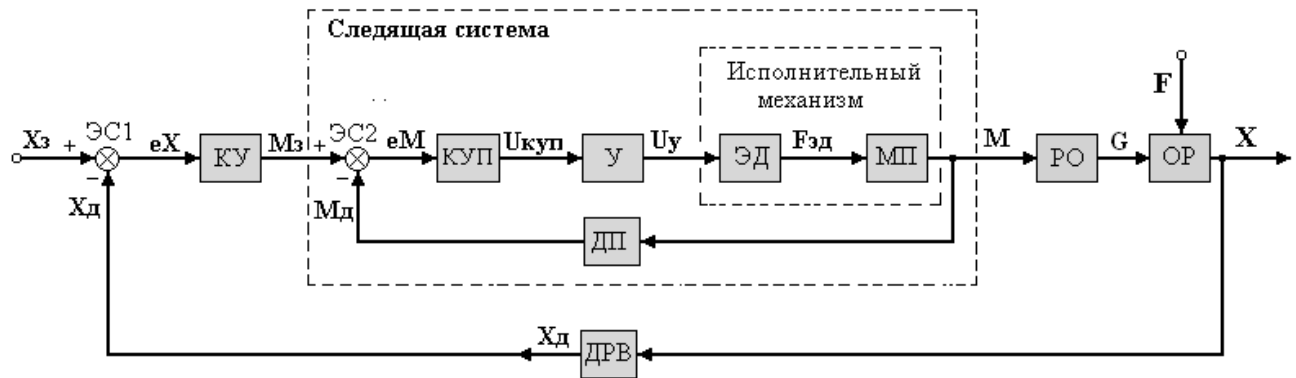


Рис. 1.6 Функциональная схема системы автоматического регулирования со следящей системой второго типа.

В КУП можно использовать любой из типовых законов регулирования и путем настройки параметров КУП получить требуемое качество работы следящей системы.

Следящие системы с переменной скоростью перемещения ИМ (системы третьего типа) обычно дополнительно содержат контур регулирования частоты вращения электродвигателя ИМ. Схема данной САР приведена на рис. 1.7.

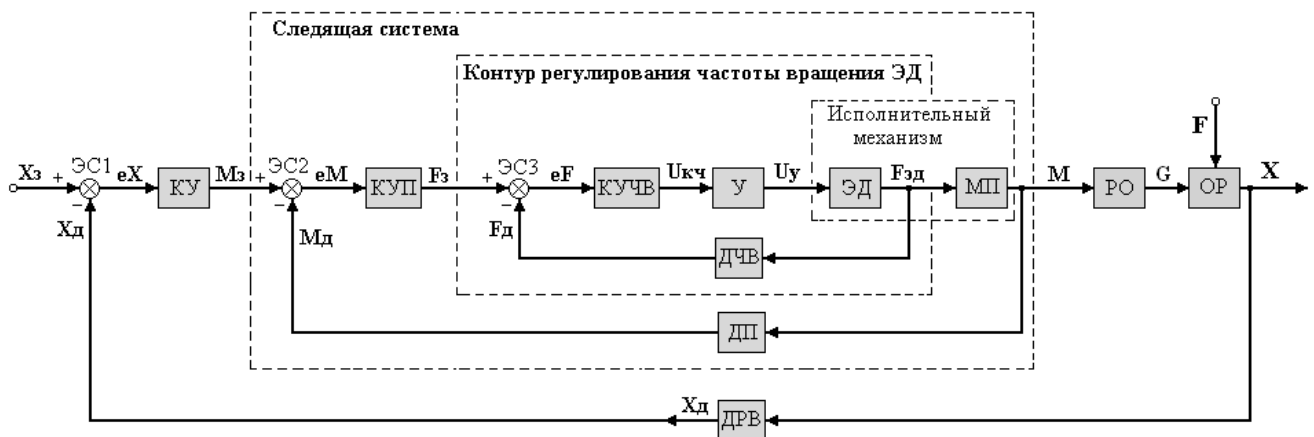


Рис. 1.7 Функциональная схема системы автоматического регулирования со следящей системой третьего типа.

Следящая система третьего типа дополнительно содержит:

ДЧВ – датчик частоты вращения электродвигателя ИМ, который формирует

сигнал F_d , соответствующий фактической частоте вращения ЭД $F_{эд}$; КУЧВ – последовательное корректирующее устройство контура регулирования частоты вращения ЭД.

Система регулирования является трехкаскадной:

- контур регулирования частоты вращения ЭД образует 1-й каскад,
- вся следящая система образует 2-й каскад.

В КУЧВ также можно использовать любой из типовых законов регулирования и путем настройки параметров КУЧВ получить требуемое качество поддержания частоты вращения ЭД.

Примером САР с такой следящей системой может служить система регулирования частоты вращения главного судового малооборотного дизеля DGS-8800e [21].

Техническое устройство и рабочие свойства следящей системы и, в целом, САР в значительной степени определяются типом применяемого в исполнительном механизме электродвигателя:

- асинхронный переменного тока,
- бесконтактный постоянного тока.

В первом случае исполнительный механизм перемещается с постоянной скоростью, во втором – с переменной.

2 СЛЕДЯЩИЕ СИСТЕМЫ С ПОСТОЯННОЙ СКОРОСТЬЮ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ИМ

2.1 Принципы управления электрическим ИМ с асинхронным электродвигателем

В электрических регуляторах практически всех судовых объектов регулирования (за исключением, дизелей как объектов регулирования частоты вращения) используются исполнительные механизмы с асинхронными электродвигателями переменного тока.

Данные электродвигатели имеют следующие особенности:

- ротор двигателя вращается с постоянной частотой, вследствие чего исполнительный механизм перемещается с постоянной скоростью;
- управление двигателем заключается в подаче и отключении питающего напряжения, то есть усилитель регулятора имеет релейную характеристику (см. рис. 2.1).

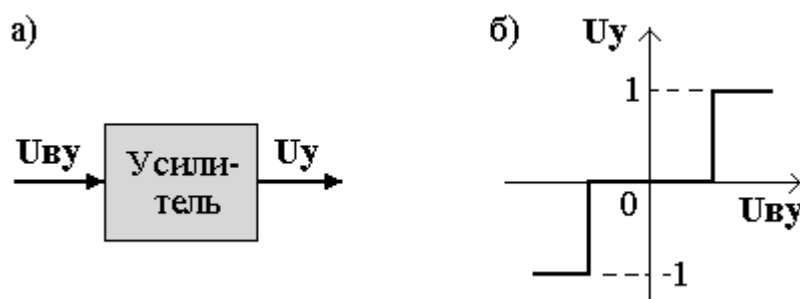


Рис. 2.1 Блок-схема и характеристика релейного усилителя.

Значения сигнала на выходе релейного усилителя имеют следующий технический смысл:

- $U_y = 0$ - напряжение на электродвигатель ИМ не подается, и ротор электродвигателя не вращается;
- $U_y = 1$ - напряжение на электродвигатель ИМ подается таким образом, что ротор электродвигателя вращается в направлении, обеспечивающем открытие регулирующего органа;

$U_y = -1$ - напряжение на электродвигатель ИМ подается таким образом, что ротор электродвигателя вращается в направлении, обеспечивающем закрытие регулирующего органа.

Для перемещения регулирующих органов судовых регуляторов с такой скоростью, чтобы полный ход РО происходил за время от 2-х до 100 с ИМ содержит понижающий редуктор.

Схема элементов, общих для следящих систем с асинхронными электродвигателями, показана на рис. 2.2.

К этим общим элементам относятся:

- электрический исполнительный механизм,
- релейный усилитель (РУ),
- модуль нечувствительности (МН).

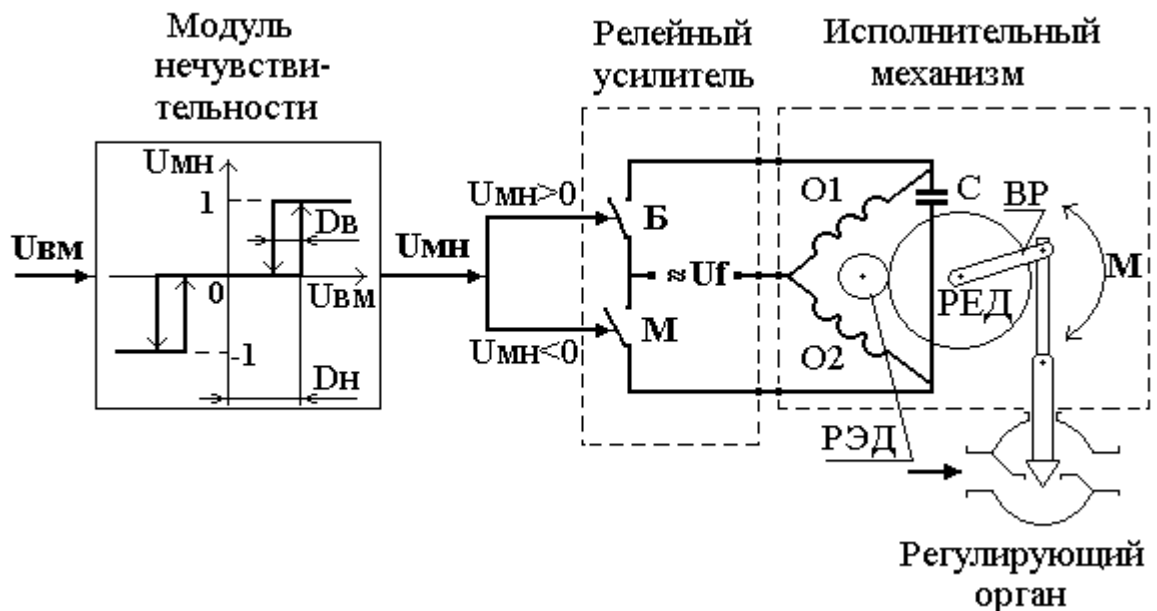


Рис. 2.2 Схема управления исполнительным механизмом с асинхронным электродвигателем.

Модуль нечувствительности формирует сигнал $U_{мн}$, управляющий литем, по релейной характеристике, показанной на рис. 2.2.

Характеристика МН имеет зону нечувствительности D_n и зону возврата D_v .

Зона нечувствительности необходима для обеспечения работы системы регулирования на равновесных режимах, когда регулирующий орган должен занимать постоянное положение. Это достигается отключением питания электродвигателя ИМ, когда входной сигнал МН $U_{вм}$ находится в зоне нечувствительности ($|U_{вм}| \leq D_n$).

Зона возврата D_v предотвращает частое включение ИМ при небольших случайных изменениях сигнала $U_{вм}$, иначе ИМ может слишком часто включаться и выключаться.

Для наглядности на рис. 2.2 показан усилитель с контактными ключами B и M . Замыкание и размыкание ключей подает на электродвигатель напряжение U_f или отключает подачу напряжения.

В ИМ судовых электрических регуляторов используются, как правило, однофазные асинхронные конденсаторные электродвигатели, схема обмоток статора которых показана на рис. 2.2.

Рассмотрим принцип действия комплекса элементов, изображенных на рис. 2.2.

Если входной сигнал МН лежит в зоне нечувствительности ($|U_{вм}| < D_n$), то:

- сигнал на выходе МН $U_{мн} = 0$,
- ключи РУ разомкнуты,
- на обмотки статора электродвигателя ИМ напряжение питания не подается,
- ротор электродвигателя РЭД и выходной рычаг ВР неподвижны.

Если входной сигнал МН вышел за пределы зоны нечувствительности при $U_{вм} > D_n$, то:

- сигнал на выходе МН $U_{мн} = 1$,
- в РУ замкнут ключ B ,

- на обмотки статора электродвигателя ИМ подано напряжение питания U_f , причем в цепь обмотки статора O2 последовательно включен конденсатор C,
- это создает фазовый сдвиг напряжений на обмотках O1 и O2, равный 90° , в результате чего на роторе электродвигателя РЭД появляется вращающий момент,
- ротор начинает вращаться в направлении, при котором выходная шестерня редуктора РЕД и закрепленный на ее оси выходной рычаг ВР поворачиваются против часовой стрелки (угол поворота выходного рычага M растет),
- ВР через тягу поднимает шток и грушу регулирующего органа, увеличивая расход среды через регулирующий орган.

Если входной сигнал МН вышел за пределы зоны нечувствительности при $U_{вм} < -D_n$, то:

- сигнал на выходе МН $U_{мн} = -1$,
- в РУ замкнут ключ M ,
- на обмотки статора электродвигателя ИМ подано напряжение питания U_f , причем в цепь обмотки статора O1 последовательно включен конденсатор C,
- это создает такой фазовый сдвиг напряжений на обмотках O1 и O2, в результате которого на роторе электродвигателя РЭД появляется вращающий момент противоположного знака,
- ротор начинает вращаться в направлении, при котором выходная шестерня редуктора РЕД и закрепленный на ее оси выходной рычаг ВР поворачиваются по часовой стрелке (угол поворота выходного рычага M уменьшается),
- ВР через тягу опускает шток и грушу регулирующего органа, уменьшая расход среды через регулирующий орган.

Техническая реализация модуля нечувствительности и усилителя может иметь различные варианты.

Инерционность ИМ и регулирующего органа приводит к тому, что эти элементы еще немного перемещаются после прекращения подачи напряжения.

Это вызывает дополнительное регулирующее воздействие на ОР, в результате чего устанавливается такое постоянное значение регулируемой величины, что точка сигнала **U_{вм}** будет располагаться существенно внутри зоны нечувствительности. В этом случае можно обойтись без зоны возврата.

Транзисторный усилитель небольшой мощности может быть сконструирован так, что его характеристика будет иметь зоны нечувствительности и возврата. В этом случае МН как отдельный модуль в регуляторе отсутствует.

МН может выполняться на аналоговых электронных или микропроцессорных средствах.

В последнем случае сигнал с характеристикой МН вырабатывается в программном блоке микропроцессора и МН как отдельный блок отсутствует.

Рассмотренные выше схема и элементы позволяют отметить следующие рабочие свойства следящих систем с постоянной скоростью перемещения ИМ:

- система обладает погрешностью, определяемой величиной зоны нечувствительности МН,
- система является существенно нелинейной, вследствие наличия элементов с релейными характеристиками.

2.2 Тиристорный усилитель

В качестве релейных усилителей в судовых электрических регуляторах применяются транзисторные и тиристорные усилители.

Наибольшее распространение в следящих системах с асинхронными электродвигателями получили тиристорные усилители.

Схема двухфазного асинхронного двигателя и тиристорного усилителя регулятора приведена на рис. 2.3.

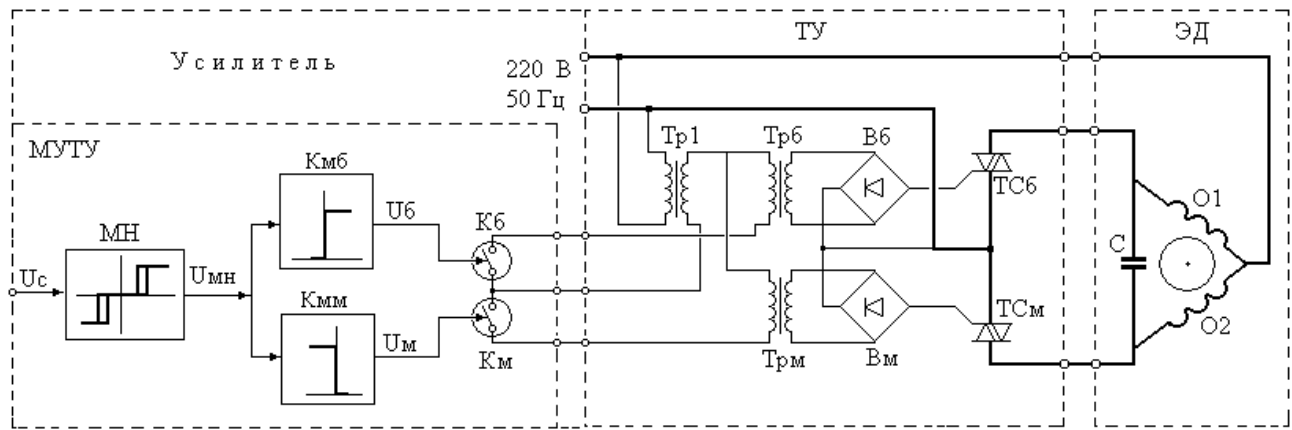


Рис. 2.3 Схема управления двухфазным асинхронным электродвигателем с помощью тиристорного усилителя.

Усилитель данного регулятора состоит из двух частей (рис. 2.3):

- собственно тиристорного усилителя ТУ, подающего напряжение на электродвигатель,
- модуля управления тиристорным усилителем МУТУ.

Управляющим сигналом усилителя U_c для всех рассмотренных выше регуляторов является входной сигнал модуля нечувствительности.

Тиристорный усилитель, применяемый в рассматриваемом случае [17], является реверсивным. Функцию бесконтактных ключей, коммутирующих силовые цепи электродвигателя, выполняют симметричные тиристоры (симисторы) ТСб и ТСм.

Включение симисторов производится путем подачи отрицательного напряжения, вырабатываемого выпрямителями Вб и Вм. Напряжение на выпрямители поступает соответственно с разделительных трансформаторов Трб и Трм при наличии командного сигнала поступающего при замыкании ключа Кб или Км в МУТУ.

Трансформатор ТР1 разделяет управляющие и силовые цепи.

Отключение симисторов происходит после снятия командного сигнала в момент перехода синусоидального тока нагрузки через нуль.

При отсутствии командных сигналов тиристорные ключи разомкнуты и обмотки электродвигателя обесточены.

При замыкании ключа Кб («Больше») замыкается тиристорный ключ ТСб и к обмотке О1 подключается источник питания (сеть), обмотка О2 подключается к источнику последовательно с конденсатором С. Электродвигатель вращается в положительном направлении.

При замыкании ключа Км («Меньше») замыкается тиристорный ключ ТСм и к обмотке О2 подключается источник питания (сеть), обмотка О1 подключается к источнику последовательно с конденсатором С. Электродвигатель вращается в отрицательном направлении.

Модуль управления ТУ содержит:

- модуль нечувствительности МН (с зонами нечувствительности и возврата),
- компараторы Кмб и Кмм,
- ключи Кб и Км (которые для простоты понимания принципа работы показаны контактными).

МН по сигналу U_c формирует релейный сигнал $U_{мн}$, который может принимать три значения: -1, 0 и 1.

Сигнал $U_{мн}$ поступает на два компаратора Кмб и Кмм.

Кмб формирует при $U_{мн} > 0$ сигнал $U_б$ включения вращения ЭД в положительном направлении. Сигнал $U_б$ через замыкание ключа Кб подает управляющий сигнал на включение симистора ТСб.

Кмм формирует при $U_{мн} < 0$ сигнал $U_м$ включения вращения ЭД в отрицательном направлении. Сигнал $U_м$ через замыкание ключа Км подает управляющий сигнал на включение симистора ТСм.

2.3 Датчик положения исполнительного механизма

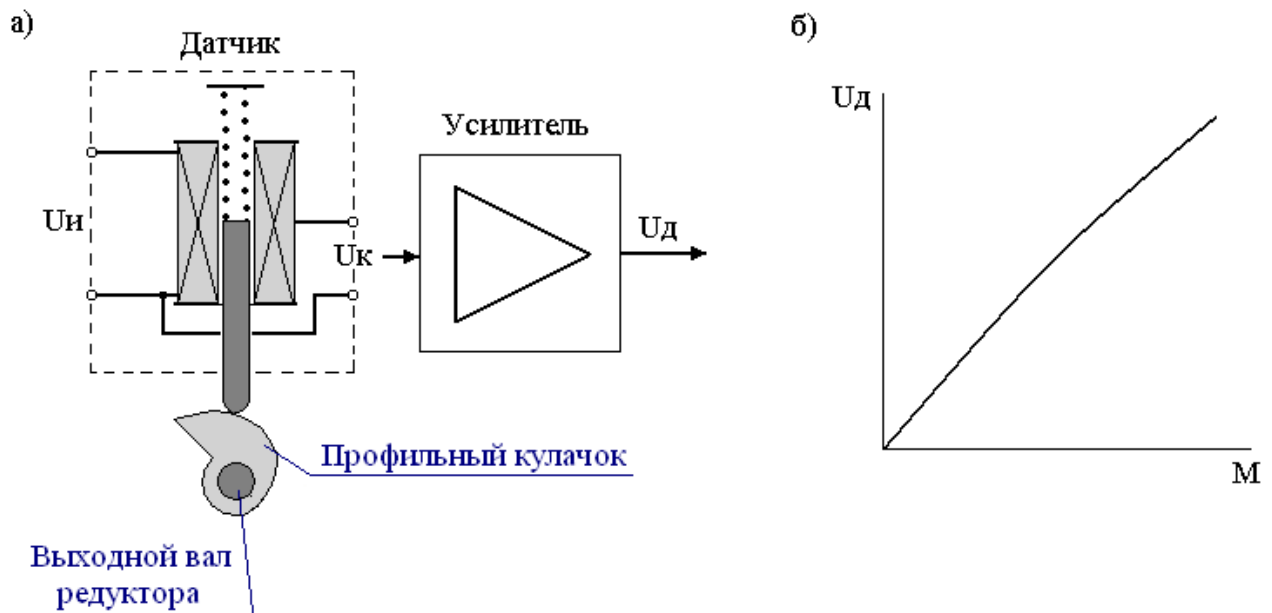


Рис. 2.4 Индуктивный датчик положения исполнительного механизма.

3 СЛЕДЯЩИЕ СИСТЕМЫ С ПЕРЕМЕННОЙ СКОРОСТЬЮ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ИМ

3.1 Бесконтактные электродвигатели постоянного тока

Настоящему уровню развития электрических следящих систем с переменной скоростью перемещения ИМ наиболее соответствуют бесконтактные электродвигатели постоянного тока (БДПТ).

В следящих системах применяются синхронные БДПТ с постоянными магнитами на роторе [13], [18].

Например, такие электродвигатели используются в системе управления частотой вращения главного судового малооборотного дизеля, разработанной фирмой Конгсберг (Норвегия) [21].

Отличие бесконтактных электродвигателей постоянного тока БДПТ от коллекторных электродвигателей состоит в том, что у БДПТ щеточно-коллекторный узел заменен полупроводниковым коммутатором, который управляется сигналами, поступающими от датчиков положения ротора.

К достоинствам БДПТ относятся:

- возможность плавного регулирования частоты вращения электродвигателя и, следовательно, скорости перемещения исполнительного механизма (и регулирующего органа);
- высокая безотказность и долговечность, что объясняется отсутствием щеточно-коллекторного узла;
- более высокий КПД по сравнению с коллекторными двигателями постоянного тока, что объясняется отсутствием электрических потерь в щеточном контакте и механических потерь в коллекторе;
- способность работать в условиях широкого диапазона температур окружающей среды и в средах с большой влажностью.

Бесконтактные электродвигатели постоянного тока состоят из трех основных частей (рис. 3.1):

- собственно электродвигателя,
- датчиков положения ротора,
- коммутатора, подающего в необходимой последовательности питание на электродвигатель.

Рабочая обмотка двигателя (обмотка якоря) расположена на сердечнике статора, а на роторе имеется постоянный магнит. Обмотки статора соединены звездой.

В следящих системах обычно применяются трехфазные БДПТ, которые имеют достаточно простое устройство и допустимые пульсации момента и частоты вращения.

Общий вид трехфазного БДПТ и его функциональная схема показаны на рис. 3.1.

Электродвигатель снабжен тремя датчиками положения ротора (ДПР), сигналы от которых поступают в коммутатор.

ДПР выдают сигналы положения полюсов постоянного магнита ротора относительно секций обмоток якоря.

Коммутатор подключает обмотки якоря к источнику постоянного тока в соответствии с положением полюсов постоянного магнита ротора. В результате магнитное поле статора вращается со средней частотой, равной средней частоте вращения ротора.

Коммутатор в данном случае является усилителем регулятора.

Управление частотой и направлением вращения БДПТ производится сигналом U_y , поступающим на коммутатор с предыдущего элемента регулятора. Этим элементом, как правило, является последовательное корректирующее устройство, формирующее какой-либо из типовых законов регулирования.

Рассмотрим работу трехфазного БДПТ, в котором для определения положения ротора применяют 3 датчика Холла. Сигнал на выходе датчика появляется при прохождении мимо него полюса **N** магнитного диска, закрепленного на одном валу с ротором двигателя (рис. 3.1).

Сигналы датчиков сдвинуты относительно друг друга на 120° и сигнал каждого датчика длится 180° угла поворота ротора.

Это позволяет удерживать ключи инвертора в замкнутом состоянии 120° при сдвиге замыкания ключей на 60° и, тем самым, подавать соответствующее напряжение на обмотки статора.

Таким образом, состояние двигателя (подключение обмоток статора к источнику питания) определяется углом поворота ротора. Двигатель переходит из одного состояния в последующее при повороте ротора на 60° .

Следовательно, двигатель может находиться в одном из 6 состояний, представленных на рис. 3.2. Для наглядности на рис. 3.2 показано, что напряжение от источника питания U подается на обмотки статора через контактные ключи. Ключи **Ka+**, **Kb+**, **Kc+** подсоединяют обмотки с положительной полярностью источника тока, а **Ka-**, **Kb-**, **Kc-** – с отрицательной.

