

Ю.С. Усынин

**СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ.
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ
ПО АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМ**

ОБУЧАЮЩАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ ПРОГРАММА

Челябинск
2013

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	5
АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД НА БАЗЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ SINAMICS S120	7
Функциональная схема электропривода	7
Силовые цепи	7
Система управления	10
Преобразование сигналов звеньями системы управления	13
Исследование электропривода в режиме источника момента	17
1. Предварительные расчёты	17
2. Подготовка стенда к работе	18
3. Подключение электропривода	19
4. Экспериментальное исследование электропривода	20
Исследование электропривода в режиме источника скорости	23
1. Предварительные расчёты	23
2. Подготовка стенда к работе и подключение электропривода	23
3. Настройка системы электропривода	24
4. Экспериментальное исследование электропривода	26
Контрольные вопросы	28
АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД НА БАЗЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ UNIDRIVE SP	30
Функциональная схема электропривода	30
Силовые цепи	30
Система управления	31
Исследование электропривода в режиме источника момента	36
1. Предварительные расчёты	36
2. Подготовка стенда к работе	37
3. Подключение электропривода	38

4. Экспериментальное исследование электропривода	39
Исследование электропривода в режиме источника скорости	41
1. Предварительные расчеты	41
2. Подготовка стенда к работе и подключение электропривода	41
3. Настройка системы электропривода	42
4. Экспериментальное исследование электропривода	44
Исследование электропривода в режиме рекуперативного торможения	47
Особенности схемы силовых цепей лабораторного стенда .	47
Система управления активным выпрямителем.....	49
Экспериментальное исследование электропривода	49
Контрольные вопросы	51
АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД НА БАЗЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ACS 800	52
Принцип DTC-управления моментом	52
Функциональная схема электропривода	55
Силовые цепи	55
Система управления	55
Исследование электропривода в режиме источника момента.	62
1. Предварительные расчёты	62
2. Подготовка стенда к работе	63
3. Подключение электропривода.....	63
4. Экспериментальное исследование электропривода	65
Контрольные вопросы	67
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	68
ПРИЛОЖЕНИЕ 1	70
ПРИЛОЖЕНИЕ 2	73
Термины и определения.....	73
ПРИЛОЖЕНИЕ 3	74
Общий вид лаборатории	74

ПРЕДИСЛОВИЕ

Лабораторные работы – это мощное средство познания электротехнического оборудования и эффективных методов его эксплуатации, которые сопутствуют процессу обучения такой сложной системной специальности, какой является электропривод и автоматика промышленных установок.

На протяжении всей своей более шестидесятилетней истории кафедра электропривода и автоматизации промышленных предприятий уделяла серьезное внимание развитию лабораторной базы и всегда находились лидеры, готовые и способные взять на себя ведущую роль в работах по оснащению лаборатории новой техникой.

Прежде всего, следует вспомнить первого заведующего кафедрой Г.Ф. Солдатченкова, который, создавая кафедру (тогда она называлась «Электрификация промышленных предприятий») и используя свои прочные связи с промышленностью, сумел оснастить лабораторию электропривода самым современным оборудованием. Электропривод тех лет был релейно-контакторным, а системы управления – электромашинными.

На стыке 60х – 70х гг. по инициативе и при непосредственном участии Г.В. Суворова в лаборатории электропривода были заменены жидкостные реостаты нагрузочных устройств на инверторы, появились в электроприводах постоянного тока схемы подчиненного регулирования с регуляторами на УБСР (унифицированных блоках систем регулирования), в электроприводах переменного тока – схемы векторного управления. Широкое применение в промышленности в те годы замкнутых систем регулирования электроприводов привело к существенному пересмотру содержания курсов теории автоматического управления и силовой электроники, которые читались на кафедре, что способствовало более глубокому проникновению идей этих курсов в специальные учебные дисциплины.