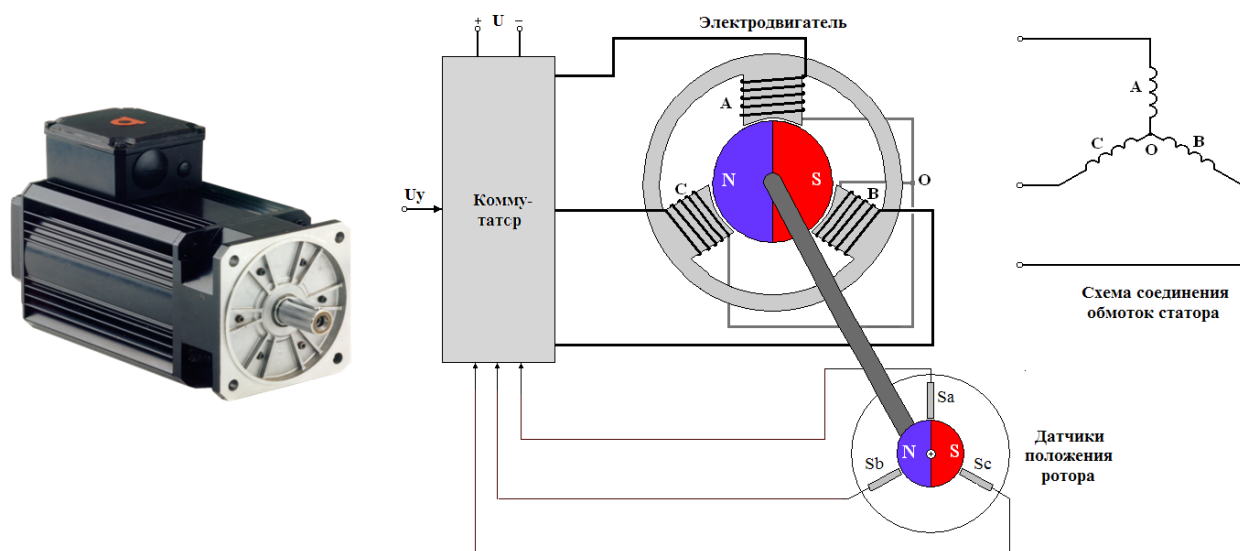


Рис. 3.1 Внешний вид и функциональная схема бесконтактного электродвигателя постоянного тока.

В каждом состоянии:

- имеется сигнал на выходе одного датчика положения ротора или одновременно двух датчиков,
- к источнику питания одновременно подключены последовательно две обмотки статора.

В качестве исходного состояния БДПТ принято состояние, показанное на рис. 3.2а. Характеристика данного состояния приведена в первой строке таблицы 1.

При данном положении ротора в зоне магнитного полюса **N** ротора находятся датчики **Sa** и **Sc**, по сигналам которых замыкаются ключи **Ka+** и **Kb-**. В обмотках фаз **A** и **B** появляется ток, который протекает последовательно от положительной полярности источника питания через обмотку **A**, точку соединения

всех обмоток **О** и через обмотку **В**. Соответствующие полюса обмоток статора получают магнитные полярности **S** и **N**. В результате взаимодействия магнитных полей статора и ротора возникает магнитный момент, вращающий ротор по часовой стрелке.

После поворота ротора на угол 60° в зоне магнитного полюса **N** ротора останется только датчик **Sa**, размыкается ключ **Kb-** и замыкается ключ **Kc-**.

Магнитные полюса статора будут создаваться обмотками **A** и **C** так, что это вызовет последующий поворот ротора по часовой стрелке.

Поведение БДПТ при дальнейшем повороте ротора может быть установлено по рис. 3.2 и таблице 1.

Таблица 1

Состояния трехфазного бесконтактного двигателя постоянного тока
(при вращении ротора по часовой стрелке)

№ сост.	Угол по- ворота ро- тора, гр.	Сигналы датчиков положения ротора			Замкнутые ключи		Напряжение на обмотках фаз		
		Sa	Sb	Sc	+	-	A	B	C
a	0 (360)	1	0	1	Ka+	Kb-	+	-	0
b	60	1	0	0	Ka+	Kc-	+	0	-
c	120	1	1	0	Kb+	Kc-	0	+	-
d	180	0	1	0	Kb+	Ka-	-	+	0
e	240	0	1	1	Kc+	Ka-	-	0	+
f	300	0	0	1	Kc+	Kb-	0	-	+

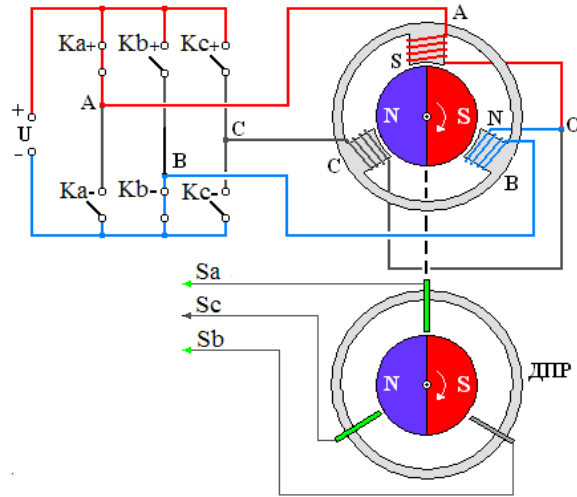
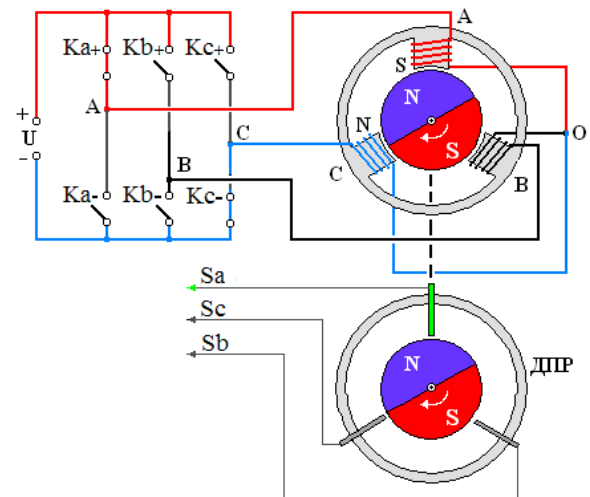
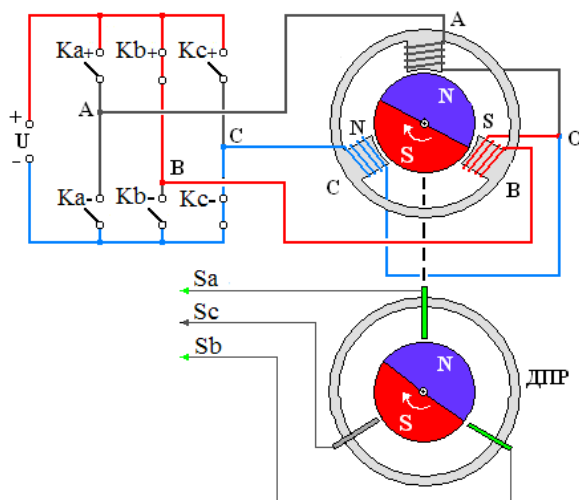
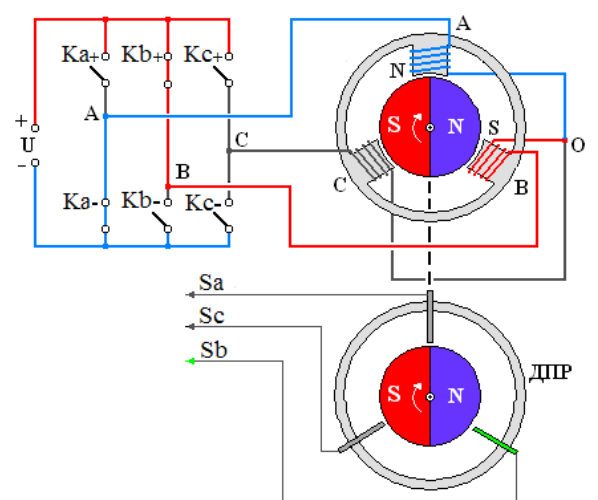
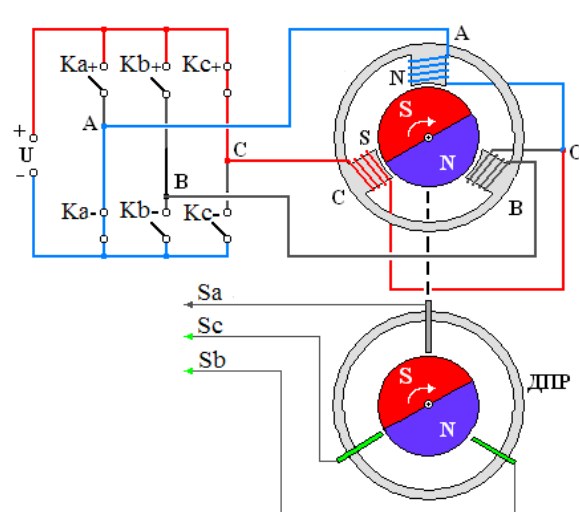
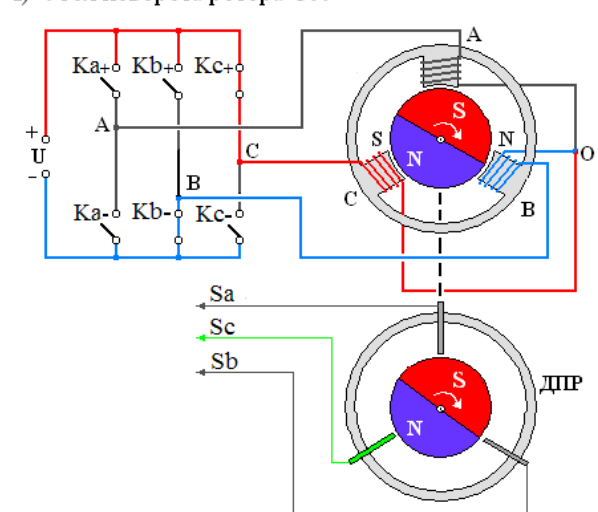
а) Угол поворота ротора 0° (360°)б) Угол поворота ротора 60° в) Угол поворота ротора 120° г) Угол поворота ротора 180° е) Угол поворота ротора 240° ф) Угол поворота ротора 300° 

Рис. 3.2 Состояния трехфазного бесконтактного электродвигателя постоянного тока (вращение по часовой стрелке).

Временная диаграмма работы датчиков, ключей и обмоток трехфазного БДПТ приведена на рис. 3.3.

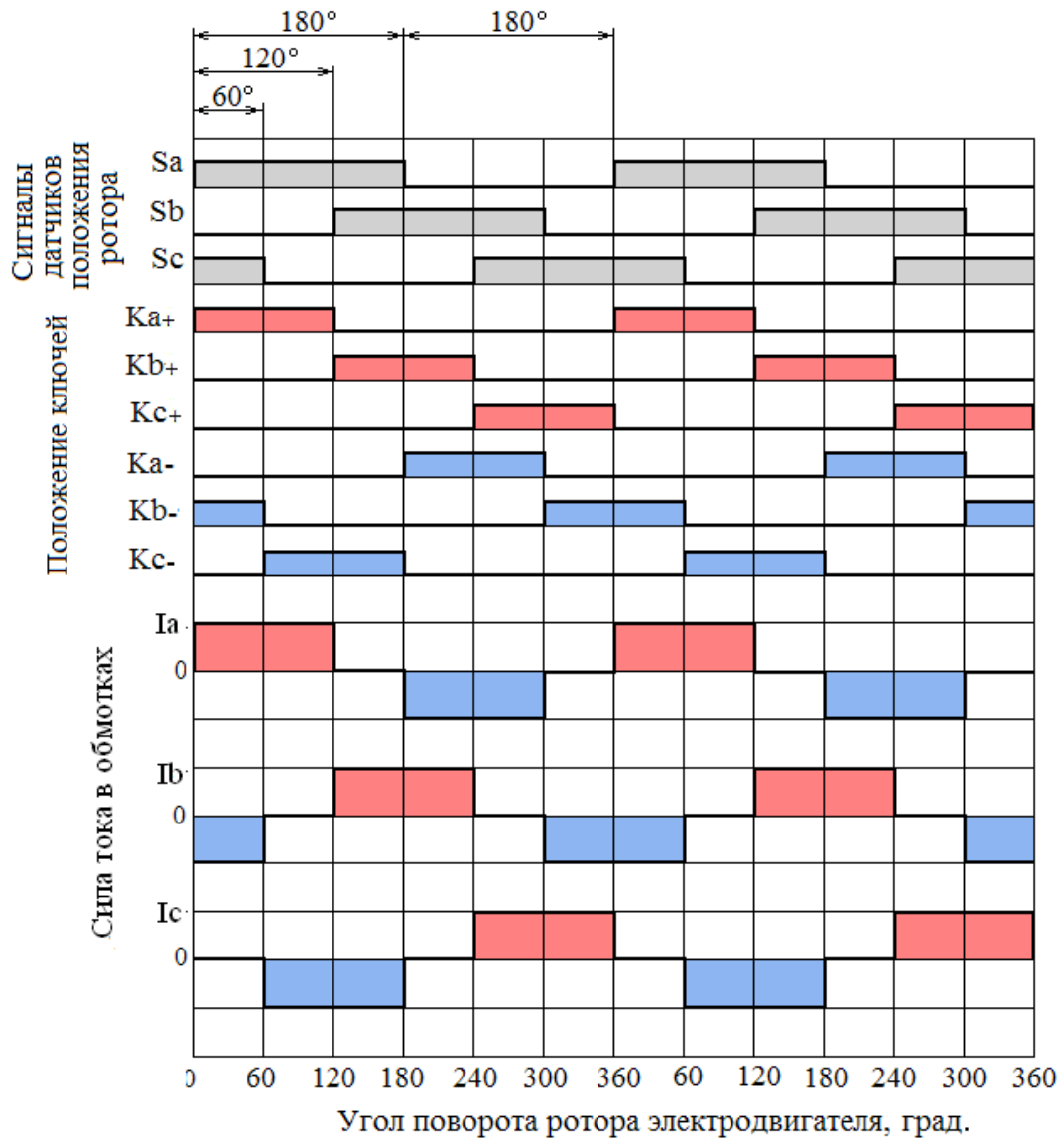


Рис. 3.3 Временная диаграмма работы датчиков, ключей и обмоток трехфазного БДПТ (120-ти градусная модуляция, вращение по часовой стрелке).

До сих пор рассматривалась работа БДПТ по наиболее простому способу 120-ти градусной модуляции [1]. В этом случае ток протекает только через две обмотки в течение 120°, а затем следует пауза 60°. Следовательно, каждая обмотка работает 2/3 периода, и мощность двигателя также используется на 2/3.

Указанные недостатки могут быть устранены применением 180-ти дусной модуляции [2], когда ток протекает одновременно по всем трем обмоткам. Временная диаграмма работы БДПТ для этого способа приведена на рис. 3.4.

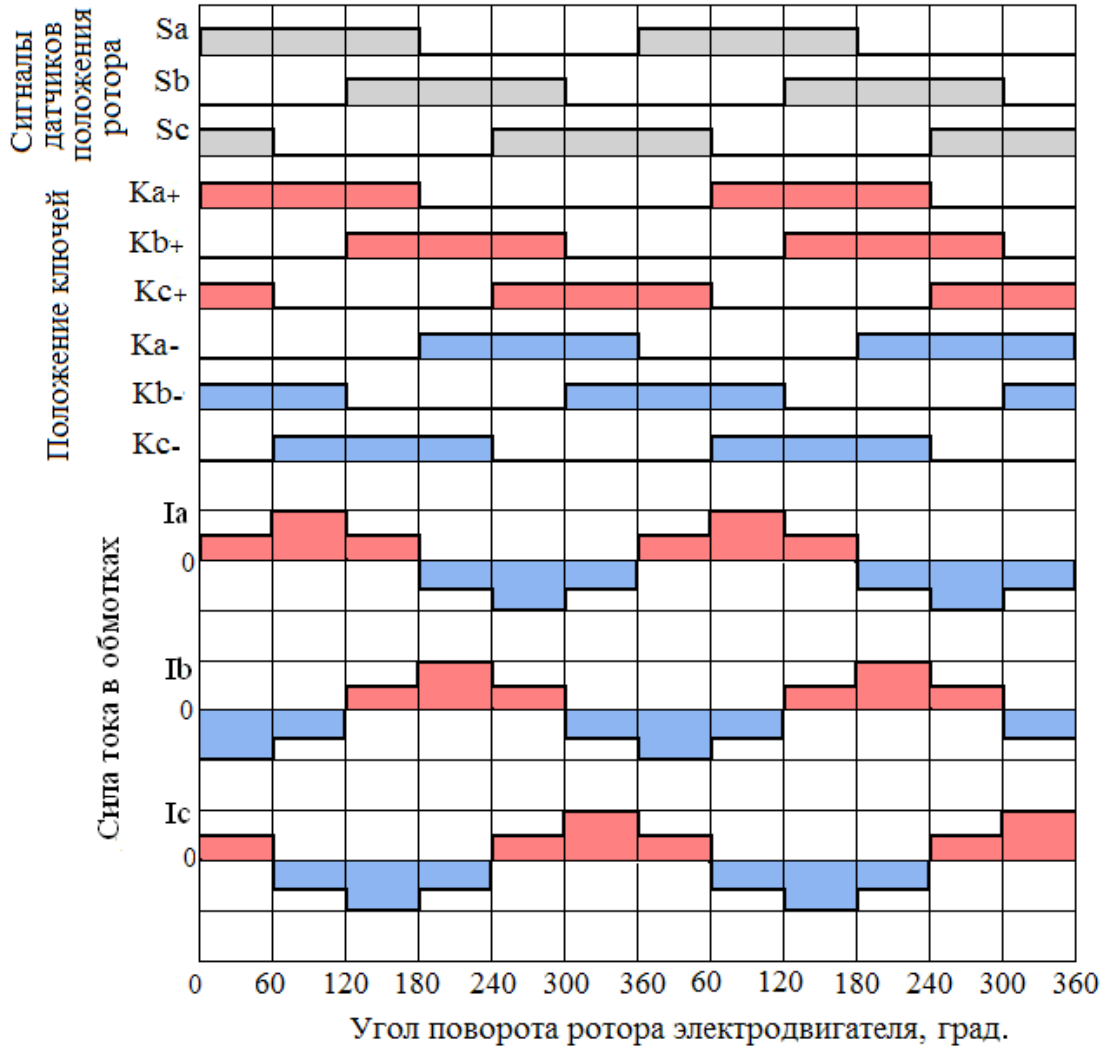


Рис. 3.4 Временная диаграмма работы датчиков, ключей и обмоток трехфазного БДПТ (180-ти градусная модуляция).

В течение первых 60° ток втекает через обмотки **A** и **C** (токи **Ia** и **Ic**) и вытекает через обмотку **B** (ток **Ib**). Далее переключается обмотка **C** и на следующие 60° ток втекает через обмотку **A** и вытекает через обмотки **B** и **C**. Переключение обмоток при остальных углах поворота ротора происходит аналогично.

При таком способе модуляции все три обмотки работают одновременно, внося свой вклад в создание вращающего момента ротора.

Коммутатор БДПТ (рис. 3.5) составляют два модуля:

- инвертор,
- контроллер.

Трехфазный инвертор управляет подачей напряжения на фазовые обмотки **A, B, C**. Ключами инвертора, как правило, являются биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT транзисторы) [14].

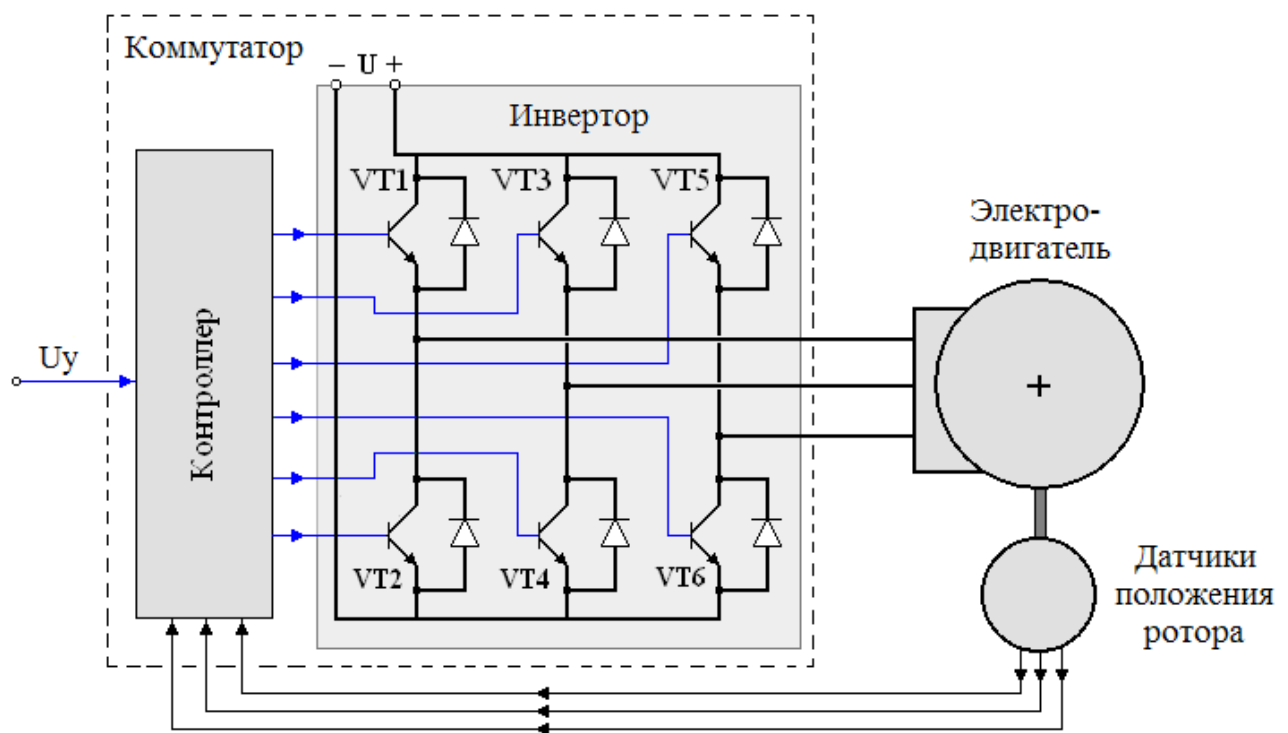


Рис. 3.5 Схема БДПТ с транзисторным инвертором.

Функции ключей **Ka+**, **Kb+**, **Ka-**, **Kb-**, **Kc-**, соединяющих обмотки статора с источником постоянного напряжения U (см. рис. 3.5), выполняют 6 силовых транзисторов **VT1 – VT6**. Транзисторы **VT1, VT3, VT5** подсоединяют обмотки с положительной полярностью источника, а **VT2, VT4, VT6** – с отрицательной.

Параллельно каждому транзистору подключен обратный диод, который создает цепь для протекания тока, создаваемого ЭДС самоиндукции отключенной обмотки [13].

КОНТРОЛЛЕР УПРАВЛЯЕТ ВКЛЮЧЕНИЕМ И ВЫКЛЮЧЕНИЕМ ТРАНЗИСТОРОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВЕЛИЧИНЫ И ЗНАКА УПРАВЛЯЮЩЕГО СИГНАЛА U_U . АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ БДПТ ФОРМИРУЕМЫЕ В КОНТРОЛЛЕРЕ РАССМОТРЕНЫ ДАЛЕЕ. КОНТРОЛЛЕРЫ, КАК ПРАВИЛО, ИЗГОТОВЛЯЮТСЯ НА МИКРОПРОЦЕССОРАХ, ПОЗВОЛЯЮЩИХ РЕАЛИЗОВАТЬ ДОСТАТОЧНО СЛОЖНЫЕ АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ БДПТ И ВЫПОЛНЯТЬ ИХ С НЕОБХОДИМЫМ БЫСТРОДЕЙСТВИЕМ.

3.2 Датчики положения ротора БДПТ

В следящих системах с БДПТ датчики положения используются для следующих целей:

- определение положения ротора БДПТ относительно его статора для управления переключением подачи напряжения на обмотки статора,
- вычисление частоты вращения ротора для контура регулирования частоты вращения электродвигателя,
- определение положения ИМ для контура следящей системы.

В предыдущем разделе для наглядности рассматривался БДПТ, в котором для определения положения ротора использовались датчики Холла.

В следящих системах с микроконтроллерами все указанные задачи решаются с помощью импульсных датчиков двух типов: энкодеров (encoder) и резольверов (resolver).

3.2.1 Энкодеры

Наиболее распространенными являются оптические энкодеры [4], [7].

Устройство трехканального оптического энкодера, наиболее подходящего для использования в следящих системах, показано на рис. 3.6.

Основу энкодера составляет прозрачный диск, вращаемый от ротора электродвигателя. На диск нанесены 2 concentрических пояса затемненных прямоугольников **A** и **B**, а также маркер начального положения диска (ротора) **0**.

В корпусе энкодера установлены источники света (светодиоды) и светодетекторы (фотодиоды, фототранзисторы), образующие оптопары [13].

Вращение диска вызывает прохождение прозрачных и непрозрачных участков диска через оптопару, что генерирует последовательности импульсов, снимаемых со светодетекторов.

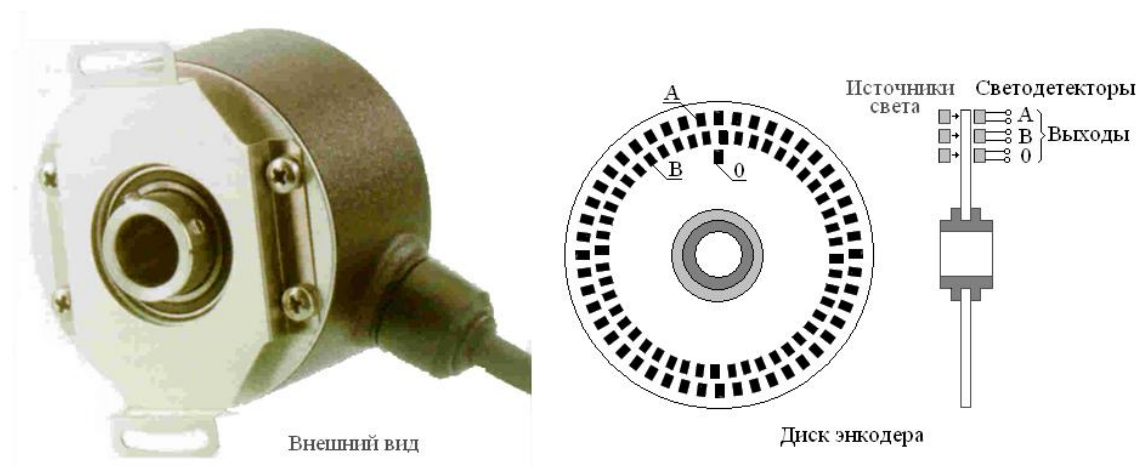


Рис. 3.6 Устройство трехканального энкодера.

Средства технологии позволяют получить за один оборот диска 1000 импульсов и более.

Энкодер является датчиком приращений, который измеряет угол поворота ротора электродвигателя от начального состояния. При потере питания энкодера информация о положении ротора теряется.

Трехканальный энкодер содержит (рис. 3.6):

- два канала измерения положения ротора **A** и **B**, затемненные участки которых сдвинуты на 90° ,
- канал определения начального положения ротора **0**.

Энкодер генерирует выходные импульсы в каналах **A** и **B**, которые подсчитываются реверсивным счетчиком. Показания счетчика, таким образом, соответствуют углу поворота ротора от начального положения.

Энкодеры позволяют применять квадратурное определение положения ротора, при котором счетчик импульсов срабатывает от фронтов сигналов энкодера. При этом увеличивается число импульсов за один оборот ротора, что, соответственно, повышает точность измерения угла поворота ротора:

- в 2 раза, если счетные импульсы формируются из фронтов сигналов канала **A** (или **B**),
- в 4 раза, если счетные импульсы формируются из фронтов сигналов канала **A** и **B**,

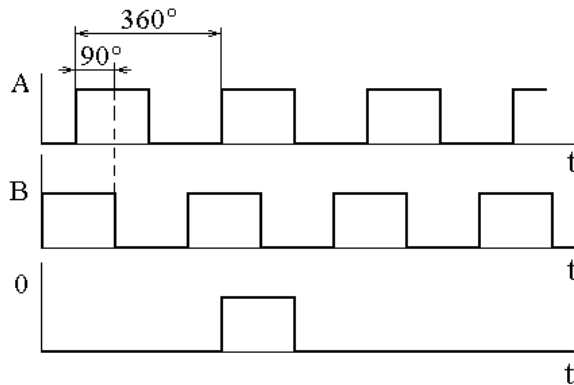
Канал индикации начального положения вырабатывает один импульс за один оборот ротора. Этот импульс называется сигналом исходного положения, а также индексом, реперным сигналом, Z-импульсом.

Сигнал исходного положения используется для сброса показаний счетчика импульсов после полного оборота ротора, что обнуляет накопившуюся погрешность измерений.

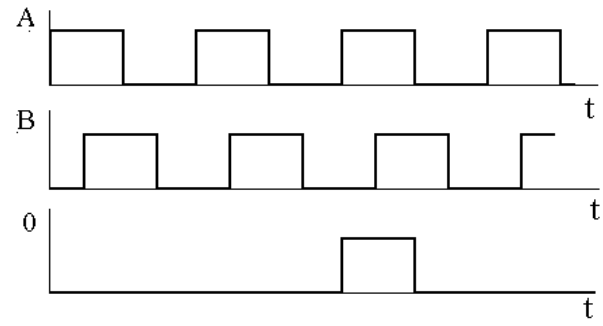
Импульсы, которые генерируются каналами **A** и **B**, сдвинуты относительно друг друга по фазе на 90° (см. рис. 3.7). Это дает возможность с помощью внешних логических устройств определять направление вращения ротора [7], [14].

Направление вращения определяется по опережению или отставанию по фазе сигнала канала **A** относительно сигнала канала **B**.

а) Вращение по часовой стрелке



б) Вращение против часовой стрелки



с) Определение направления вращения с помощью D-триггера

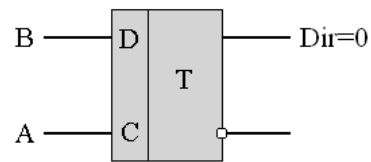
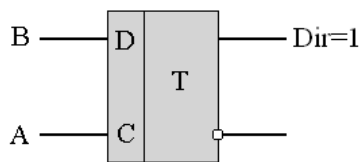


Рис. 3.7 Выходные сигналы трехканального энкодера.

В частности направление вращения может быть определено с помощью D-триггера [14] (рис. 3.7с), где:

- сигнал канала **В** является информационным,
- сигнал канала **А** является синхронизирующим,
- выходной сигнал триггера **Dir=1** при отставании сигнала канала **А** от сигнала канала **В** (вращение ротора в одном направлении), и **Dir=0** при отставании сигнала канала **В** от сигнала канала **А** (вращение ротора в противоположном. направлении).

С помощью одного энкодера можно решить все перечисленные выше задачи датчиков положения.

Частота вращения ротора электродвигателя определяется посредством измерения либо интервала времени между импульсами, либо числа импульсов в пределах временного интервала постоянной длительности [14].

Сигналы на выходах энкодера содержат шумы и помехи. Исключение их влияния на результаты измерений требует использования фильтров [4].

Блок-схема обработки сигналов энкодера, дающая цифровое значение угла поворота ротора БДПТ показана на рис. 3.8.



Рис. 3.8 Блок-схема обработки сигналов энкодера.

Импульсные сигналы каналов энкодера **ChA** и **ChB**, а также сигнал начального положения ротора **Index** через входные фильтры поступают на квадратурный декодер.

Декодер формирует:

- прямоугольные импульсы **Cnt** при прохождении фронтов входных сигналов,
- сигнал направления вращения ротора **Dir**,
- сигнал сброса счетчика **Reset** при появлении сигнала **Index**.

Реверсивный счетчик выдает цифровой сигнал γ угла поворота ротора в пределах одного оборота ротора.

Сигналы, аналогичные сигналам рассмотренных выше ДПР, с помощью энкодера формируются следующим образом:

$$S_a = \begin{cases} 1 & \text{при } 0^\circ < \gamma \leq 180^\circ, \\ 0 & \text{при } 180^\circ < \gamma \leq 360^\circ, \end{cases}$$

$$S_b = \begin{cases} 0 & \text{при } 0^\circ < \gamma \leq 120^\circ, \\ 1 & \text{при } 120^\circ < \gamma \leq 300^\circ, \\ 0 & \text{при } 300^\circ < \gamma \leq 360^\circ, \end{cases}$$

$$S_c = \begin{cases} 1 & \text{при } 0^\circ < \gamma \leq 60^\circ, \\ 0 & \text{при } 60^\circ < \gamma \leq 240^\circ, \\ 1 & \text{при } 240^\circ < \gamma \leq 360^\circ, \end{cases}$$

Измерение положения исполнительного механизма, как правило, водится дополнительно устанавливаемым на выходном валу редуктора ИМ таким же трехканальным энкодером для предотвращения накопления погрешности измерения.

3.2.2 Резольверы

Резольверы [16] служат для измерения абсолютного положения вала двигателя в пределах одного оборота. Кроме того, из сигнала резольвера могут быть получены сигнал частоты вращения вала и импульсные сигналы положения вала.

Резольвер, например, используется в системе управления топливной рейкой главного судового дизеля [21].

Резольвер работает на принципе вращающегося трансформатора и состоит из ротора с обмоткой и статора с двумя обмотками (рис. 3.9). Отличие от вращающегося трансформатора заключается в том, что обмотки статора сдвинуты относительно друг друга на 90° .

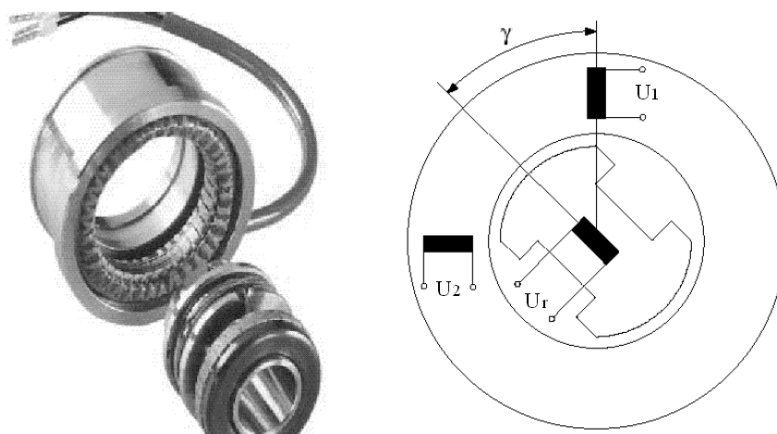


Рис. 3.9 Конструктивное и схематическое устройство резольвера.

Ротор резольвера закрепляется на валу электродвигателя. Питание обмотки ротора производится бесконтактным способом. Для этого на статоре и роторе предусмотрены дополнительные обмотки, с помощью которых первичное напряжение на роторную обмотку передается на трансформаторном принципе (рис. 3.10). Дополнительная обмотка на роторе и его рабочая обмотка соединены электрически, поэтому напряжение возбуждения, передаваемое со статора на ротор через дополнительную обмотку будет приложено и к рабочей обмотке ротора.

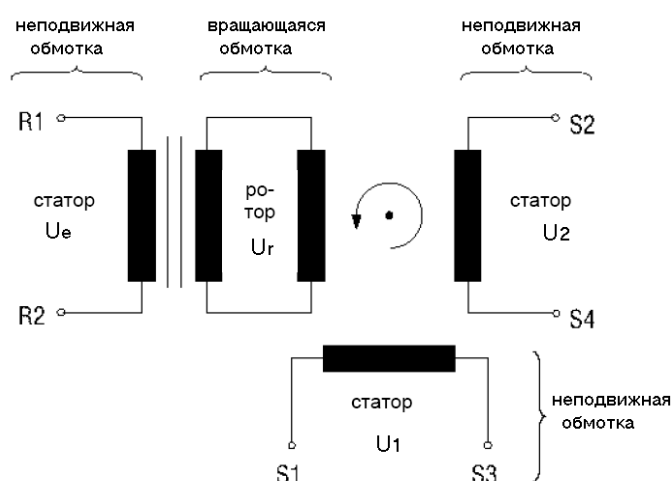


Рис. 3.10 Эквивалентная схема резольвера.

Принцип действия резольвера заключается в следующем. В зависимости от положения ротора в обмотках статора индуктируются напряжения с амплитудой, изменяющейся в функции угла поворота ротора.

При угле поворота $\gamma=0$ (рис. 3.9) через обмотку с выходным напряжением U_1 проходит полный поток возбуждения и значение напряжения U_1 будет максимальным. При повороте ротора на угол $\gamma=90^\circ$ напряжение U_1 уменьшается до 0. Затем напряжение U_1 вновь возрастает до максимума при угле поворота ротора $\gamma=180^\circ$. Таким образом, напряжение имеет огибающую, изменяющуюся по закону косинуса (рис. 3.10). Напряжение U_2 на второй обмотке сдвинуто относи-

тельно U_1 на 90° и имеет при $\gamma=0$ нулевое значение. Это напряжение достигает максимума при $\gamma=90^\circ$ и затем снова уменьшается до нуля при $\gamma=180^\circ$. Следовательно, огибающая напряжения U_2 изменяется по закону синуса (рис. 3.11).

Выходные напряжения резольвера U_1 и U_2 в зависимости от входного напряжения U_e изменяются следующим образом:

$$U_e = U_s \sin \omega t,$$

$$U_1 = U_s \sin \omega t \cos \gamma,$$

$$U_2 = U_s \sin \omega t \sin \gamma,$$

где γ — угол поворота ротора,

ω — угловая частота входного напряжения U_e ,

U_s — амплитуда входного напряжения.

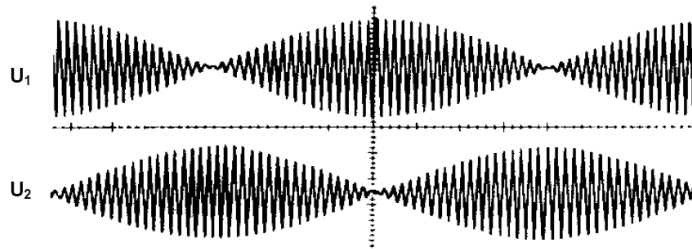


Рис. 3.11 Выходные напряжения резольвера.

Сигналы резольвера преобразуются в цифровые значения в преобразователе резольвер-код (РК-преобразователь), который выдает следующие величины:

- угловое положение ротора γ ,
- частоту вращения ротора.

Схема преобразователя резольвер-код приведена на рис. 3.12.

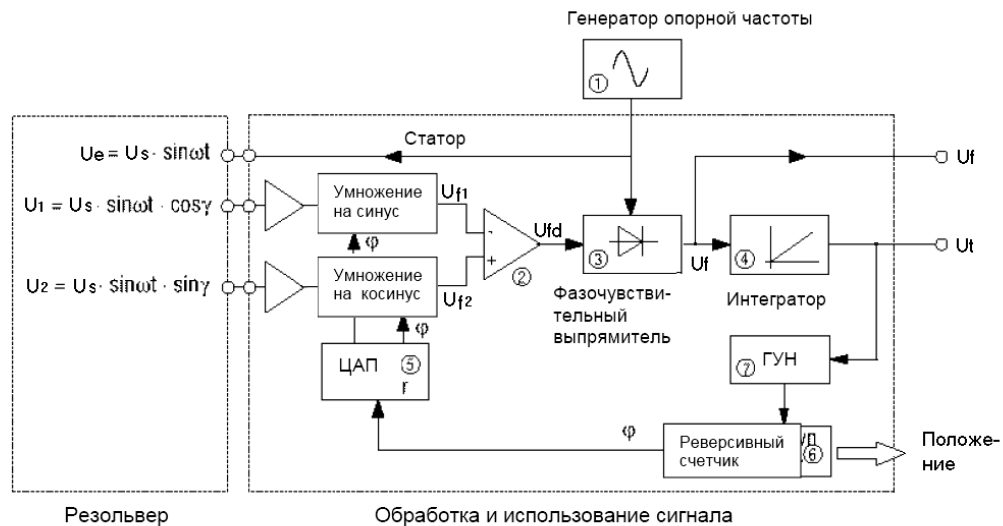


Рис. 3.12 Схема преобразователя резольвер-код.

Генератор опорной частоты через статорную обмотку резольвера подает на его ротор переменное напряжение около 10 В при частоте около 7 кГц. Цифровое значение измеренного углового положения ротора Φ получается в реверсивном счетчике 6. Это значение преобразуется в аналоговый сигнал в цифро-аналоговом преобразователе 5.

Выходные сигналы резольвера U_1 и U_2 умножаются в аналоговой форме на синус и косинус угла Φ . В результате получаются напряжения:

$$U_{f1} = U_s \sin \omega t \cos \gamma \sin \Phi,$$

$$U_{f2} = U_s \sin \omega t \sin \gamma \cos \Phi.$$

В операционном усилителе 2 вычисляется разность этих сигналов:

$$U_{fd} = U_s \sin \omega t (\sin \gamma \cos \Phi - \cos \gamma \sin \Phi)$$

или после преобразования

$$U_{fd} = U_s \sin \omega t \sin (\gamma - \Phi).$$

В фазочувствительном выпрямителе 3 сигнал U_{fd} демодулируется, чтобы исключить несущую частоту. Сигнал на выходе выпрямителя U_f пропорционален $\sin (\gamma - \Phi)$. Этот сигнал поступает на выход РК-преобразователя и на вход интегратора 4, который интегрирует сигнал рассогласования.

Выходной сигнал интегратора U_t поступает на вход генератора ГУН 7, управляемого напряжением. Если между углами γ и ϕ существует разность, то интегратор 4 формирует на своем выходе выпрямленное напряжение U_t , с помощью которого ГУН 7 вырабатывает импульсы, поступающие в реверсивный счетчик 7.

Элементы со 2-го по 7-й образуют замкнутый контур, обеспечивающий равенство $\gamma = \phi$. При этом цифровой сигнал реверсивного счетчика равен аналоговому значению угла резольвера.

При непрерывном вращении ротора резольвера ГУН вырабатывает импульсы до тех пор, пока цифровое значение на счетчике не совпадет с аналоговым сигналом углового положения ротора. Частота сигналов ГУН при этом пропорциональна частоте вращения ротора. Из этого следует, что выходное напряжение интегратора U_t также пропорционально частоте вращения электродвигателя и резольвера.

Для следящих систем с микропроцессорами удобнее использовать датчики положения с выходными сигналами, аналогичными выходными сигналам энкодера. Поэтому резольвер обычно дополняется моделью энкодера, которая по сигналам резольвера формирует сигналы трехканального энкодера, например, в [21]. Эти сигналы проходят обработку по схеме, показанной на рис. 3.8.

БДПТ могут работать и без датчиков положения ротора, что позволяет:

- упростить устройство,
- уменьшить стоимость,
- повысить надежность.

Для управления БДПТ без датчиков используются следующие способы [2], [23]:

- измерение противо-ЭДС электродвигателя,
- измерение третьей гармоники напряжения на статоре,
- измерение интервала состояния проводимости диодов инвертора,

- измерение напряжений и токов с использованием математической модели БДПТ.

Наибольшее распространение получило измерение противо-ЭДС, которое может быть выполнено на делителях напряжения согласно схеме на рис. 3.13.

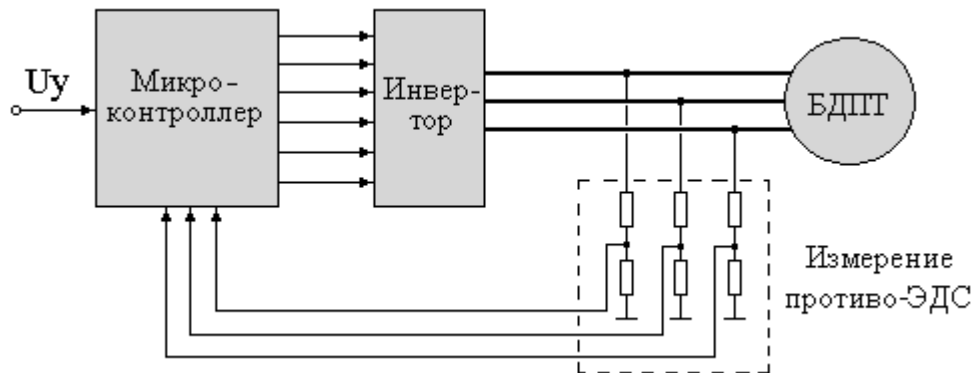


Рис. 3.13 Схема БДПТ с измерением противо-ЭДС.

Определение положения ротора БДПТ с использованием противо-ЭДС характеризуется высоким уровнем шума в сигналах измерений, особенно, при малых частотах вращения ротора. Применяется данный метод, как правило, в БДПТ бытовых электронных устройств (видеокамеры, CD-проигрыватели).

4 УПРАВЛЕНИЕ БЕСКОНТАКТНЫМИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯМИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Управление БДПТ состоит из:

- непосредственного управления электродвигателем,
- управления БДПТ как элементом следящей системы (в данном учебном пособии).

Непосредственное управление электродвигателем включает:

- переключение подачи напряжения на обмотки статора для создания вращающегося магнитного поля,
- управление изменением направления вращения (реверсом) двигателя,
- управление частотой вращения двигателя.

Далее рассматривается управление трехфазным БДПТ при 6-ти чатой 120-ти градусной модуляции.

4.1 Создание вращающегося магнитного поля

Вращающееся магнитное поле создается путем подачи на каждый из ключей инвертора сигналов длительностью 120° со сдвигом на 60° относительно друг друга.

В случае вращения ротора электродвигателя с постоянной частотой вращения по часовой стрелке это достигается изменением состояния ключей в зависимости от состояния ДПР в соответствии с таблицей 1.

Изменение состояния ключей инвертора согласно таблице 1 может быть определено по следующим логическим выражениям [18]:

$$\begin{aligned} K_{a+} &= S_a \overline{S_b}, & K_{a-} &= \overline{S_a} S_b, \\ K_{b+} &= S_b \overline{S_c}, & K_{b-} &= \overline{S_b} S_c, \\ K_{c+} &= S_c \overline{S_a}, & K_{c-} &= \overline{S_c} S_a. \end{aligned}$$

В системе управления БДПТ изменение состояния ключей инвертора при рассматриваемых условиях работы БДПТ может быть реализовано по логической схеме, приведенной на рис. 4.1.

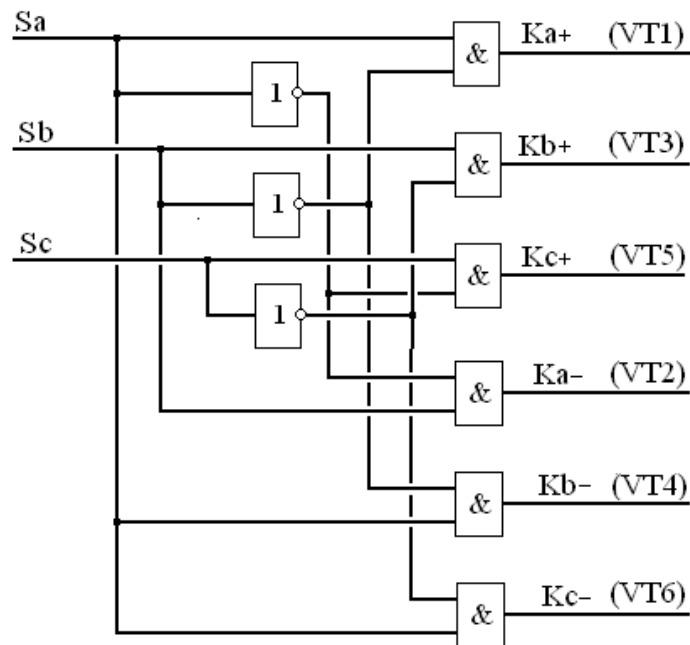


Рис. 4.1 Логическая схема управления инвертором БДПТ при отсутствии реверса и постоянной частоте вращения.

4.2 Реверс БДПТ

Реверс БДПТ, то есть изменение направления его вращения, может быть выполнен различными способами [13], [18]. Наиболее простым из них является изменение порядка переключения обмоток статора.

Состояние обмоток статора при начальном положении ротора двигателя на 0° показано для вращения:

- по часовой стрелке на рис. 3.2а,
- против часовой стрелки на рис. 4.2.

Различие в состоянии БДПТ при различных направлениях вращения можно увидеть, сравнив эти рисунки.

Состояние датчиков положения ротора и ключей инвертора, обеспечивающих вращение ротора против часовой стрелки приведено в таблице 2.

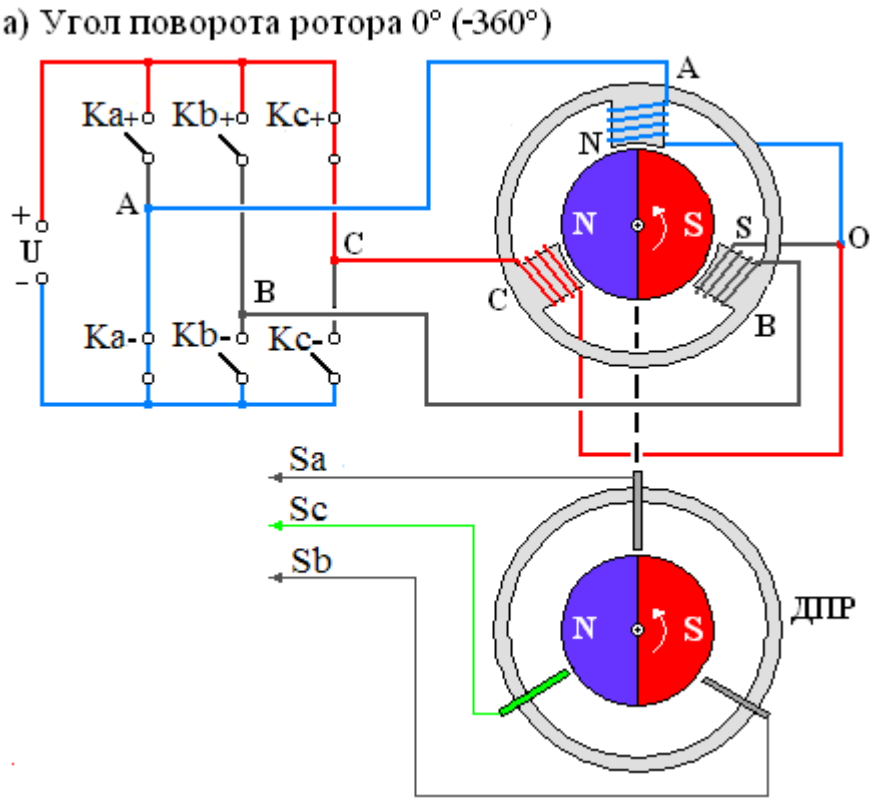


Рис. 4.2 Состояние БДПТ при реверсе на вращение против часовой стрелки.