В 80-х гг. ярко проявился творческий талант и трудолюбие О.И. Осипова, который взял на себя большой труд по коренному переоснащению лабораторий. Одних только маломощных типовых тиристорных преобразователей для нужд лаборатории было приобретено более 40 экземпляров. В итоге в лаборатории были представлены практически все основные типы современных вентильных электроприводов постоянного и переменного (с асинхронными и синхронными двигателями) тока. Большая ра-

бота была проведена по методическому обеспечению этих лабораторных работ.

В настоящее время в лаборатории представлены современные образцы регулируемых электроприводов практически всех ведущих мировых производителей электротехнического оборудования: *ABB, Control Techniques, Siemens, Omron, Schneider Electric*. К сожалению, перестроечные годы резко «уронили» нашу электротехническую промышленность, которая в лаборатории в настоящее время своими изделиями не представлена.

Имеется четыре группы лабораторных стендов электропривода: постоянного тока, асинхронные, синхронные и следящие. Каждый стенд оборудован электромашинным агрегатом (двигатель и нагрузочная машина), стандартным вентильным преобразователем с системой управления на программируемых контроллерах, измерительной аппаратурой, персональным компьютером.

Содержание лабораторных работ соответствует современным требованиям по курсу систем управления электроприводов [1, 2], сборникам задач [3, 4].

Конструктивно каждый лабораторный стенд выполнен по модульному принципу, что существенно облегчает разработку, изготовление, наладку и эксплуатацию электропривода. Модули пронумерованы и установлены на лицевой стороне лабораторного стенда. Учитывая большую сложность современных электроприводов, представленных в лаборатории, каждая лабораторная работа выполняется студентами за 2-4 посещения.

Изучение представленных электроприводов далее продолжается в смежных курсах: «Экспериментальное исследование электроприводов», «Диагностика автоматизированных электроприводов».

АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД НА БАЗЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ SINAMICS S120

Цель работы: 1. Ознакомиться со структурой и функциональной схемой, принципом работы и особенностями наладки типового частотнорегулируемого асинхронного электропривода.

2. Изучить регулировочные, энергетические и динамические характеристики асинхронного электропривода с разными структурами системы управления.

Функциональная схема электропривода

Силовые цепи

Трёхфазный асинхронный двигатель $M1$ получает питание от транзисторного преобразователя частоты Sinamics S120 по схеме ([рис. 1](#)). Здесь напряжение питающей сети 380 В, которое берётся с нижних губок вводного автоматического выключателя QF через клеммы A, B, C , автоматический выключатель $QF1$ (см. модуль $A1$ «Питание стенда»), через клеммы $A1, B1, C1$, измеритель мощности, клеммы $A2, B2, C2$ (см. модуль $A2$ «Измеритель мощности»), через линейный контактор $KM1$, клеммы $A3, B3, C3$ (см. модуль $A3$ «Модуль питания»), подаётся на входные клеммы A, B, C преобразователя частоты (см. модуль «Преобразователь частоты»). Этот преобразователь частоты имеет модульное исполнение и содержит (на модуле «Преобразователь частоты» расположены по центру лицевой панели слева направо) модуль управления CU320, модуль выпрямителя (SMART-модуль), автономный инвертор, собранный по трёхфазной мостовой схеме, и модуль торможения на внешний резистор RB . Внешний тормозной резистор RB подключается к силовым клеммам $XS1$ и $XS2$ преобразователя частоты и представляет собой последовательное соединение резисторов $RQ1, RQ2, RQ3$, расположенных на модуле «Асинхронный двигатель». Выходные клеммы U, V, W автономного инвертора подключаются к клеммам $X4, X5, X6$ обмотки статора асинхронного двигателя: первые две фазы – непосредственно, а третья – через входные (силовые) клеммы $XS3$ и $XS4$ датчика тока ДТ1 (модуль $A4$). Обмотка статора соединена в трёхфазную звезду, поэтому клеммы