Таблица 2

Состояния трехфазного бесконтактного двигателя постоянного тока
(при вращении ротора против часовой стрелки)

№ сост.	Угол по- ворота ро- тора, гр.	Сигналы датчиков положения ротора			Замкнутые ключи		Напряжение на обмотках фаз		
		Sa	Sb	Sc	+	-	A	B	C
a	0 (-360)	0	0	1	Kc+	Ka-	-	0	+
b	-60	0	1	1	Kb+	Ka-	-	+	0
c	-120	0	1	0	Kb+	Kc-	0	+	-
d	-180	1	1	0	Ka+	Kc-	+	0	-
e	-240	1	0	0	Ka+	Kb-	+	-	0
f	-300	1	0	1	Kc+	Kb-	0	-	+

Изменение состояния ключей инвертора реверсируемого БДПТ согласно таблицам 1 и 2 может быть определено по следующим логическим выражениям [18]:

$$\begin{aligned} K_{a+} &= Sa\bar{Sb}R + Sa\bar{Sc}\bar{R}, & K_{a-} &= \bar{S}aSbR + \bar{S}aSc\bar{R}, \\ K_{b+} &= Sb\bar{Sc}R + Sb\bar{S}a\bar{R}, & K_{b-} &= \bar{S}bScR + \bar{S}bSa\bar{R}, \\ K_{c+} &= Sc\bar{S}aR + Sc\bar{S}b\bar{R}, & K_{c-} &= \bar{S}cSaR + \bar{S}cSb\bar{R}. \end{aligned}$$

В этих выражениях логическая переменная **R** представляет собой командный сигнал, подаваемый для изменения направления вращения электродвигателя: **R**=1 задает вращение по часовой стрелке, **R**=0 – против часовой стрелки.

Командный сигнал реверса **R** формируется по знаку управляющего сигнала **Uy**, поступающего на вход микроконтроллера (рис. 3.5).

Команда реверса выдается реле реверса **PP**, показанным на рис. 4.5.

Логическая схема управления инвертором БДПТ при наличии реверса и постоянной частоте вращения представлена на рис. 4.3.

4.3 Управление частотой вращения БДПТ

Управление частотой вращения электродвигателей, практически, всех типов, включая БДПТ, производится способом широтно-импульсного модулирования.

Принцип данного регулирования рассмотрим на примере простейшего электродвигателя постоянного тока по схеме, приведенной на рис. 4.4.

Импульсное регулирование частоты вращения ЭД в данном случае производится путем периодического подключения обмоток якоря к источнику постоянного напряжения **U** посредством замыкания и размыкания ключа **K**. Ключом управляет выходной сигнал **Pwm** широтно-импульсного модулятора (ШИМ). При **Pwm**=1 ключ замкнут, **Pwm**=0 ключ разомкнут.

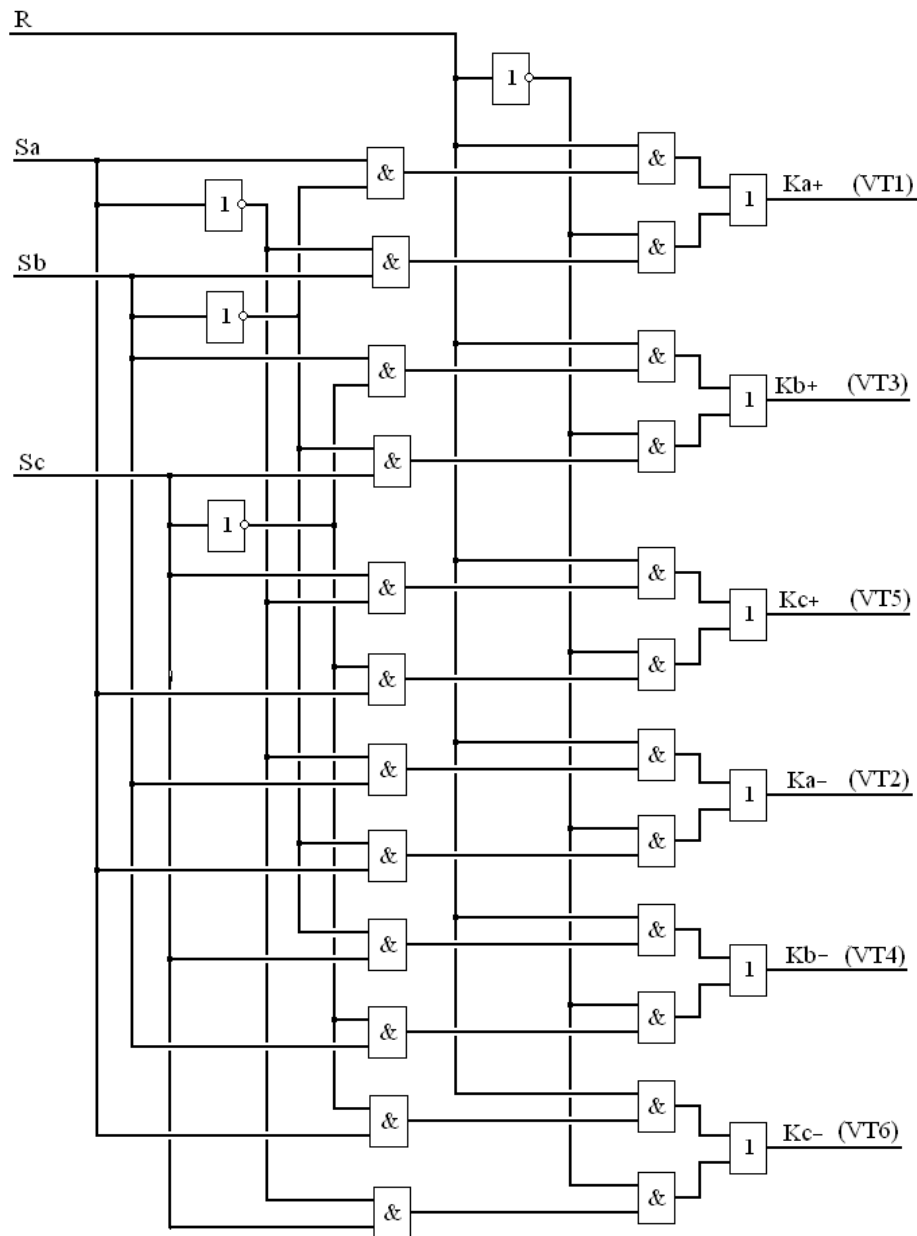


Рис. 4.3 Логическая схема управления инвертором БДПТ при наличии реверса и постоянной частоте вращения.

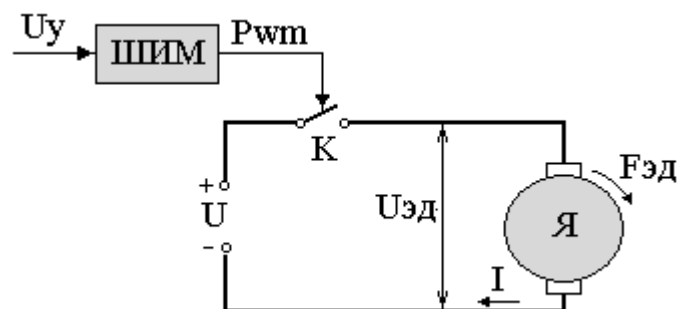


Рис. 4.4 Схема импульсного управления частотой вращения
электродвигателя постоянного тока.

Схема формирования сигнала широтно-импульсного модулирования **Pwm** показана на рис. 4.5.

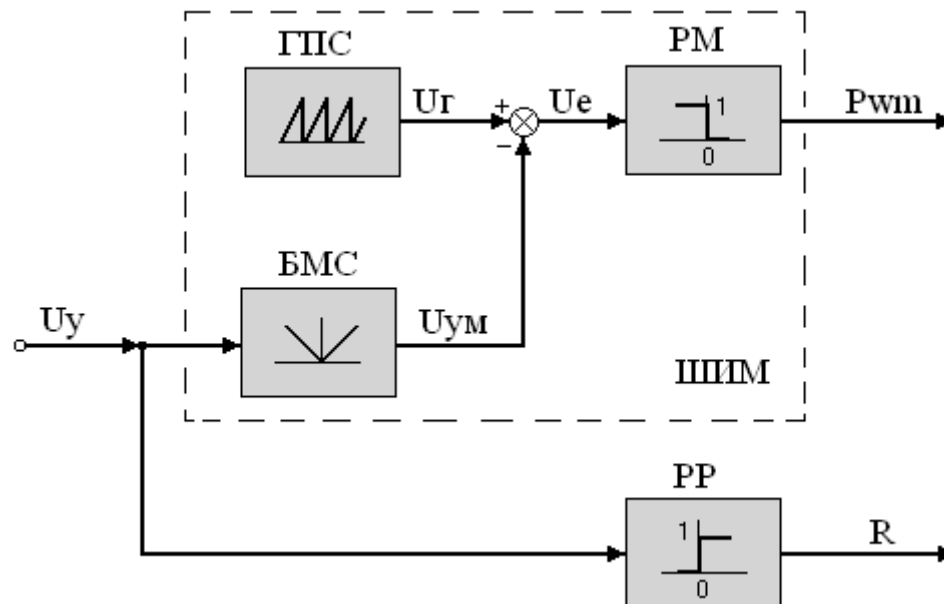


Рис. 4.5 Блок-схема формирования сигналов широтно-импульсного
модулирования и команды реверса.

ШИМ состоит из следующих элементов:

- генератора пилообразного напряжения ГПН,
- блока абсолютной величины (модуля) сигнала БМС,
- реле модуляции РМ.

ГПС формирует пилообразное напряжение **U_г** с постоянной частотой, задаваемой в диапазоне 1-20 кГц, и соответствующим периодом **T_м** (период модуляции). БМС получает абсолютную величину управляющего сигнала **U_{ум}** (**U_{ум} ≥ 0**). В элементе сравнения вычисляется разность **U_е = U_г – U_{ум}**. Сигнал **U_е** поступает на реле модуляции РМ, выходной сигнал которого **Pwm = 1** при **U_е < 0**.

Работу ШИМ показывают два верхних графика на рис. 4.6.

ШИМ генерирует прямоугольные импульсы **Pwm** с периодом **Tм** и длительностью **Tи**. Величина **Tи** зависит от значения поступающего на ШИМ управляющего сигнала **Uy**.

Обычно в применяют широтно-импульсное управление, когда период импульсов **Tм** является постоянным, а длительность импульсов **Tи** является переменной величиной.

Изменение частоты вращения электродвигателя постоянного тока при импульсном управлении показано на рис. 4.6.

При замыкании цепи якоря на время **Tи** к обмоткам статора подводится напряжение **Uэд = U**, ток в цепи якоря **I** нарастает до значения **Imax**. При размыкании цепи якоря ток уменьшается до значения **Imin**.

Среднее напряжение, прикладываемое к двигателю,

$$U_{эд} = U_{ср} = \gamma U ,$$

где $\gamma = Tи / Tм$ – относительная длительность импульсов (коэффициент управления).

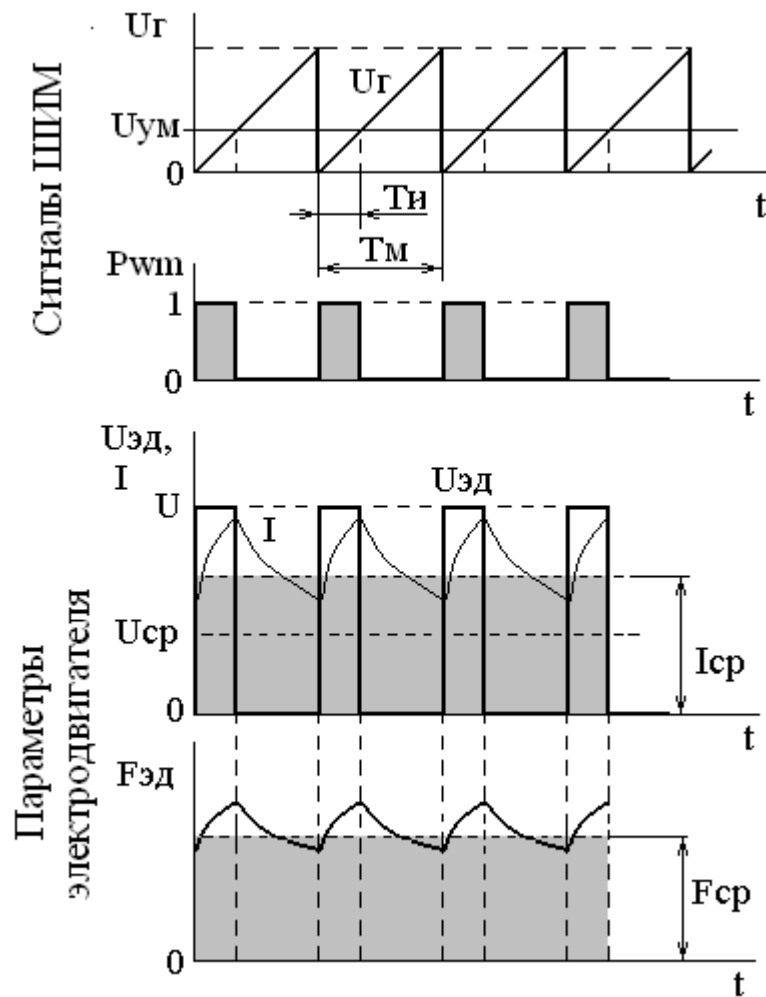


Рис. 4.6 Временная диаграмма работы ШИМ и изменения параметров электродвигателя постоянного тока при импульсном управлении.

Работа электродвигателя при импульсном управлении состоит в чередовании периодов разгона ротора (при подаче импульса) и его торможения (при прекращении импульса). В результате ротор вращается со средней частотой $F_{эд} = F_{ср}$, уменьшенной по сравнению с номинальной.

Уменьшение пульсаций частоты вращения двигателя достигается за счет выбора периода импульсов T_m на порядок меньшим постоянной времени двигателя $T_{эд}$. На практике частота импульсов питания ЭД составляет 0.2 – 20 кГц.

Наличие в структуре БДПТ коммутатора (полупроводникового или микропроцессорного) предоставляет широкие возможности для использования различ-

ных способов импульсного управления частотой вращения двигателя на основе ШИМ по слаботочным цепям [18].

Все способы импульсного управления можно разделить на 3 группы, определяющие различные механические и регулировочные характеристики БДПТ:

- с пассивной паузой,
- с динамическим торможением в паузе,
- с двухполярными импульсами.

Управление с пассивной паузой заключается в том, что во время паузы между управляющими импульсами (когда $P_{wm}=0$) обмотки статора БДПТ отключаются от источника питания посредством закрывания ключей инвертора.

При этом возможны два варианта:

- в паузе отключаются все ключи инвертора, открытые по сигналам датчиков положения ротора (симметричная модуляция);
- в паузе закрывается только одна группа открытых ключей положительной или отрицательной полярности (асимметричная модуляция).

В случае реверсивного управления частотой вращения БДПТ с пассивной паузой и асимметричной модуляцией, когда в импульсном режиме работают ключи, подающие на обмотки положительное напряжения, изменение состояния ключей инвертора определяется следующими логическими зависимостями:

$$\begin{aligned} K_{a+} &= (S_a \overline{S_b} R + S_a \overline{S_c} \overline{R}) P_{wm}, & K_{a-} &= \overline{S_a} S_b R + \overline{S_a} S_c \overline{R}, \\ K_{b+} &= (S_b \overline{S_c} R + S_b \overline{S_a} \overline{R}) P_{wm}, & K_{b-} &= \overline{S_b} S_c R + \overline{S_b} S_a \overline{R}, \\ K_{c+} &= (S_c \overline{S_a} R + S_c \overline{S_b} \overline{R}) P_{wm}, & K_{c-} &= \overline{S_c} S_a R + \overline{S_c} S_b \overline{R}. \end{aligned}$$

Логическая схема данного варианта управления БДПТ представлена на рис. 4.7, а временная диаграмма работы БДПТ – на рис. 4.8.

При симметричной модуляции в режиме ШИМ последовательно работают все ключи. Временная диаграмма работы БДПТ при пассивной симметричной модуляции показана на рис. 4.9. Из диаграммы видно, что каждый ключ работает в режиме ШИМ в течение 60° и, тем самым, обеспечивается равномерная нагрузка всех силовых ключей.

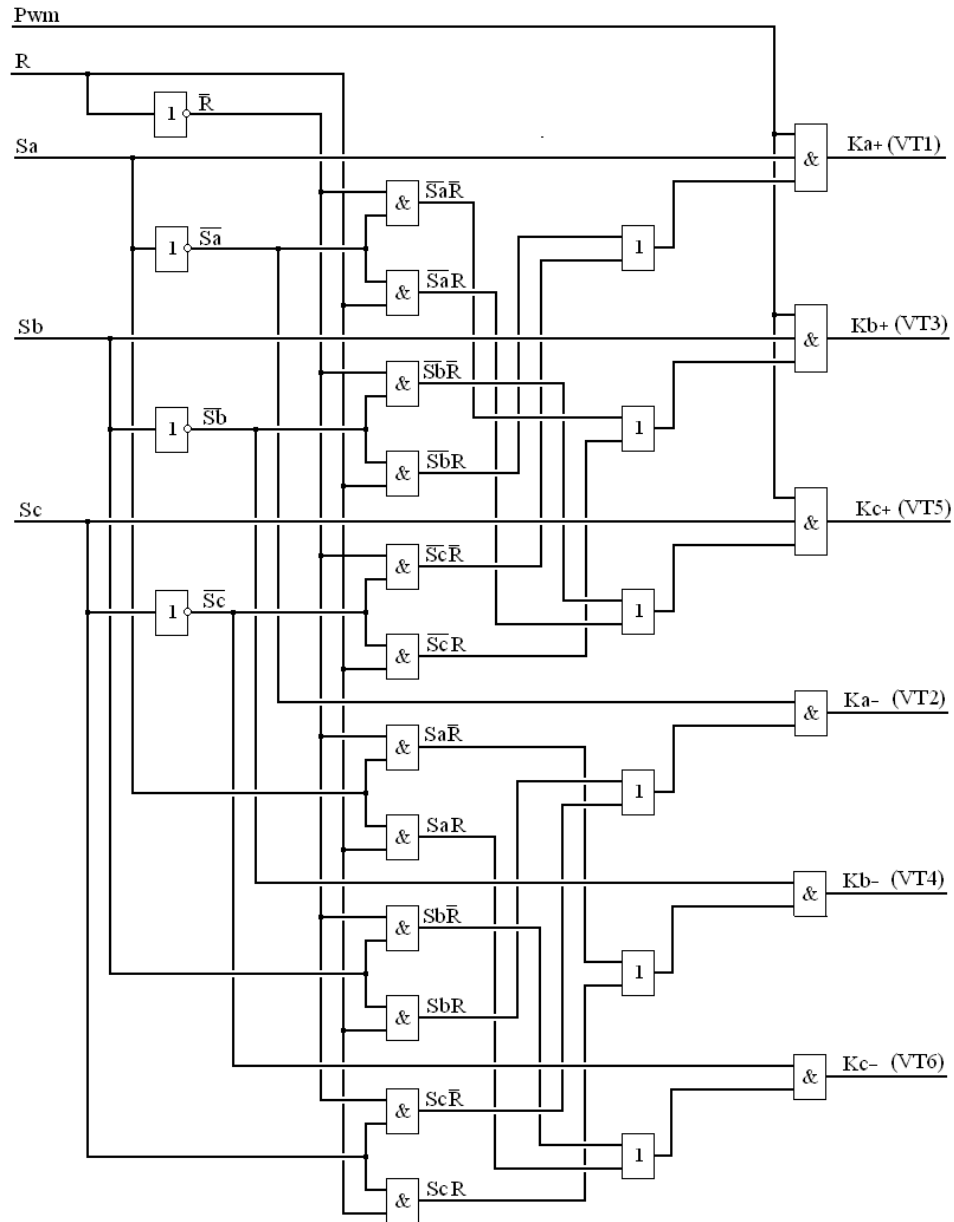


Рис. 4.7 Логическая схема управления инвертором БДПТ при наличии реверса и пассивной асимметричной модуляции.

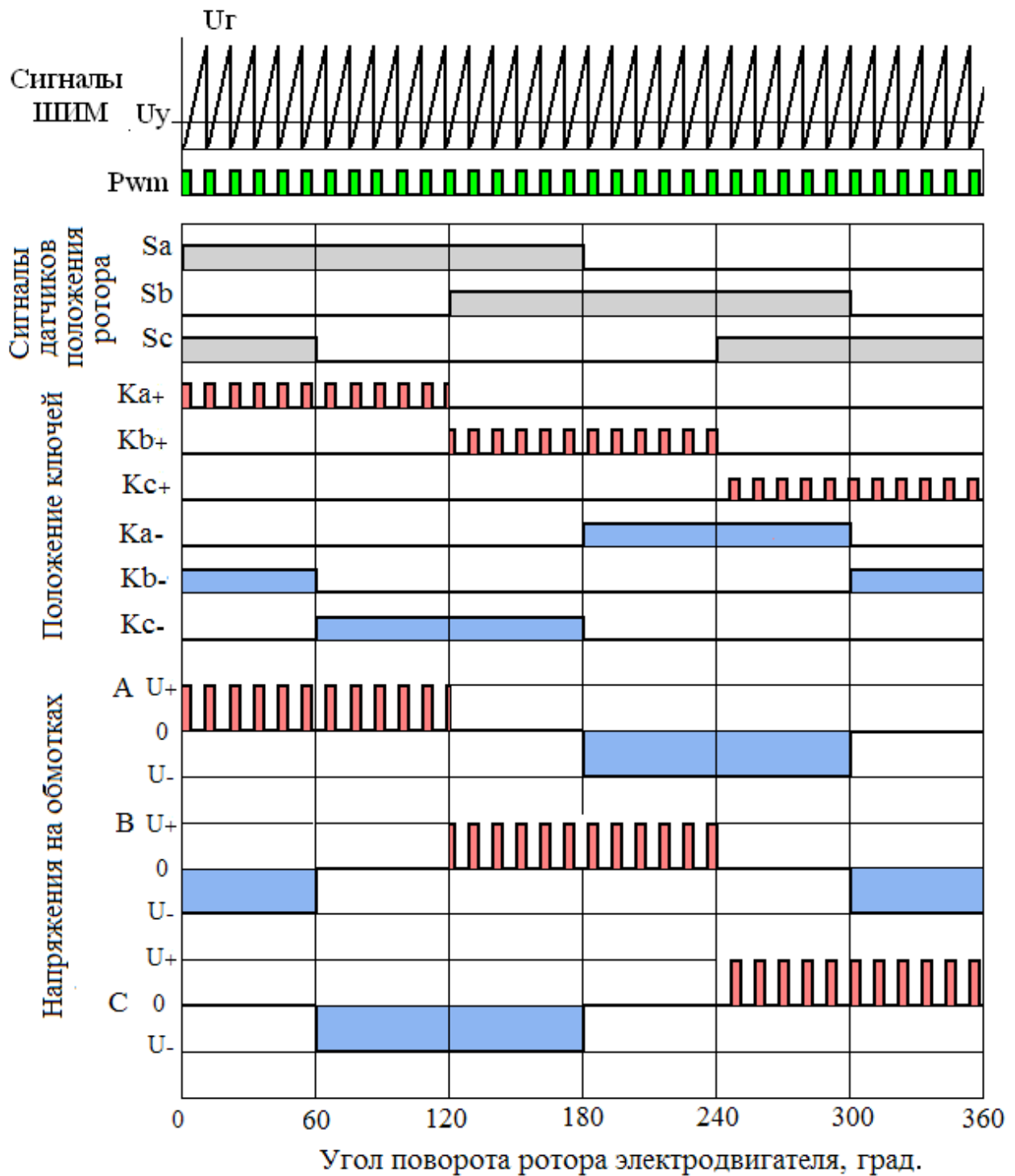


Рис. 4.8 Временная диаграмма работы трехфазного БДПТ при пассивной асимметричной 120-ти градусной модуляции ключей положительной полярности.

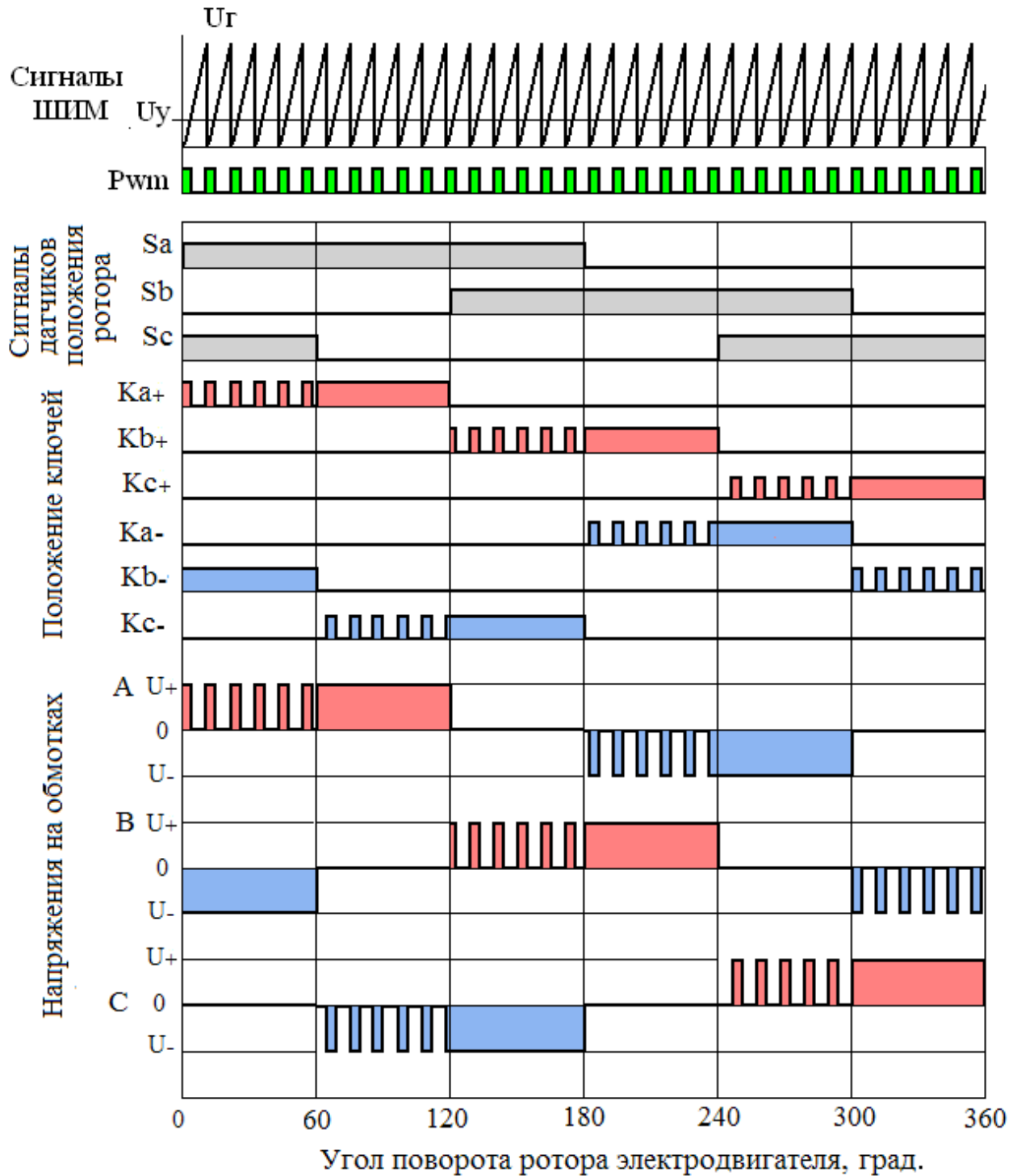


Рис. 4.9 Временная диаграмма работы трехфазного БДПТ при пассивной симметричной 120-ти градусной модуляции.

Управление БДПТ с динамическим торможением в паузе может производиться различными способами.

Наиболее простым является способ несимметричного динамического торможения, при котором открываются ключи отрицательной полярности в паузах в соответствии со следующими логическими выражениями:

$$\begin{aligned} K_{a+} &= (S_a \overline{S_b} R + S_a \overline{S_c} \overline{R}) P_{wm}, & K_{a-} &= \overline{S_a} S_b R + \overline{S_a} S_c \overline{R} + \overline{P_{wm}}, \\ K_{b+} &= (S_b \overline{S_c} R + S_b \overline{S_a} \overline{R}) P_{wm}, & K_{b-} &= \overline{S_b} S_c R + \overline{S_b} S_a \overline{R} + \overline{P_{wm}}, \\ K_{c+} &= (S_c \overline{S_a} R + S_c \overline{S_b} \overline{R}) P_{wm}, & K_{c-} &= \overline{S_c} S_a R + \overline{S_c} S_b \overline{R} + \overline{P_{wm}}. \end{aligned}$$

Логическая схема данного варианта управления БДПТ представлена на рис. 4.10, а временная диаграмма работы на рис. 4.11.

При управлении частотой вращения БДПТ двухполярными импульсами в паузах между импульсами ШИМ к обмоткам статора подаются напряжения противоположного знака. В этом случае при коэффициенте управления $\gamma=0.5$ ротор двигателя неподвижен, так как продолжительность его включения на вращение в каждом направлении одинакова. Такой способ отличается низкими энергетическими характеристиками при довольно высоком качестве механических и регулировочных характеристик.

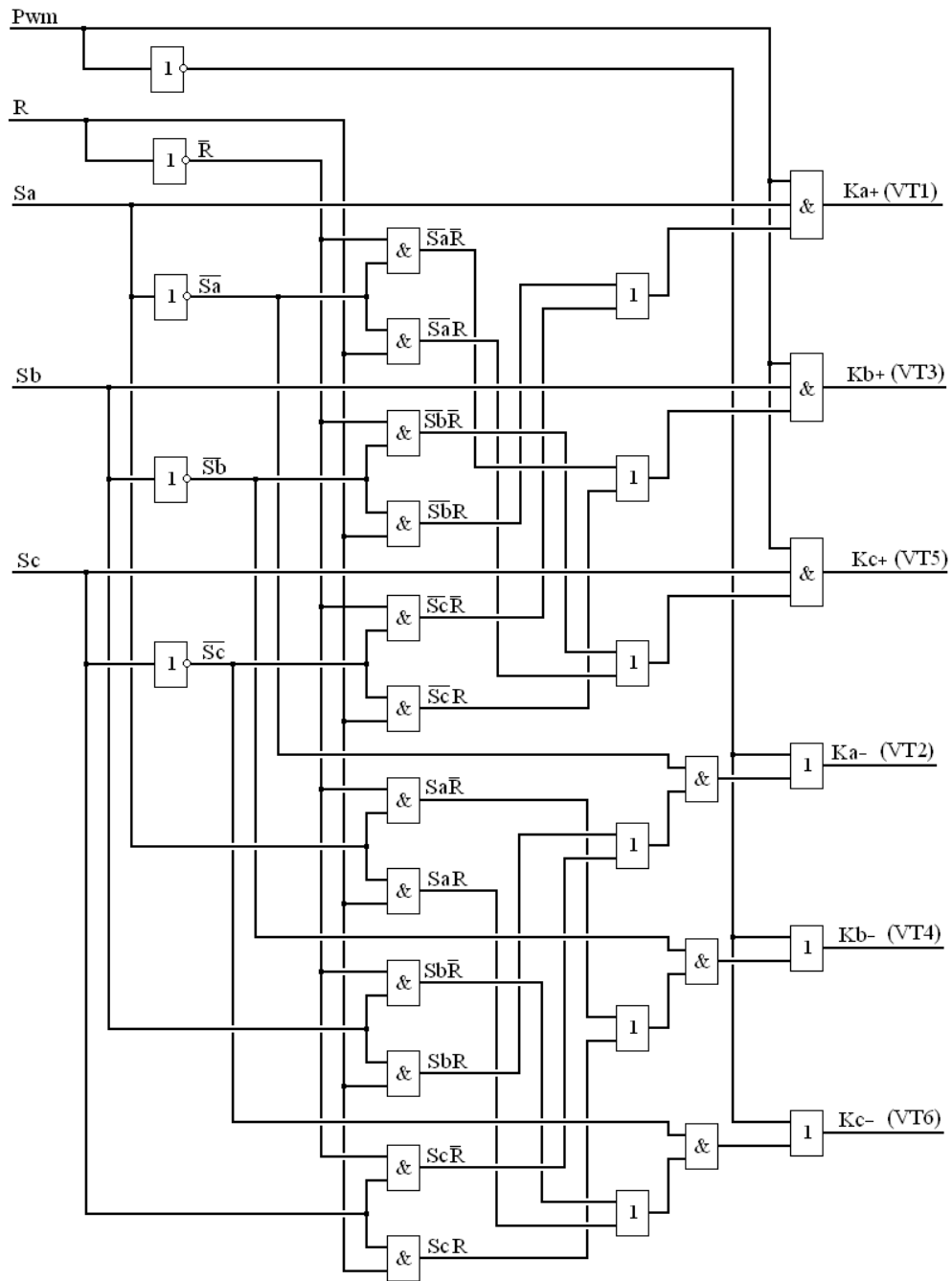


Рис. 4.10 Логическая схема управления инвертором БДПТ при наличии реверса и переменной частоте вращения с динамическим торможением.

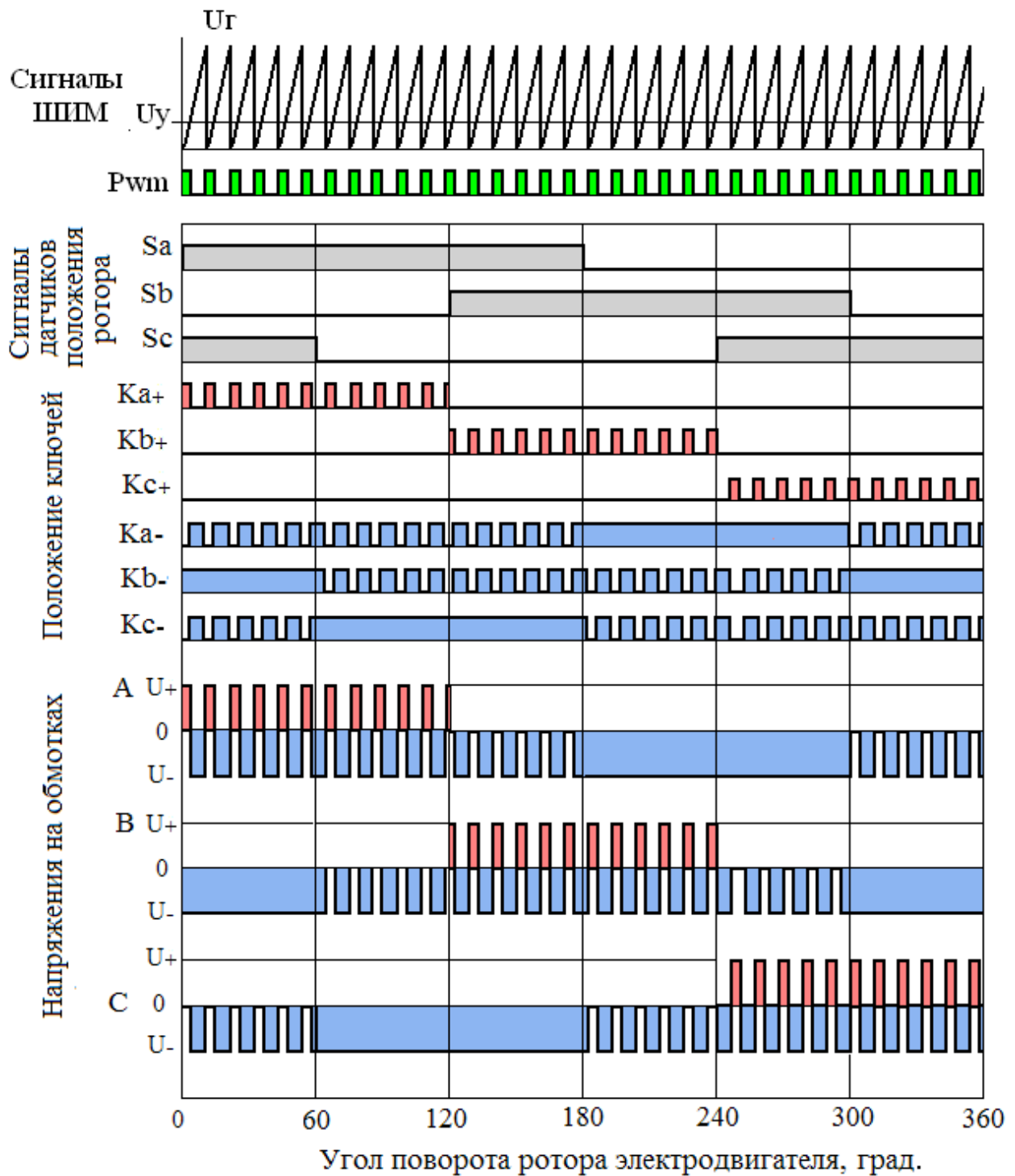


Рис. 4.11 Временная диаграмма работы трехфазного БДПТ при 120-ти градусной модуляции с динамическим торможением.

Элементы управления БДПТ объединены в контроллер, схема которого приведена на рис. 4.12.

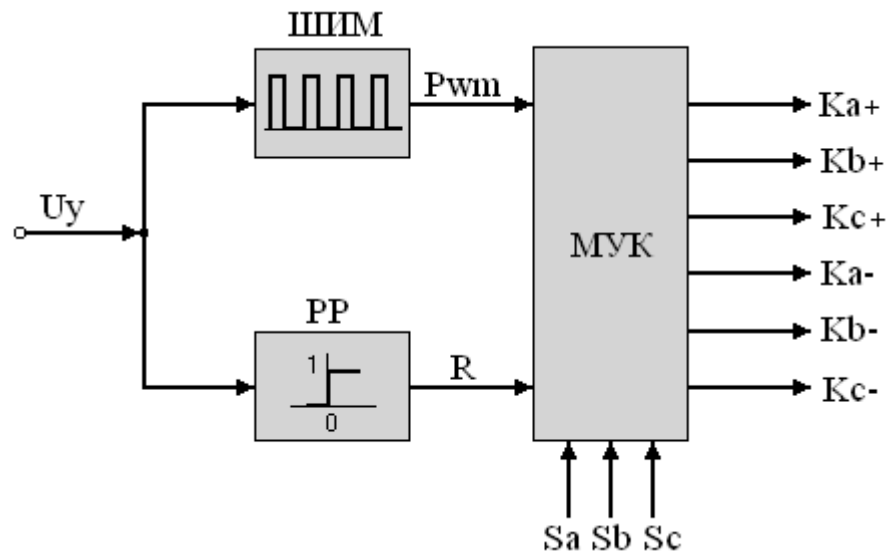


Рис. 4.12 Функциональная схема контроллера БДПТ.

Контроллер содержит рассмотренные ранее широтно-импульсный модулятор ШИМ и реле реверса РР, выходные сигналы которых управляют частотой вращения и направлением вращения ротора БДПТ.

Сигналы **Pwm** и **R**, а также сигналы датчиков положения ротора **Sa**, **Sb** и **Sc** поступают на модуль управления ключами инвертора МУК.

МУК формирует сигналы управления в соответствии с логическими выражениями и логическими схемами, примеры которых приведены выше.

5 ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ

Поскольку следящая система является системой регулирования положения ИМ, то качество ее работы определяется динамическими свойствами ИМ.

В соответствии с приведенными выше функциональными схемами САР электрический ИМ представляет последовательное соединение электродвигателя и механической передачи.

Динамические свойства электрического ИМ отражаются его структурной схемой, показанной на рис. 5.1.

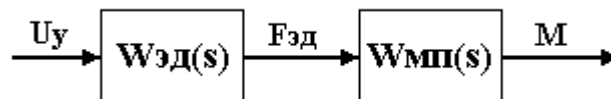


Рис. 5.1 Структурная схема электрического ИМ.

По динамическим свойствам электродвигатель считается типовым одно-емкостным устойчивым звеном, а механическая передача – интегрирующим звеном, так что их передаточные функции:

$$W_{эд}(s) = \frac{k_{эд}}{T_{эд}s + 1}, \quad W_{мп}(s) = \frac{1}{T_{им}s}.$$

Коэффициенты передаточных функций:

$K_{эд}$ – коэффициент передачи электродвигателя,

$T_{эд}$ – постоянная времени электродвигателя,

$T_{им}$ – время исполнительного механизма.

Значение $T_{эд}$ определяется суммарным моментом инерции ротора ЭД и всех механически соединенных с ротором элементов механической передачи и регулирующего органа.

Значение $T_{им}$ определяется максимальной скоростью ИМ и величиной полного хода ИМ.

Передаточная функция всего ИМ имеет вид:

$$W_{им}(s) = W_{эд}(s) W_{мп}(s) = \frac{k_{эд}}{(T_{эд}s + 1) T_{им}s}.$$

ИМ с такой передаточной функцией по классификации объектов регулирования является двухъёмкостным нейтральным ОР [8], [15].

Значения коэффициентов передаточной функции ИМ могут содержаться в документации на регулятор.

При отсутствии данных в документации коэффициенты можно определить по экспериментальным разгонным характеристикам ИМ.

Методику получения разгонных характеристик ИМ и определения значений коэффициентов его передаточной функции можно найти в [8].

Для получения разгонных характеристик необходимо скачком подать номинальный (100-процентный) сигнал усилителя на ЭД.

Пример разгонных характеристик ИМ приведен на рис. 5.2.

Если на разгонных характеристиках ИМ имеет полное перемещение (от 0 до 100%), то коэффициенты $T_{эд}$ и $T_{им}$ определяются так, как это показано построениями на рис. 5.2.

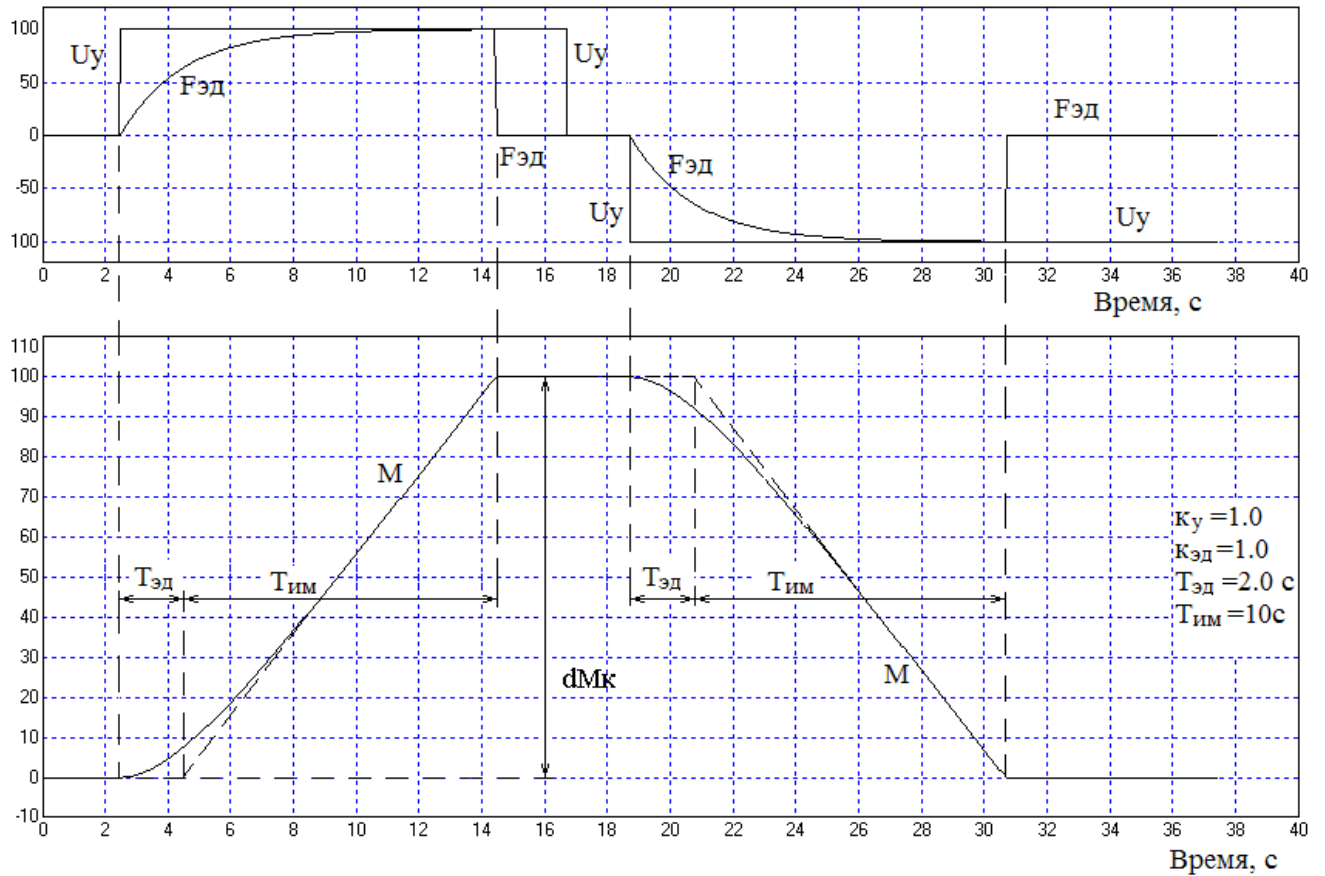


Рис. 5.2 Разгонные характеристики электрического исполнительного механизма.

Поведение ИМ в следящей системе определяется значением отношения $T_{эд}/T_{им}$.

Графики разгонных характеристик для различных $T_{эд}/T_{им}$ приведены на рис. 5.3.

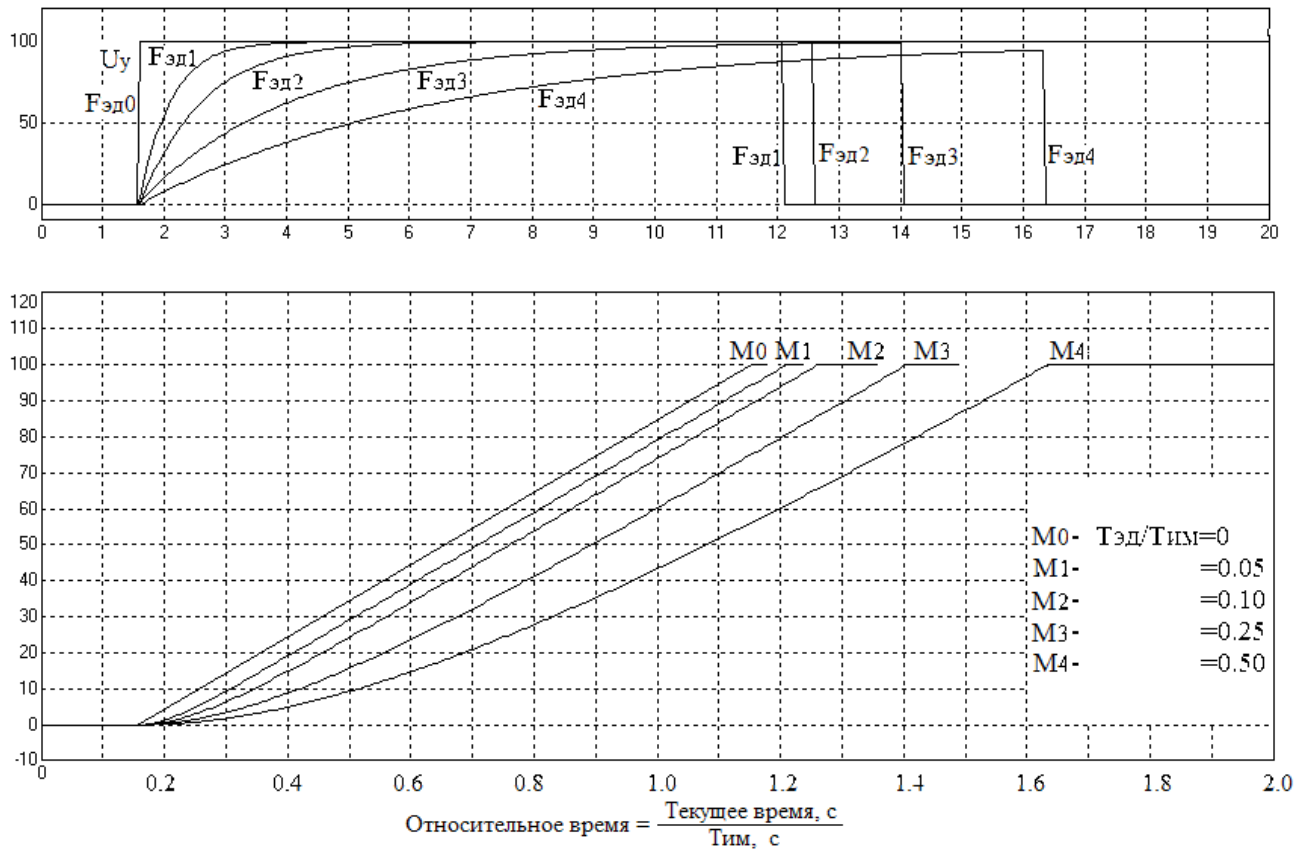


Рис. 5.3 Разгонные характеристики электрических ИМ при различном отношении $T_{эд}/T_{им}$.

Если значение $T_{эд}$ пренебрежимо мало по сравнению со значением $T_{им}$, так что можно считать $T_{эд} \approx 0$, то ИМ становится одноемкостным нейтральным ОР с разгонной характеристикой **M0** на рис. 5.3.

Тогда задача создания следящей системы с хорошими рабочими свойствами решается достаточно простыми средствами.

Увеличение инерционности электродвигателя (увеличение значения $T_{эд}/T_{им}$) вызывает трудности в обеспечении требуемого качества работы следящей системы.

Уменьшить проявления инерционности ЭД можно посредством контура регулирования частоты вращения ЭД по схеме, показанной на рис. 1.6.

В этом случае этот контур и механическую передачу можно рассматривать как условный ОР, динамические свойства которого отражаются структурной схемой, приведенной на рис. 5.4.

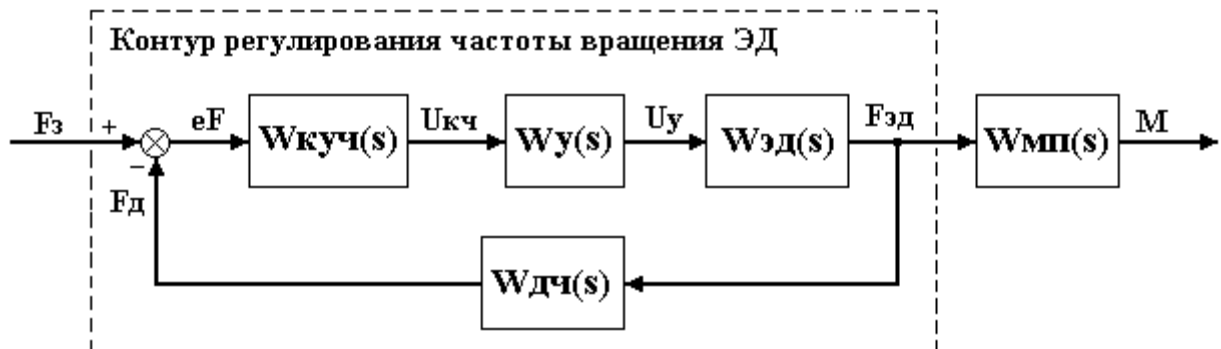


Рис. 5.4 Структурная схема ИМ как приведенного ОР с контуром регулирования частоты вращения ЭД.

Дополнительно к ранее введенным передаточным функциям на рис. 5.4 обозначены:

$W_y(s)$ – передаточная функция усилителя,

$W_{дч}(s)$ – передаточная функция датчика частоты вращения электродвигателя,

$W_{куч}(s)$ – передаточная функция последовательного корректирующего устройства контура регулирования частоты вращения ЭД.

Заменив в данной структурной схеме контур на эквивалентное звено, схему можно преобразовать к виду, показанному на рис. 5.5.

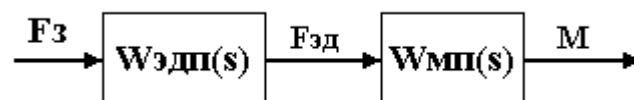


Рис. 5.5 Преобразованная структурная схема ИМ с контуром регулирования частоты вращения ЭД.

Передаточная функция эквивалентного звена (приведенного электродвигателя) определится выражением:

$$W_{\text{эдп}}(s) = \frac{W_{\text{куч}}(s) W_y(s) W_{\text{эд}}(s)}{1 + W_{\text{куч}}(s) W_y(s) W_{\text{эд}}(s) W_{\text{дч}}(s)} \quad (5.1)$$

При автоматизации судовых ОР в контуре регулирования частоты вращения ЭД вполне можно использовать пропорциональный закон регулирования, когда

$$W_{\text{куч}}(s) = k_{\text{pf}},$$

где k_{pf} – коэффициент пропорциональности.

Кроме того, можно считать, что

$$W_{\text{дч}}(s) = 1 \quad \text{и} \quad W_y(s) = k_y,$$

где k_y – коэффициент усиления усилителя.

После подстановки в выражение (5.1) конкретных передаточных функций оно примет вид:

$$W_{\text{эдп}}(s) = \frac{k_{\text{pf}} k_y \frac{k_{\text{эд}}}{(T_{\text{эд}} s + 1)}}{1 + k_{\text{pf}} k_y \frac{k_{\text{эд}}}{(T_{\text{эд}} s + 1)}} \cdot 1$$

или после упрощения

$$W_{\text{им}}(s) = W_{\text{эдп}}(s) W_{\text{мп}}(s) = \frac{1}{(T_{\text{эдп}} s + 1) T_{\text{им}} s}.$$

где $T_{\text{эдп}} = \frac{T_{\text{эд}}}{k_{\text{pf}} k_y k_{\text{эд}}}$ – приведенная постоянная времени ЭД.

Как правило, произведение $k_{\text{pf}} k_y k_{\text{эд}}$ значительно превосходит 1 и

$$T_{\text{эдп}} < T_{\text{эд}}.$$

Следовательно, контур регулирования частоты вращения ЭД улучшает динамические свойства ИМ как объекта регулирования.

Настроечный параметр контура регулирования частоты вращения ЭД можно задавать довольно большим, например, $k_{pf} = 100$.

В этом случае $T_{эдп} \approx 0.01 T_{эд} \approx 0$, то есть приведенный ЭД становится практически безинерционным.

Полученный результат справедлив для линейной модели ИМ, тогда как в реальных регуляторах технические ограничения сигналов не позволят проявиться этому свойству при больших входных воздействиях.

Для иллюстрации влияния ограничения сигналов на динамические свойства ИМ на рис. 5.6 приведены разгонные характеристики ИМ, полученные с ограничением и без ограничения сигнала на выходе усилителя.

Из графиков следует, что:

- при неограниченном сигнале усилителя частота вращения ЭД $F_{эд}$ изменяется практически скачком вслед за скачкообразным изменением сигнала заданной частоты вращения ЭД F_z ;
- при ограниченном сигнале усилителя частота вращения ЭД $F_{эд}$ изменяется по экспоненте с постоянной времени $T_{эд}$, также как и без контура регулирования частоты вращения ЭД.

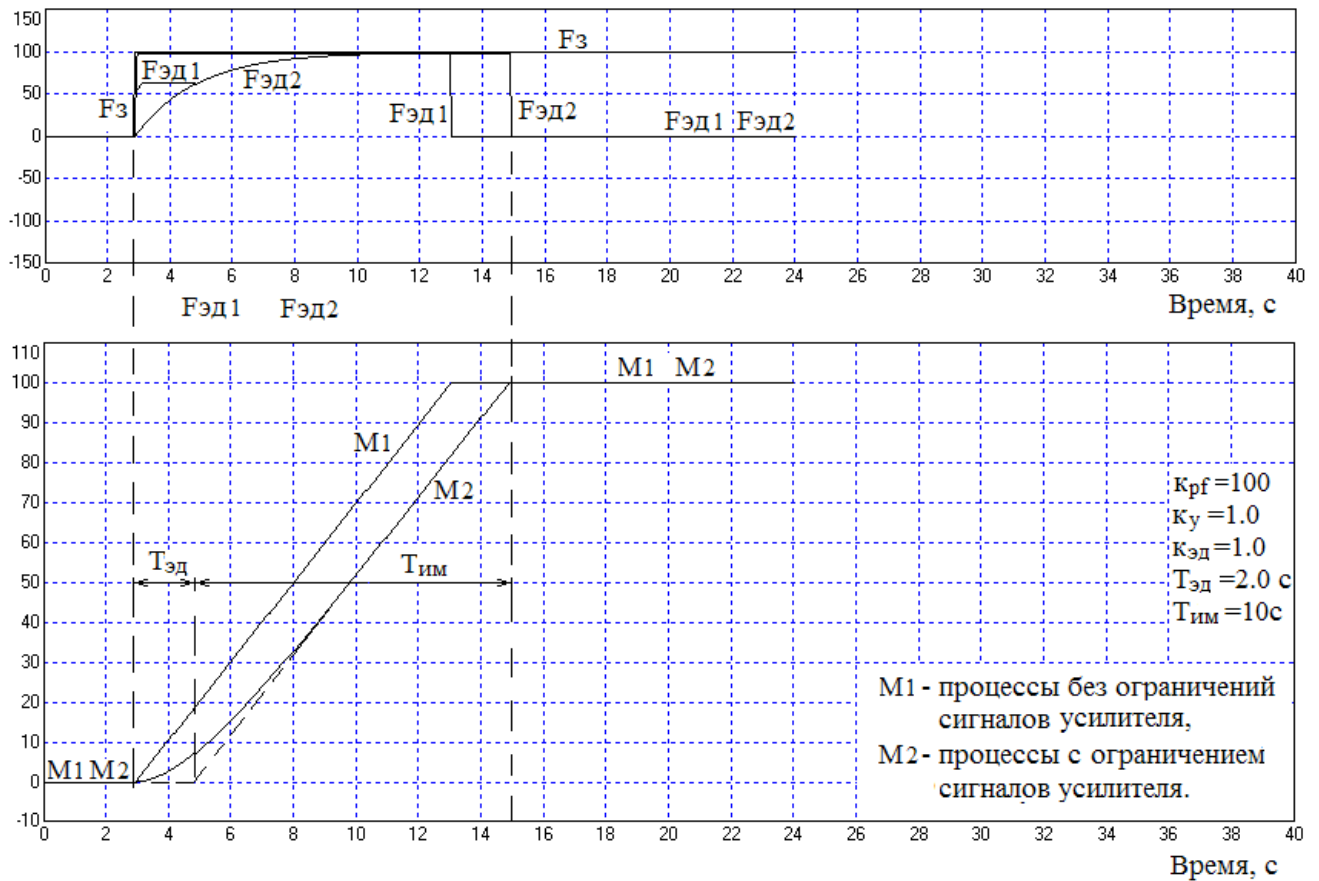


Рис. 5.6 Разгонные характеристики ИМ с контуром регулирования частоты вращения ЭД.

Тем не менее, при выходе САР в установившиеся состояния, когда сигнал на выходе усилителя сходит с ограничения, поведение следящей системы приближается к линейному и контур регулирования частоты вращения ЭД начнет оказывать положительное влияние.

Это будет показано далее при рассмотрении следящих систем с переменной скоростью перемещения ИМ.

6 СЛЕДЯЩИЕ СИСТЕМЫ С ПОСТОЯННОЙ СКОРОСТЬЮ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ИМ

Постоянная скорость перемещения ИМ обуславливается применением в следящей системе асинхронного электродвигателя переменного тока.

Функциональная схема следящей системы первого типа (рис. 1.2) применительно к системам с постоянной скоростью перемещения ИМ имеет вид, представленный на рис. 6.1.

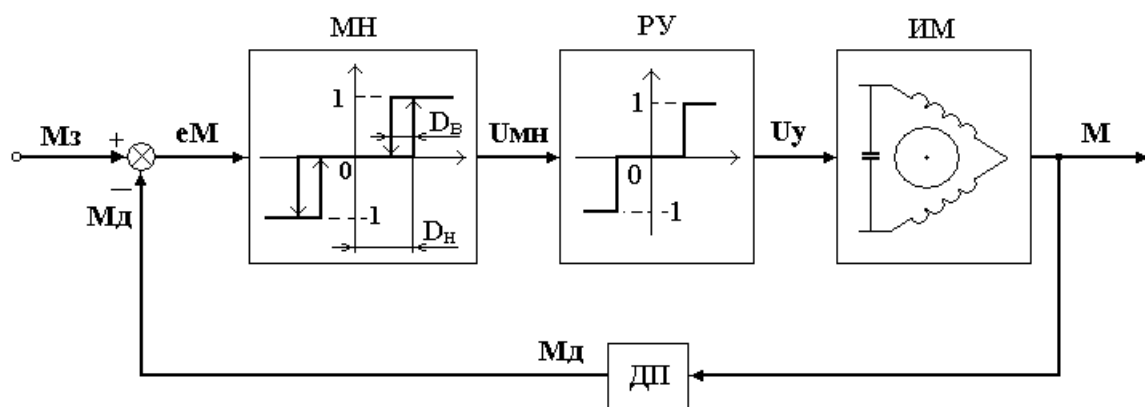


Рис. 6.1 Функциональная схема следящей системы первого типа
с постоянной скоростью перемещения ИМ.

На схеме обозначено:

МН - модуль нечувствительности,

РУ - релейный усилитель.

В рассматриваемой следящей системе:

- усилитель выполняется на тиристорах или транзисторах,
- модуль нечувствительности выполняется на элементах электронной аналоговой или микропроцессорной техники.

Регуляторы с данной следящей системой являются простыми по устройству, они достаточно надежны и имеют меньшую стоимость по сравнению с регуляторами с переменной скоростью ИМ.

Однако:

- наличие зоны нечувствительности создает погрешность следящей системы и, вследствие этого, погрешность поддержания регулируемой величины;
- в контуре следящей системы возможно появление незатухающих колебаний положения ИМ, что может привести к поломке ИМ и РО.

Тем не менее, эти регуляторы широко используются в автоматике судового энергетического оборудования.

Вид переходных процессов в следящей системе с постоянной скоростью ИМ, которые приведены на рис. 6.2, зависит от значений $T_{эд}/T_{им}$, D_H , D_B и может быть:

- монотонным (M_1 , M_2),
- апериодическим (M_3),
- колебательным (M_4).

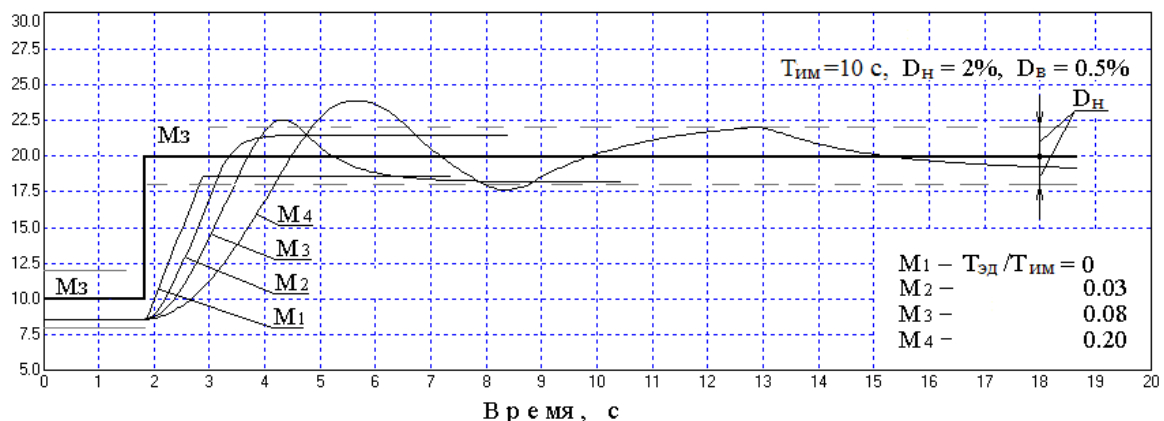


Рис. 6.2 Виды переходных процессов в следящей системе с постоянной скоростью ИМ.

Кроме того, в таких следящих системах возможны незатухающие колебания с постоянной амплитудой (автоколебания), пример которых показан на рис. 6.3.

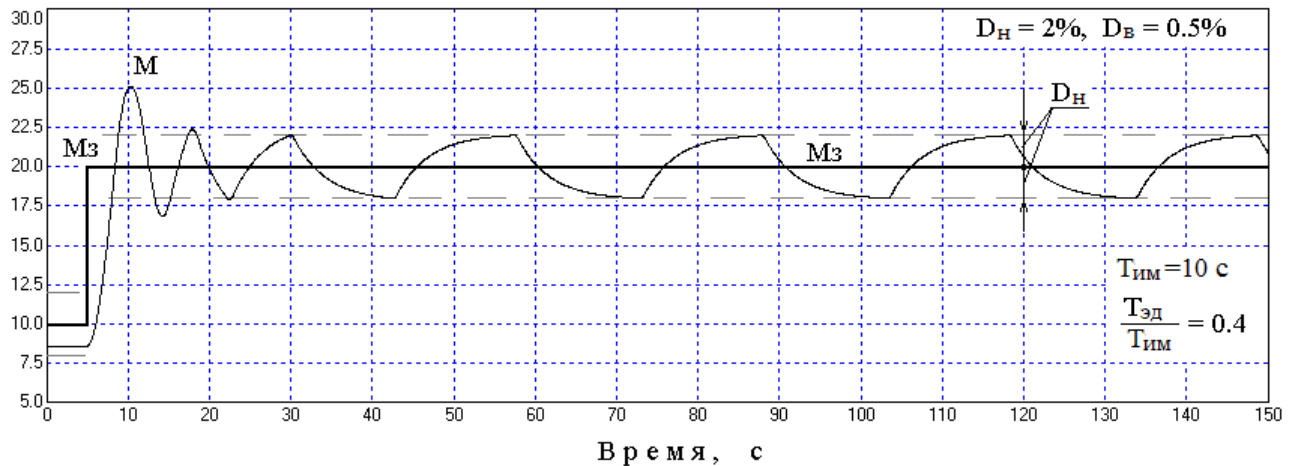


Рис. 6.3 Автоколебания в следящей системе с постоянной скоростью ИМ.

Автоколебания в следящих системах недопустимы, так как при этом:

- ухудшается качество работы всей системы регулирования,
- динамические механические нагрузки, вызываемые периодическими подачей и отключением электропитания ЭД, могут привести к поломке механической передачи.

Настройка данных следящих систем заключается в определении значений зон D_H и D_B , обеспечивающих:

- требуемую точность установки ИМ в заданное положение,
- максимальное быстродействие,
- минимальное перерегулирование 2-3% или отсутствие перерегулирования.

Задача определения минимальной зоны нечувствительности была решена с использованием компьютерного тренажера системы автоматического регулиро-

вания со следящей системой [9] для скачкообразного изменения сигнала данного положения ИМ Мз.

Результаты представлены линией 1 на рис. 6.4, которая показывает зависимость минимальной допустимой D_H , обеспечивающей отсутствие автоколебаний, от отношения $T_{эд}/T_{им}$.

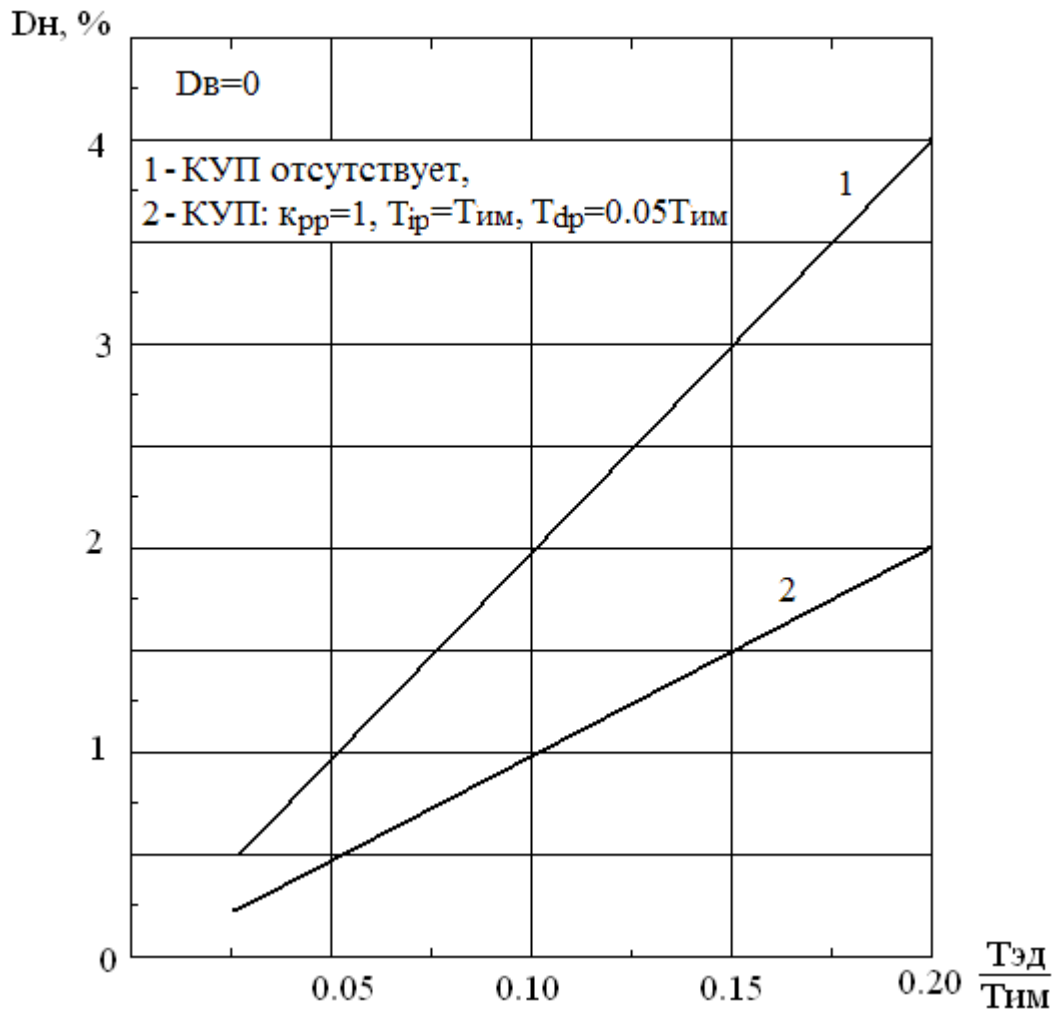


Рис. 6.4 Минимальная зона нечувствительности для регуляторов с постоянной скоростью ИМ.

В этом случае следящая система будет удовлетворять приведенным требованиям, что иллюстрируется графиками переходных процессов на рис. 6.5.

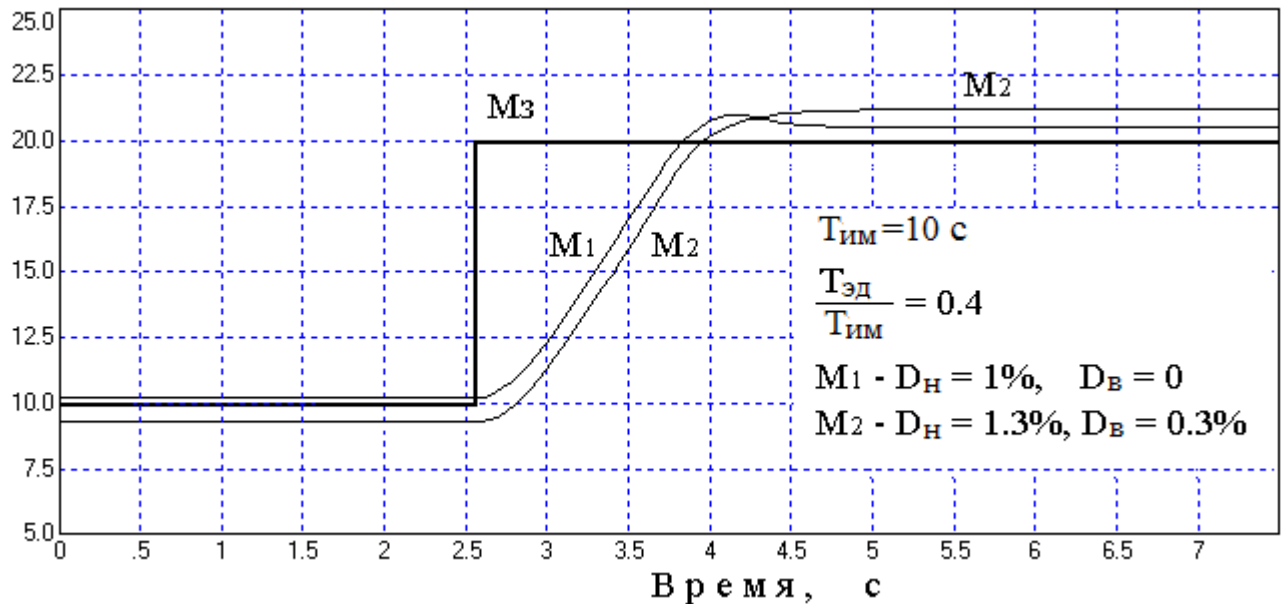


Рис. 6.5 Пример переходных процессов в следящей системе с постоянной скоростью ИМ при минимально допустимой D_H .

Линия M1 на рис. 6.5 соответствует модулю нечувствительности с зоной возврата $D_B=0$. Если $D_B \neq 0$, то минимальная зона нечувствительности должна быть увеличена на значение D_B (см. линию M2 на рис.6.5).

В судовых условиях, когда может оказаться недоступным экспериментальное определение коэффициентов передаточной функции ИМ, можно настроить зоны D_H и D_B по следующей методике:

- установить $D_H=0$ и $D_B=0$;
- в следящей системе должны возникнуть автоколебания;
- постепенно увеличивать D_H до исчезновения автоколебаний;
- если необходима зона возврата, то можно задать $D_B=(0.2 \div 0.5)D_H$;

- увеличить зону нечувствительности на значение зоны D_B ;
- если откорректированное значение D_H меньше погрешности следящей системы, указанной в технической документации, целесообразно увеличить D_H .

При работе следящей системы в составе САР на большей части переходных процессов сигнал задания изменяется с ограниченной скоростью.

Примеры работы следящей системы при линейном изменении сигнала задания приведены на рис. 6.6.

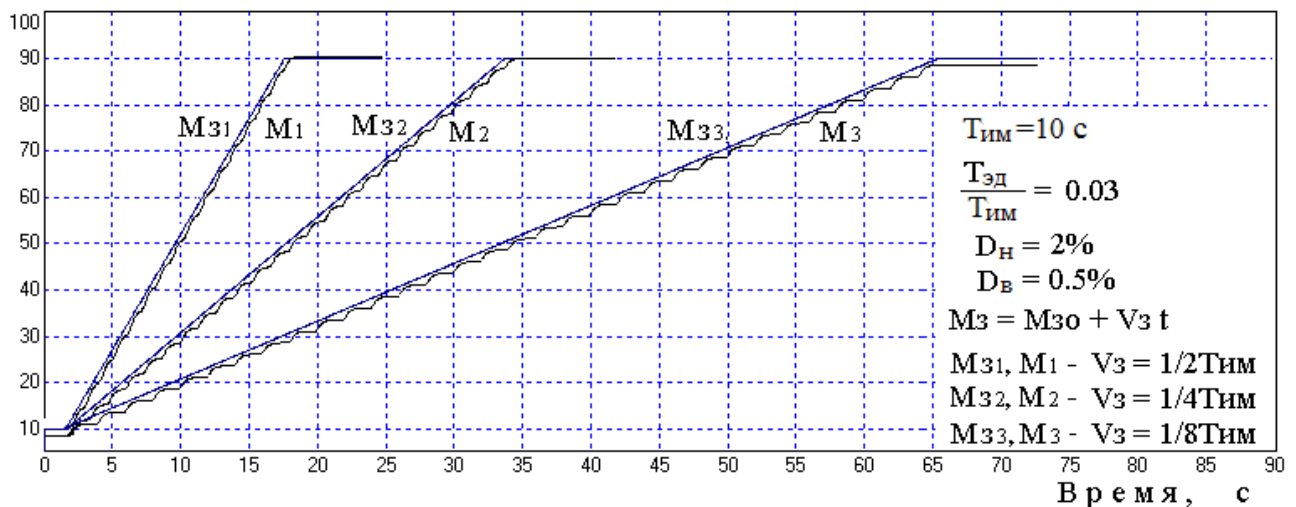


Рис. 6.6 Примеры работы следящей системы при линейном изменении сигнала задания.

Из графиков следует, что перемещение ИМ M с точностью до зоны нечувствительности следует за изменением сигнала заданного положения ИМ M_3 .

Повысить точность следящей системы с постоянной скоростью перемещения ИМ, то есть уменьшить зону нечувствительности, можно использованием следящей системы второго типа (рис. 1.5), которая содержит корректирующее устройство положения КУП по схеме, приведенной на рис. 6.7.

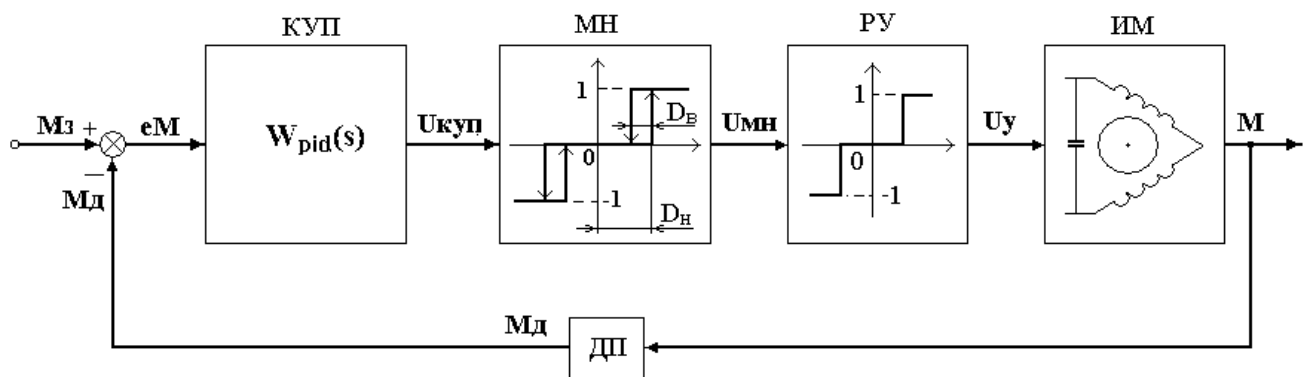


Рис. 6.7 Функциональная схема следящей системы с постоянной скоростью ИМ и КУП.

В КУП может быть использован типовой ПИД закон регулирования, например, с одной из следующих передаточных функций:

$$W_{pid1} = K_{pp1} \left(1 + \frac{1}{T_{ip1}s} \right) (1 + T_{dp1}s),$$

$$W_{pid2} = K_{pp2} \left(1 + \frac{1}{T_{ip2}s} + T_{dp2}s \right),$$

$$W_{pid3} = K_{pp3} + \frac{1}{T_{ip3}s} + T_{dp3}s.$$

Подбор настроечных параметров КУП выполнялся на компьютерном тренажере системы автоматического регулирования со следящей системы [9] при передаточной функции КУП **Wpid1** для скачкообразного изменения сигнала заданного положения ИМ **Mз**.

В результате были получены следующие значения параметров, при которых допустимая минимальная зона нечувствительности уменьшилась в 2 раза (по сравнению с отсутствием КУП), а быстродействие следящей системы осталось таким же:

- коэффициент пропорциональности **k_{pp} = 1.0**,

- время интегрирования $T_{ip} = T_{им},$
- время дифференцирования $T_{dp} = 0.05T_{им}.$

При $k_{pp} = 1.0$ и $T_{dp} = 0.05T_{ip}$ эти значения параметров могут быть приняты и для двух других модификаций ПИД закона.

Дополнительно оказалось необходимым ограничить интегральную составляющую закона регулирования $|U_i| < 2\%.$

При таком ограничении значения U_i эффект интегральной составляющей становится несущественным. Поэтому интегрирование может быть отключено и КУП будет работать по ПД закону с таким же результатом.

Зависимость минимальной зоны нечувствительности от отношения $T_{эд}/T_{им}$ для рассматриваемого случая представлена линией 2 на рис. 6.4.

Качество работы следящей системы при данной настройке показано на рис. 6.8 (переходные процессы с индексом «2»).

При отсутствии КУП и такой же зоне нечувствительности перемещение ИМ М (линия с индексом «1» на рис. 6.8) имеет перерегулирование около 5%.

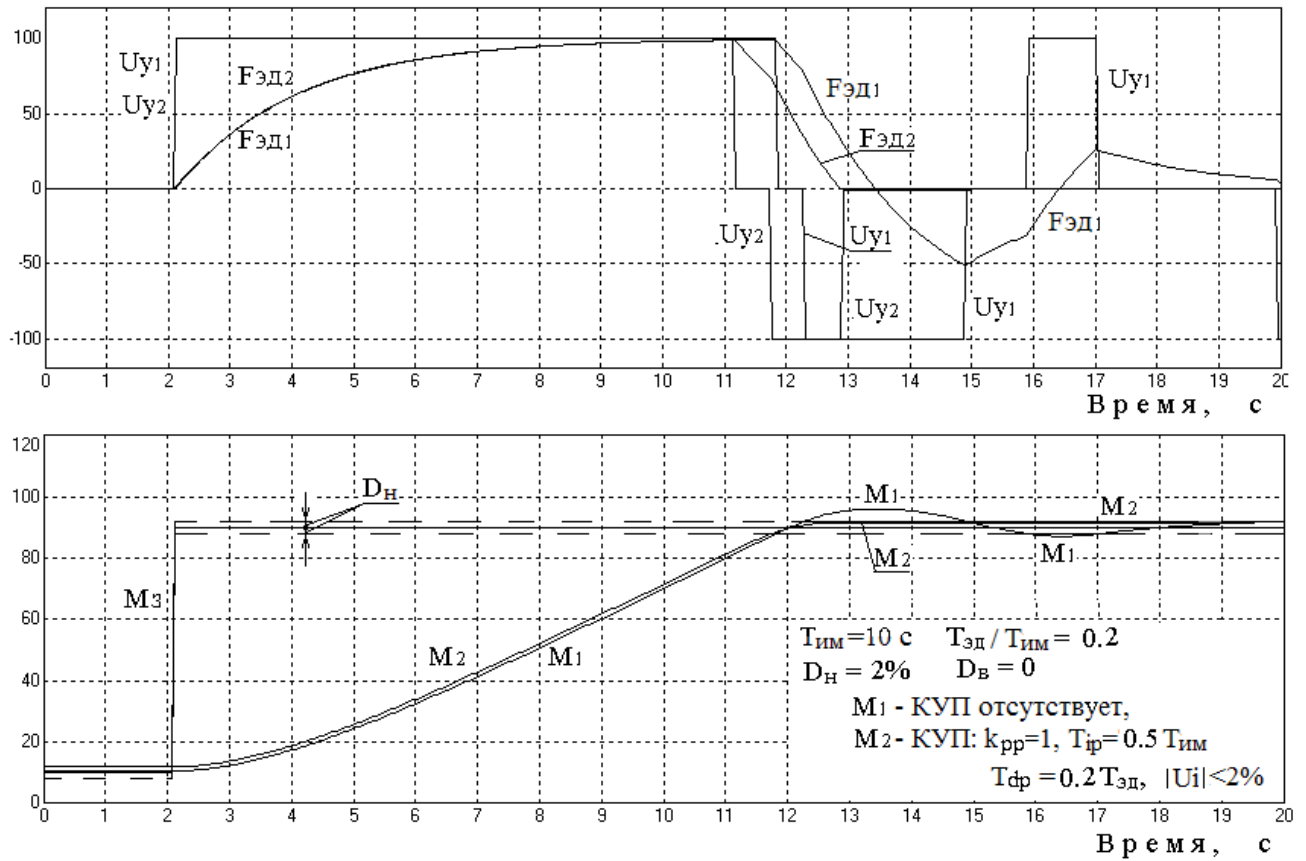


Рис. 6.8 Влияние корректирующего устройства позиционирования на работу следящей системы с постоянной скоростью ИМ.

Если интегральную составляющую не ограничивать, то качество работы следящей системы ухудшится. По графикам на рис. 6.9 видно, что в этом случае исполнительный механизм выходит на верхний упор ($M=100\%$) и остается в этом положении длительное время.

Переходные процессы в следящей системе с постоянной скоростью ИМ для линейного изменения сигнала задания M_3 приведены на рис. 6.10.

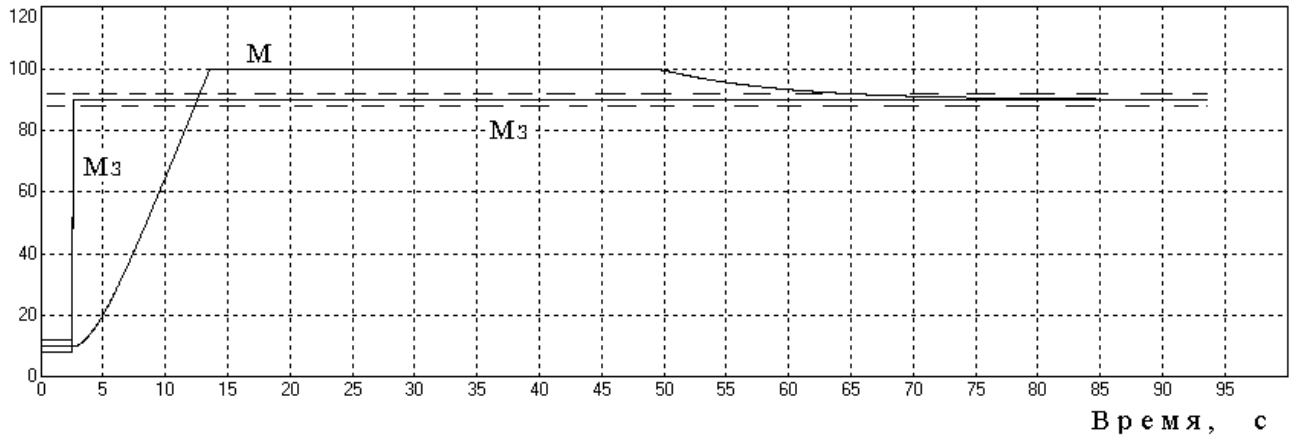


Рис. 6.9 Переходные процессы в следящей системе с постоянной скоростью ИМ без ограничения интегральной составляющей.

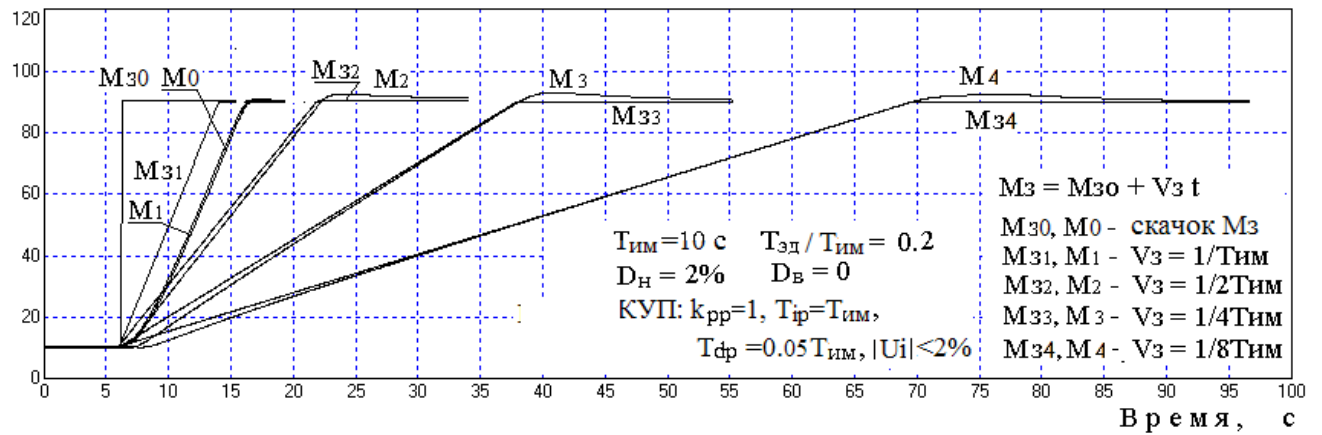


Рис. 6.10 Переходные процессы в следящей системе с постоянной скоростью ИМ при линейном изменении задания.

По графикам на рис. 6.10 видно как с уменьшением скорости перемещения ИМ повышается точность следящей системы.

7 СЛЕДЯЩИЕ СИСТЕМЫ С ПЕРЕМЕННОЙ СКОРОСТЬЮ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ИМ

Основной причиной применения в судовой автоматике регуляторов с переменной скоростью ИМ является инерционность ИМ и регулирующего органа, которая в следящих системах с постоянной скоростью ИМ не позволяет уменьшить зону нечувствительности настолько, чтобы обеспечить требуемую точность поддержания регулируемой величины и отсутствие автоколебаний в контуре регулятора.

Эта проблема имеет особо важное значение для регуляторов частоты вращения судовых дизелей, которые должны перемещать топливные рейки дизелей со скоростью на один-два порядка большей скоростей перемещения регулируемых органов остальных агрегатов и механизмов судовой энергетической установки, обеспечивая при этом повышенную точность установки топливных реек в заданное положение.

Процесс развития средств автоматизации и, в частности, следящих систем с переменной скоростью ИМ привел к следующим общепринятым принципам построения данных следящих систем:

- использование БДПТ,
- использование энкодеров и резольверов в качестве датчиков положения ротора БДПТ и ИМ,
- каскадное построение систем с контурами регулирования частоты вращения электродвигателя и силы тока.

Как было показано выше, контур регулирования частоты вращения (КРЧВЭД) уменьшает влияние инерционности движущихся частей следящей системы на качество ее работы.

Контур регулирования силы тока в электродвигателе предназначен для предотвращения перегрузки по току электродвигателя и инвертора.



- первый каскад – контур регулирования силы тока,
- второй каскад – контур регулирования частоты вращения ЭД,
- третий каскад – следящая система целиком.

Датчиком положения ИМ служит трехканальный энкодер Епс, последовательности импульсных сигналов которого **A, B, 0** в преобразователе энкодер-код ПЭК преобразуется в цифровой сигнал действительного положения ИМ **Мд**.

Выходной сигнал КУП **ФЗк** является сигналом заданной частоты вращения ЭД. Окончательное значение заданной частоты вращения ЭД **ФЗ** получается по-

сле фильтра задания ФЗЧВ, ограничивающим влияние квантованности сигнала ПЭК и высокочастотных помех на сигнал задания частоты вращения ЭД.

Датчиком положения ротора ЭД служит резольвер Rsv, выходные сигналы которого **U1** и **U2** в преобразователе резольвер-код ПРК преобразуются в сигналы:

- угла поворота ротора электродвигателя γ ,
- частоты вращения электродвигателя **Fд**.

Фильтр измеренной частоты вращения ФИЧВ уменьшает влияние неравномерности вращения ЭД и высокочастотных помех на сигнал **Fд**.

По выходному сигналу ФИЧВ **Fдф** вычисляется отклонение частоты вращения ЭД от заданной **eF=Fз-Fдф**.

Сигнал отклонения поступает на корректирующее устройство частоты вращения КУЧВ. КУЧВ, работающее обычно по ПИД закону регулирования, формирует составляющую заданной силы тока **Iзк**.

Модуль упреждения по сигналу **Fз** формирует вторую составляющую заданной силы тока **Iзу**.

Суммарный сигнал заданной силы тока для первого контура получается как **Iзс=Iзк+Iзу**.

Величина **Iзс** ограничивается в ограничителе задания тока ОЗТ до значения **Iз**. Таким образом, ограничение задания для контура регулирования силы тока ограничивает фактическую силу тока при работе следящей системы и предотвращает отказы инвертора и электродвигателя от перегрузок по току.

Сила тока измеряется датчиком тока ДТ, выходной сигнал которого **Iд** соответствует фактической силе тока в электродвигателе **Iэд**.

Отклонение силы тока от заданного значения **eI=Iз-Iд** поступает на корректирующее устройство тока КУТ, формирующее обычно по ПИ закону управляющий сигнал **Uу**.

Сигнал **Uу** вместе с сигналом угла поворота ротора ЭД поступают на контроллер. Контроллер по этим сигналам формирует модулированные сигналы **Um** управления силовыми ключами инвертора.

Инвертор подает соответственно питание на обмотки статора электродвигателя (в данном случае БДПТ), через которые протекает ток $I_{эд}$.

Это приводит к вращению электродвигателя с частотой вращения $F_{эд}$.

Модуль упреждения предназначен для ускорения перемещения ИМ сразу при изменении сигнала заданной частоты вращения ЭД F_z . С этой целью МУ может содержать форсирующее звено с передаточной функцией

$$W_{му}(s) = k_{py} (T_{dy} s + 1) ,$$

где k_{py} – коэффициент пропорциональности канала упреждения,

T_{dy} – время дифференцирования канала упреждения.

Также сигнал $I_{зу}$ на выходе МУ уменьшает интегральную составляющую в сигнале $I_{зк}$, что улучшает работу следящей системы.

Далее было получено, что достаточно хорошее качество работы следящих систем может быть получено и при отсутствии канала упреждения.

Ограничение силы тока включает:

- ограничение по тепловому состоянию ЭД,
- ограничение, задаваемое вручную.

Первое ограничение силы тока производится по математической модели теплового состояния ЭД, включенной в состав ОЗТ.

Выбор конкретных законов регулирования для корректирующих устройств следящей системы и их настроечных параметров выполняется известными методами наладки каскадных САР [15].

Качество работы контура регулирования тока обеспечивается предприятиями-изготовителями электрических сервоприводов, которые поставляют заказчикам полностью собранные и настроенные модули коммутатора и БДПТ..

Таким образом, разработчику судовых САР с переменной скоростью ИМ остается задача выбора закона регулирования для КУП и КУЧВ, а также настроечных параметров этих корректирующих устройств.

Судовые инженеры механики и электромеханики, в свою очередь, должны уметь выполнять настройку КУП и КУЧВ при эксплуатации ГД и его системы автоматизации.

Одним из основных требований к следящим системам является отсутствие статической ошибки, то есть при работе на постоянной нагрузке объекта регулирования должно выполняться условие: $M = M_z$.

Наличие электродвигателя в ИМ дает нулевую статическую ошибку следящей системы при любом типовом законе

Действительно, при неподвижном электродвигателе и ИМ (причем, когда $0 < M < 1$) сила тока $I_{эд} = 0$, что выполняется при $I_{зс} = 0$, $F_z = 0$, $eM = 0$.

Следовательно, условие $eM = 0$ (отсутствие статической ошибки и равенство $M = M_z$) выполняется независимо от закона регулирования в КУП.

Это можно показать аналитически по передаточной функции следящей системы.

Заменим контуры регулирования силы тока и частоты вращения ЭД одним эквивалентным звеном с передаточной функцией $W_{кчв}(s)$, и тогда структурная схема следящей системы может быть представлена к виду, показанному на рис. 7.2.

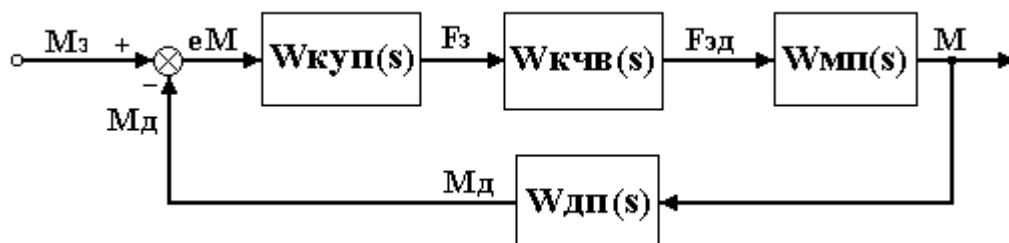


Рис. 7.2 Упрощенная структурная схема следящей системы с переменной скоростью ИМ.

В этом случае передаточная функция замкнутой следящей системы может быть записана следующим выражением:

$$M_{зсс}(s) = \frac{W_{куп}(s) W_{кчв}(s) W_{мп}(s)}{1 + W_{куп}(s) W_{кчв}(s) W_{мп}(s) W_{дп}(s)}$$

В соответствии со свойствами преобразования Лапласа статическое положение ИМ **M_{ст}** для скачкообразного изменения задания **M_з** на величину **M_{зо}** может быть найдено как:

$$M_{ст} = \lim_{t \rightarrow \infty} M(t) = \lim_{s \rightarrow 0} (s M_{зсс}(s) \frac{M_{зо}}{s})$$

или после подстановки выражения передаточной функции **W_{мп}(s)** из подраздела 2.2 и упрощающих преобразований

$$M_{ст} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{W_{куп}(s) W_{кчв}(s) M_{зо}}{T_{им} s + W_{куп}(s) W_{кчв}(s)}$$

Отсюда можно получить при **s=0** **M_{ст} = M_{зо}**, что доказывает отсутствие статической ошибки.

Предельное быстродействие следящей системы может быть оценено по разгонной характеристике ИМ (см. рис. 5.2).

Время полного перемещения ИМ от 0 до 100% **T_{пим} = T_{эд} + T_{им}** является минимально возможным интервалом времени, за который следящая система может обеспечить полный ход ИМ.

Быстродействие следящей системы можно оценить по относительному времени полного хода ИМ в следящей системе:

$$T_{оцс} = (T_{эд} + (t_{сс} - T_{эд}) 100 / dM_k) / T_{пим},$$

где **t_{сс}** – интервал времени, за который ИМ достигает заданного положения (см. рис. 7.3),

dM_к – величина перемещения ИМ при скачкообразном изменении задания **M_з** (рис. 7.3).

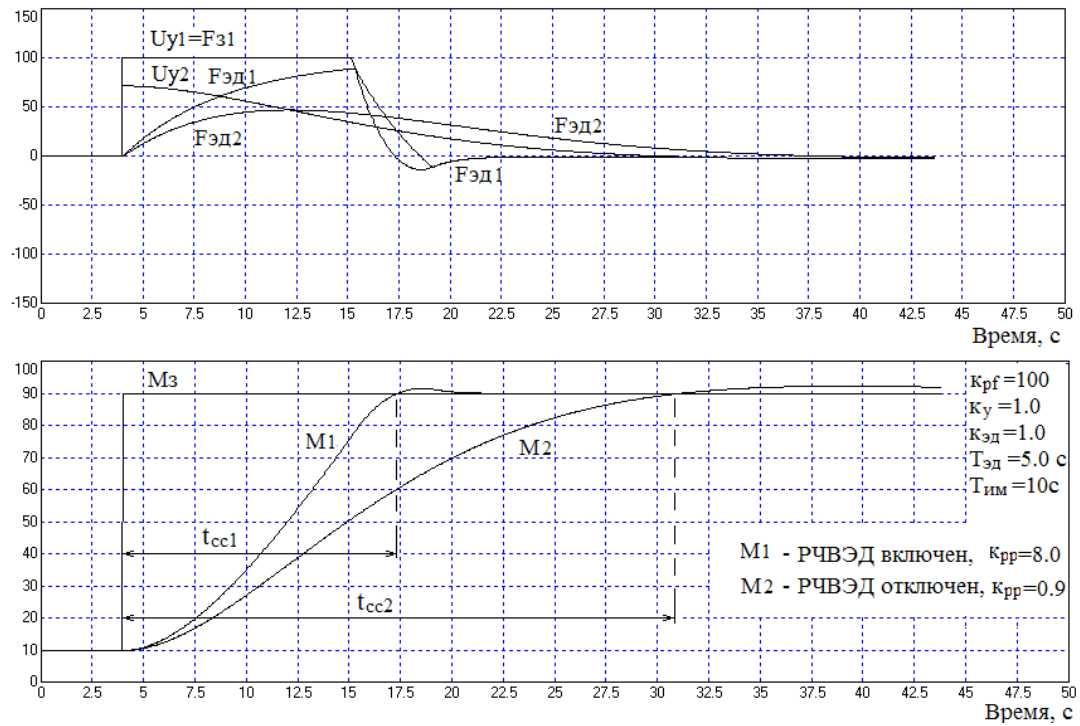


Рис. 7.3 Переходные процессы в следящей системе с переменной скоростью ИМ при $T_{эд}/T_{им}=0.5$.

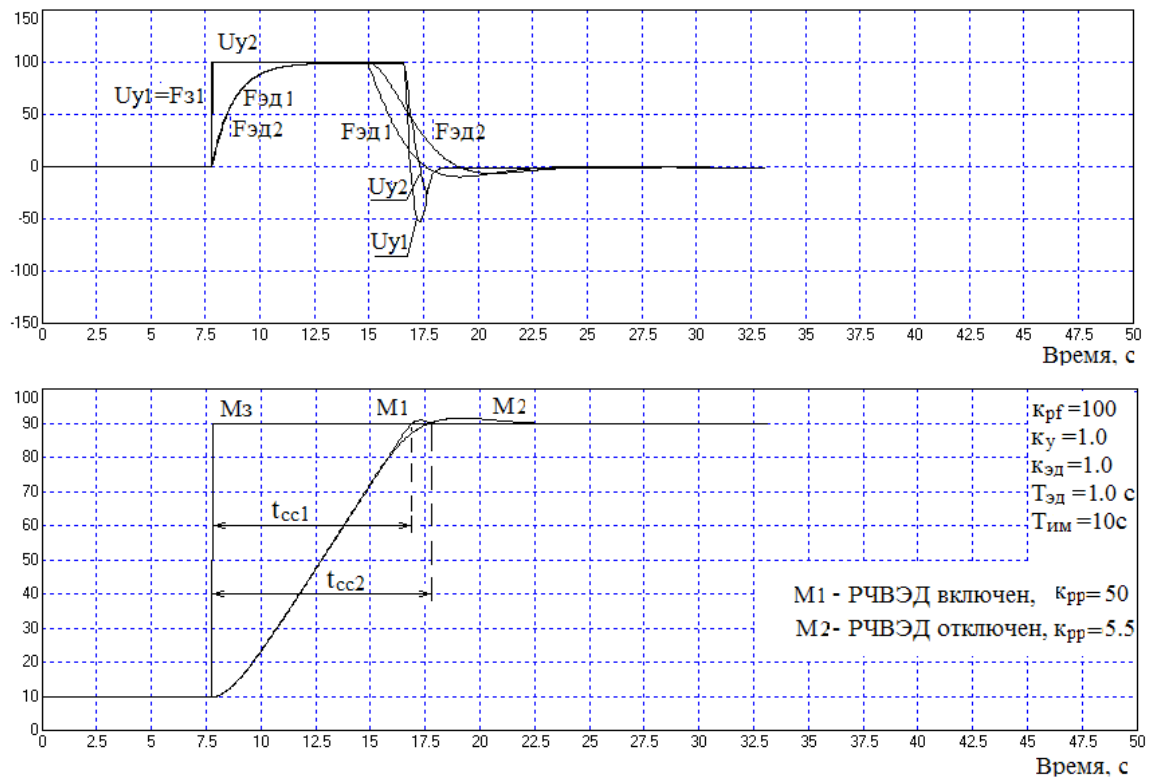


Рис. 7.4 Переходные процессы в следящей системе с переменной скоростью ИМ при $T_{эд}/T_{им}=0.1$.

Показатель $T_{\text{осс}} \geq 1$, и чем ближе значение к 1, тем больше быстродействие следящей системы.

Рассмотренное свойство следящей системы с электродвигателем позволяет применить в КУП наиболее простой пропорциональный закон регулирования.

Коэффициент пропорциональности k_{pp} для КУП был подобран на тренажере электрической САР с переменной скоростью ИМ [10] при скачкообразном изменении сигнала задания M_z .

При решении задачи использовалась расчетная структурная схема следящей системы, представленная на рис. 7.5.

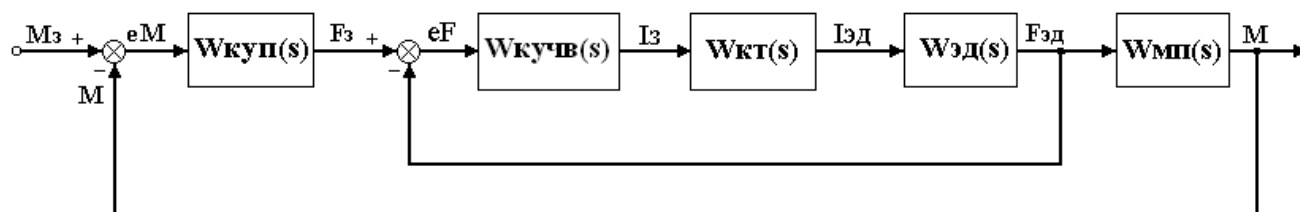


Рис. 7.5 Расчетная структурная схема с следящей системы с БДПТ.

Расчетная схема была получена из полной функциональной схемы (рис. 7.1) при следующих условиях:

- отсутствуют МУ и ОЗТ,
- эквивалентные передаточные функции цепей измерения частоты вращения ЭД и положения ИМ равны 1,
- контур регулирования силы тока заменен эквивалентным звеном с передаточной функцией $W_{кт}(s)$.

Постоянные времени контура регулирования тока много меньше постоянных времени остальных элементов следящей системы. Поэтому было принято, что при работе системы сила тока $I_{эд}$ всегда равна сигналу задания I_z , то есть передаточная функция $W_{кт}(s)=1$.

Примеры полученных переходных процессов в следящей системе заны на рис. 7.3, 7.4.

Определение коэффициента пропорциональности КУП было произведено для двух вариантов следящей системы:

- без контура регулирования частоты вращения электродвигателя ИМ,
- с данным контуром.

Во втором варианте в КУЧВ принимался П закон регулирования с коэффициентом пропорциональности k_{pf} /

Результаты представлены графическими зависимостями на рис. 7.6 и 7.7.

Из графиков следует, что в следящей системе с КРЧВЭД допустимы большие значения k_{pp} и, тем самым, можно получить меньшие значения T_{occ} , то есть большее быстродействие системы.

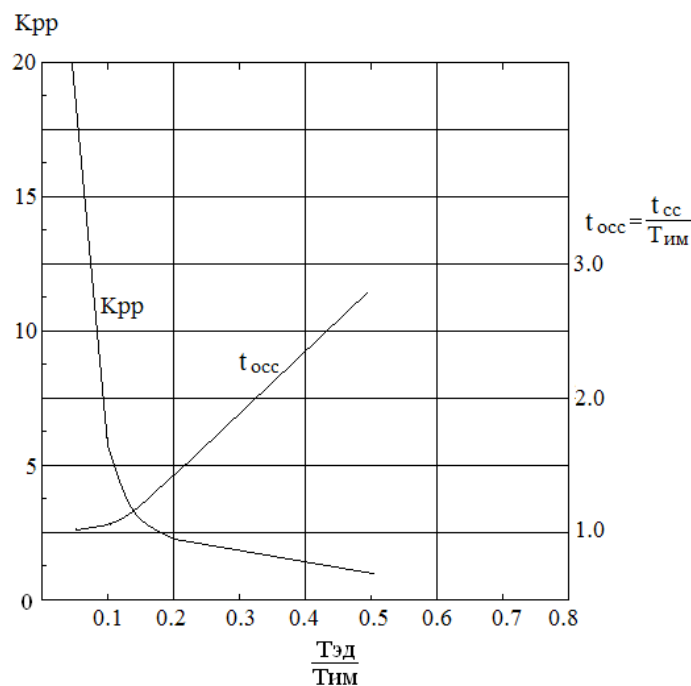


Рис. 7.6 Зависимость коэффициента пропорциональности КУП k_{pp} от отношения $T_{эд}/T_{им}$ для следящей системы без КРЧВЭД.

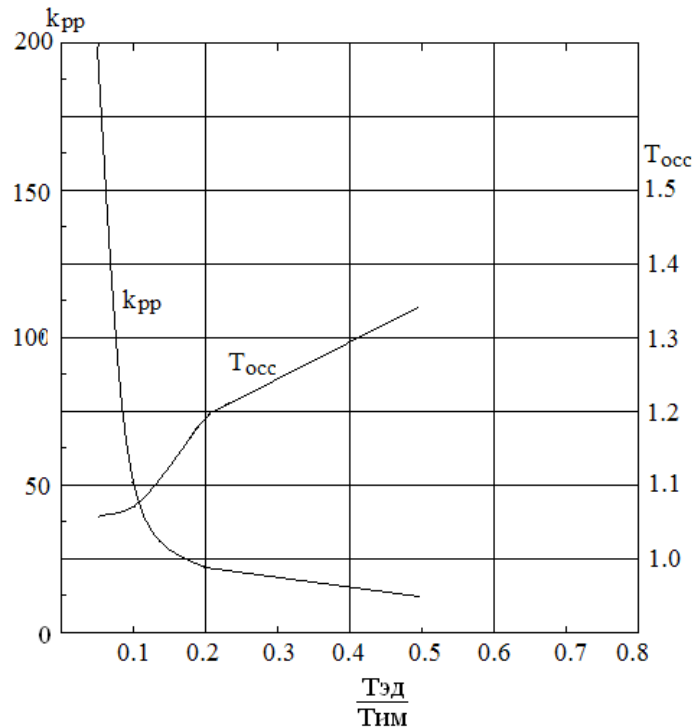


Рис. 7.7 Зависимость коэффициента пропорциональности КУП k_{pp} от отношения $T_{эд}/T_{им}$ для следящей системы с КРЧВЭД.

Поскольку КРЧВЭД усложняет следящую систему и повышает ее стоимость была сделана попытка улучшить качество работы следящей системы без КРЧВЭД за счет использования в КУП ПИД закона регулирования с передаточной функцией

$$W_{куп}(s) = k_{pp} \left(1 + \frac{1}{T_{ip}s}\right) (1 + T_{dp}s)$$

Передаточная функция разомкнутой следящей системы, соответствующая ее структурной схеме на рис. 7.5 имеет вид:

$$W_{рсс}(s) = W_{куп}(s)W_{кт}(s)W_{эд}(s)W_{мп}(s)$$

или, принимая $W_{кт}(s)=1$ и подставляя выражения остальных передаточных функций,

$$W_{куп}(s) = k_{pp} \left(1 + \frac{1}{T_{ip}s}\right) (1 + T_{dp}s) \frac{k_{эд}}{(T_{эд}s + 1) T_{им} s}.$$

Если время дифференцирования КУП T_{dp} задать равным постоянной времени ЭД $T_{эд}$, то передаточная функция разомкнутой следящей системы примет следующий вид:

$$W_{куп}(s) = k_{pp} \left(1 + \frac{1}{T_{ip}s} \right) \frac{k_{эд}}{T_{им} s}.$$

Из полученного выражения следует, что при такой настройке КУП теоретически будет компенсировано вредное влияние инерционности ЭД на работу следящей системы.

Однако, данный результат справедлив для линейных систем, тогда как реальные системы регулирования являются существенно нелинейными. В частности в следящих системах существенное влияние на их поведение оказывает ограничение выходного сигнала усилителя (ограничение напряжение электропитания).

По этой причине удовлетворительное качество работы рассматриваемого типа следящей системы было получено при следующих настройках параметров КУП:

$$k_{pp}=50,$$

$$T_{dp}=0.2T_{эд},$$

$$T_{ip}=0.5T_{им}.$$

Графики работы следящей системы с ПИД законом регулирования показаны на рис. 7.8.

При этом было получено допустимое перерегулирование по положению ИМ и практически максимально достижимое быстродействие системы.

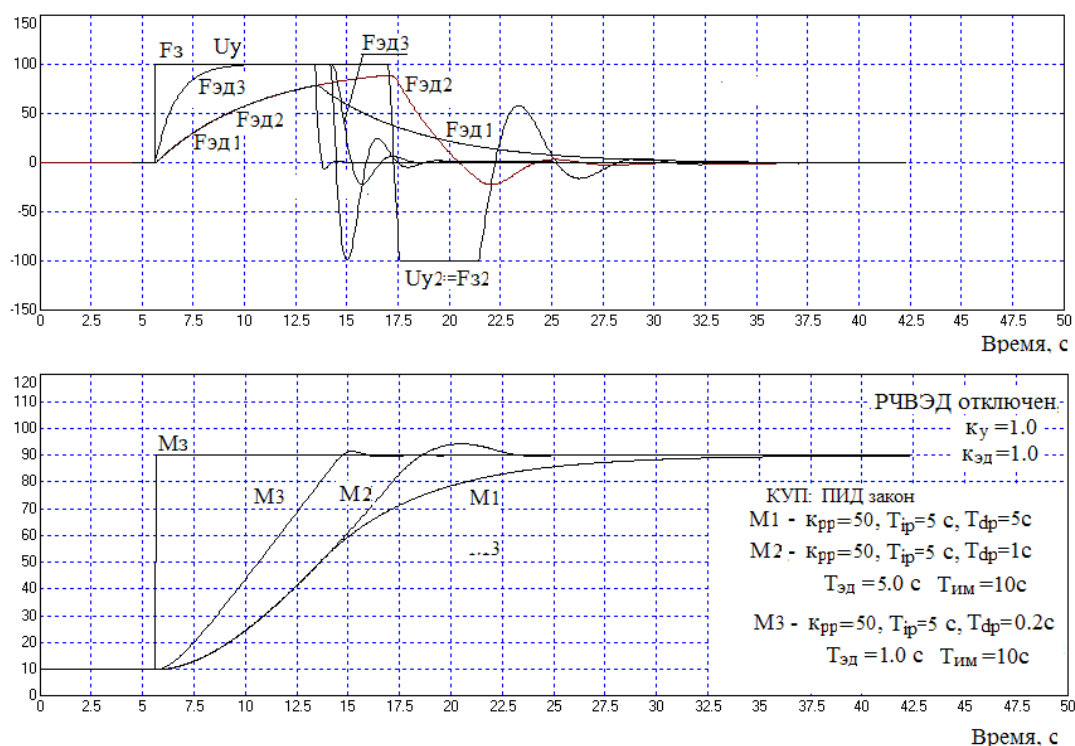


Рис. 7.8 Переходные процессы в следящей системе с переменной скоростью ИМ без РЧВЭД и ПИД законом регулирования.

Выбор закона регулирования и настроечных параметров КУП был произведен при скачкообразном изменении сигнала заданного положения ИМ M_3 .

В системах регулирования со следящими системами сигнал M_3 может изменяться произвольным образом.

Наиболее тяжелым режимом работы следящей системы можно считать режим работы САР частоты вращения главного дизеля при движении судна на волнении моря. В этом случае частота вращения ГД изменяется периодически, что вызывает аналогичное изменение сигнала M_3 (заданного положения топливной рейки дизеля).

На рис. 7.9 приведены переходные процессы в следящей системе САР частоты вращения ГД при синусоидальном изменении сигнала M_3 . Период волнения T_v был принят равным 5 с (минимальным из реальных параметров волнения).

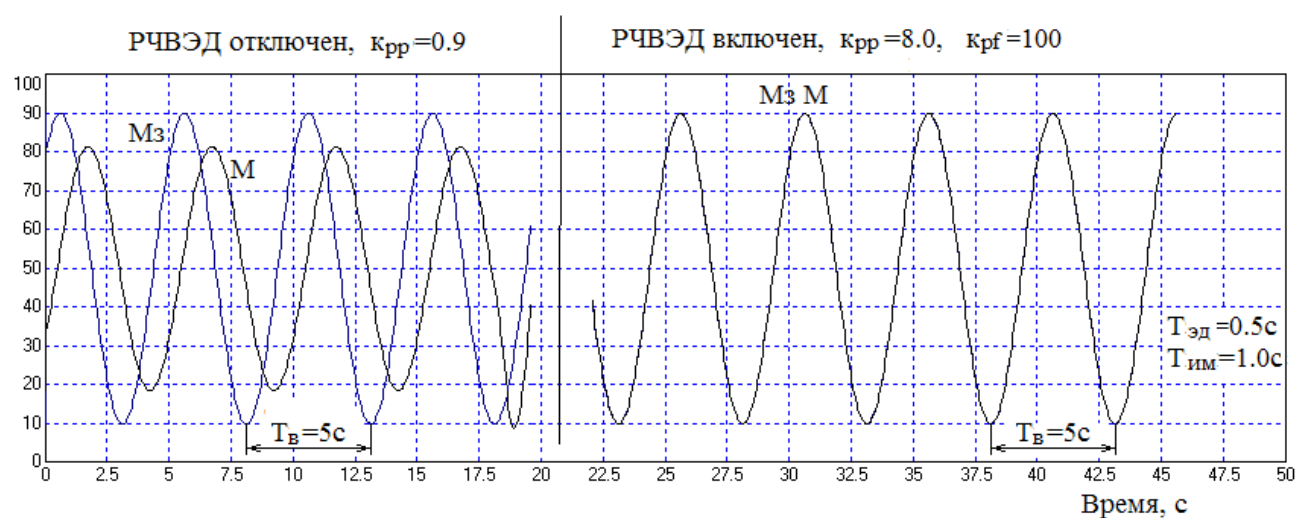


Рис. 7.9 Работа следящей системы САР частоты вращения главного судового дизеля на волнении моря.

Графики работы САР показывают, что на волнении моря следящая система с КРЧВЭД обеспечивает перемещение ИМ (и топливной рейки дизеля) в соответствии с сигналом задания **Мз** практически без ошибки.

8 ВЕКТОРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ БДПТ

В настоящее время во многих электроприводах с БДПТ применяется векторное управление электродвигателем [20], [22].

Векторное управление позволяет поддерживать на заданном значении не только частоту вращения электродвигателя, но и развиваемый им момент.

В настоящее время используются два метода векторного управления:

- косвенное управление моментом ЭД,
- непосредственное управление моментом ЭД.

В данном пособии рассматривается косвенное управление, наиболее часто используемое в следящих системах с БДПТ.

Косвенное управление использует преобразование векторов токов и напряжений в БДПТ по методу Парка-Горева [3].

Как известно, вращающий момент БДПТ определяется выражением:

$$M_{\text{в}} = r \ F = r (I L \beta \sin \gamma) ,$$

где r – радиус ротора,

F – сила Лоренца,

I – ток в обмотках статора,

L – длина обмоток,

β – магнитная индукция,

γ – угол между направлением тока и вектором магнитной индукции ротора (см. рис. 8.1).

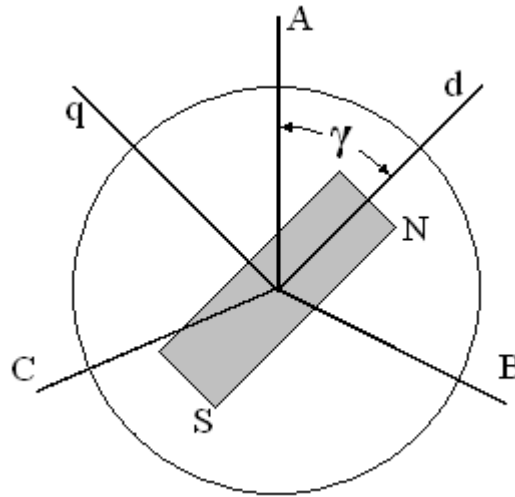


Рис. 8.1 Преобразование системы координат статора в систему координат ротора.

Введем систему координат, неподвижную относительно ротора – оси **d** и **q**, показанные на рис. 8.1 [2].

Ток **Id** оси **d** ротора создает магнитный поток, а ток **Iq** оси **q** – вращающий момент.

Токи в обмотках статора преобразуются к токам ротора по уравнениям Парка-Горева, которые можно найти в учебной литературе, например, в [3].

Частота вращения электродвигателя напрямую связана с величиной вращающего момента, который, в свою очередь, определяется значением тока **Iq**.

Принцип управления частотой вращения БДПТ заключается в управлении током **Iq**.

Для получения заданных значений магнитного потока и вращающего момента, а также частоты вращения БДПТ необходимо, соответственно, изменять значения токов **Id** и **Iq**.

Схема системы векторного управления БДПТ приведена на рис. 8.2. Особенностью системы является включение в нее математической модели БДПТ [13], [15], а также модулей прямого и обратного преобразования Парка-Горева.

Контур регулирования частоты вращения поддерживает частоту вращения двигателя $F_{эд}$ на заданном значении $F_{эдз}$. По сигналу отклонения частоты вращения от заданного значения eF последовательное корректирующее устройство КУЧВ формирует сигнал заданного значения тока $I_{qз}$ для оси q , необходимый для вращения ротора с заданной частотой вращения.

Для получения соответствующего магнитного потока в статоре задается значение тока $I_{dз}$.

По значениям $I_{qз}$, $I_{dз}$ и $F_{эд}$ в математической модели БДПТ вычисляются напряжения по осям ротора V_{dv} и V_{qv} , необходимые для получения этих токов.

Значения напряжений корректируются контурами регулирования токов. В этих контурах по сигналам отклонения токов от заданных значений ΔI_d и ΔI_q корректирующие устройства токов КУТ_d и КУТ_q формируют сигналы коррекции напряжений ΔV_d и ΔV_q . Сигналы коррекции складываются с вычисленными значениями напряжений, и полученные в результате значения напряжений V_{dc} и V_{qc} поступают в модуль ОППГ, выполняющий обратное преобразование Парка-Горева, где они преобразуются из системы координат ротора в систему координат статора, то есть в значения заданных напряжений на обмотках статора $V_{аз}$, $V_{бз}$ и $V_{сз}$.

По заданным напряжениям на обмотках ШИМ формирует управляющие сигналы на силовые ключи инвертора.

Инвертор производит соответствующее подключение к источнику питания обмоток статора, обеспечивающее вращение БДПТ с частотой вращения, равной заданной.

Векторное регулирование позволяет получить высокую точность регулирования частоты вращения и тока БДПТ, но требует применения микропроцессоров с большим быстродействием вследствие выполнения большого количества вычислительных операций с матрицами.

Пример схемы следящей системы управления топливной рейкой главного судового дизеля с векторным управлением БДПТ показан на рис. 8.3.

Исполнительный механизм системы ИМ состоит из электродвигателя БДПТ и механической передачи МП к топливной рейке ТР.

Следящая система является трехкаскадной, содержащая внутренние контуры регулирования:

- Датчиком частоты вращения БДПТ является резольвер Rsv, по выходным сигналам которого (напряжениям V_1 и V_2) в преобразователе резольвер-код ПРК формируются сигнал угла поворота ротора БДПТ в пределах одного оборота γ и сигнал частоты вращения ротора электродвигателя F_d .

Датчиком положения исполнительного механизма (и топливной рейки) служит трехканальный энкодер, импульсные сигналы которого **А, В, 0** в преобразователе энкодер-код ПЭК преобразуются в сигнал **Мд**, соответствующий положению ИМ.

Последовательное корректирующее устройство позиционирования КУП по отклонению e_M положения ИМ от заданного формирует сигнал заданной тоты вращения БДПТ F_z . КУП обеспечивает требуемое качество работы следящей системы путем использования пропорционального закона регулирования.

Последовательное корректирующее устройство КУЧВ контура регулирования частоты вращения БДПТ по отклонению частоты вращения электродвигателя от заданной e_F формирует сигнал заданной силы тока I_{zk} .

Требуемое качество поддержания частоты вращения достигается применением в КУЧВ пропорционально-интегрального закона регулирования.

Модуль упреждения МУ по сигналу F_z формирует составляющую заданной силы тока I_{zu} , которая уменьшает величину интегральной составляющей ПИ закона регулирования, что улучшает качество работы контура регулирования частоты вращения БДПТ.

Сигнал заданной силы тока $I_{zs} = I_{zk} + I_{zu}$.

Сигнал I_{zu} поступает в ограничитель заданной силы тока ОЗТ, ограничивающий входной сигнал до уровня I_{zo} с целью предотвращения перегрузок по току инвертора и электродвигателя.

Сигнал I_{zo} проходит через фильтр ФЗТ, уменьшающий влияние помех на работу контура регулирования частоты вращения БДПТ. Выходной сигнал фильтра является окончательным сигналом заданной силы тока I_z .

Сигнал I_z представляет собой сигнал I_{qz} на схеме, приведенной на рис. 8.2.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Алексеев И., Глубоков А. Управление вентильным электродвигателем. Часть 1. Электронные компоненты, №11, 2007, с. 28-32.
- 2 Алексеев И., Глубоков А. Управление вентильным электродвигателем. Часть 2. Электронные компоненты, №3, 2008, с. 117-124.

3 Баранов А.П., Раимов М.М. Моделирование судового электрооборудования и

средств автоматизации: Учебник для вузов. – СПб.: Элмор, 1997. – 232 с.

4 Глен Янг, Использование ПЛИС в системе управления двигателями с квадратурным энкодером. Электронные компоненты, №3, 2008, с. 33-34.

5 Дьяконов В.П. UisSim+MathCad+MATLAB. Визуальное математическое моделирование. – М.: СОЛОН-Пресс, 2004. – 384 с.

6 Жадобин Н.Е., Крылов А.П., Малышев В.А. Элементы и функциональные устройства судовой автоматики: Учебник. 2-е изд. – СПб.: Элмор, 1998. – 440 с.

7 Жданкин В. Поворотные шифраторы: основные типы и некоторые особенности применения. Современная техника автоматизации, №2, 2001. с. 68 – 79.

8 Козаченко В. Основные тенденции развития встроенных систем управления электроприводом. Материалы выставки ChipExpo-2006. Москва, 2006. – 12 с.

9 Кузнецов Е.В. Динамические характеристики объектов регулирования: Учебное пособие. – Новороссийск: МГА им. адм. Ф.Ф. Ушакова, 2007 г. – 150 с.

10 Кузнецов Е.В. Комплект компьютерных тренажеров: Системы автоматического регулирования с позиционированием: Учебно-методическое пособие. – Новороссийск: МГА им. адм. Ф.Ф. Ушакова, 2007 г. – 75 с.

11 Кузнецов Е.В. Комплект компьютерных тренажеров: Электрические системы автоматического регулирования с переменной скоростью исполнительного механизма. – Новороссийск: НГМА, 2004 г.

12 Кузнецов Е.В. Электрические системы автоматизации судового энергетического оборудования: Учебное пособие. – Новороссийск: НГМА, 2004 г. – 168с.

- 13 Овчинников И.Е. Вентильные электрические двигатели и привод на их основе (малая и средняя мощность) / И.Е. Овчинников : Курс лекций. СПб. : КОРОНА-Век, 2007. – 336 с.
- 14 Самойленко А.Ю. Электронные и микропроцессорные средства судовых систем управления. Учебное пособие. 2-е изд. – Новороссийск: МГА им. адм. Ф.Ф. Ушакова. 2006 – 210 с.
- 15 Системы автоматизированного управления электроприводами: учеб. пособие / под общей редакцией Ю.Н. Петренко. – 2-е изд. Минск : Новое знание, 2007. – 394 с.
- 16 Сервоприводы: основы, характеристики, проектирование. – СПб.:ЗАО «Сев-Евродрайф», 2000. – 76 с.
- 17 Справочник по наладке автоматических устройств контроля и регулирования. – Киев.: Наукова Думка, 1982. – 840 с.
- 18 Управляемые бесконтактные двигатели постоянного тока. Н.П. Адволоткин, И.Е. Овчинников и др. – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 160 с.
- 19 3-Phase BLDC Motor DriUer. www.fairchildsemi.com. 2000. 18 p.
- 20 Brushless DC Motors. Sermo Magnetic Inc. <http://www.servomag.com>.
- 21 DIGIUEX Single DriUe. User and commissioning manual. <http://www.parvex.com>. 2004. – 109 p.
- 22 DSP Solutions for BLDC Motors. Texas Instruments Europe, 1997.
- 23 Sensorless Brushless DC Motor with MR32 Embedded Motion Control Development System. <http://motorola.com/semiconductord/motor/>