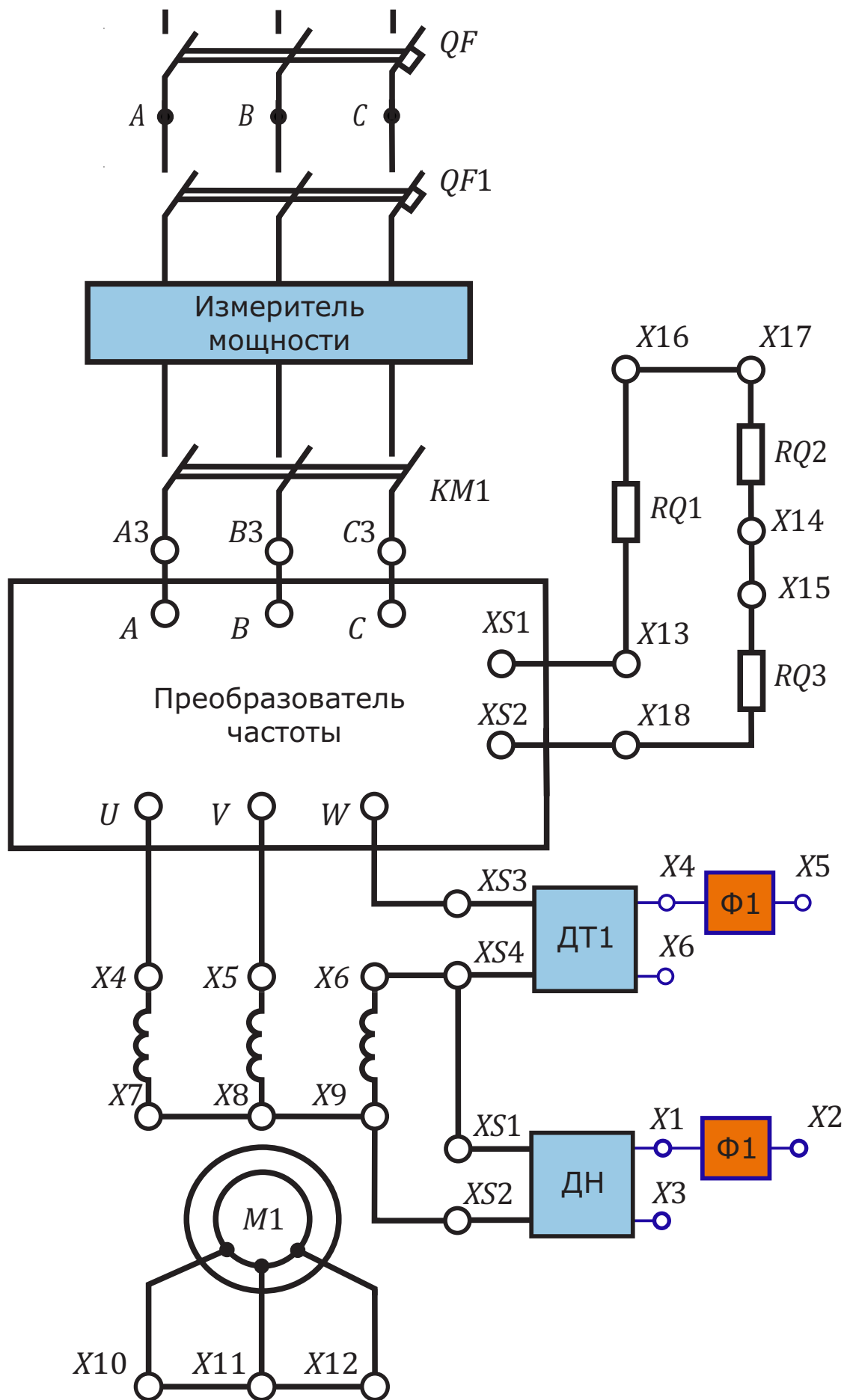


Рис. 1. Силовые цепи электропривода

X7, X8, X9 между собой закорочены, образуя общую точку. Кольца обмотки ротора асинхронного двигателя выведены на клеммы X10, X11, X12 и между собой закорочены, т.е. асинхронный двигатель с фазным ротором работает как короткозамкнутый.

Силовые цепи преобразователя частоты выполнены по стандартной схеме ([рис. 2](#)).

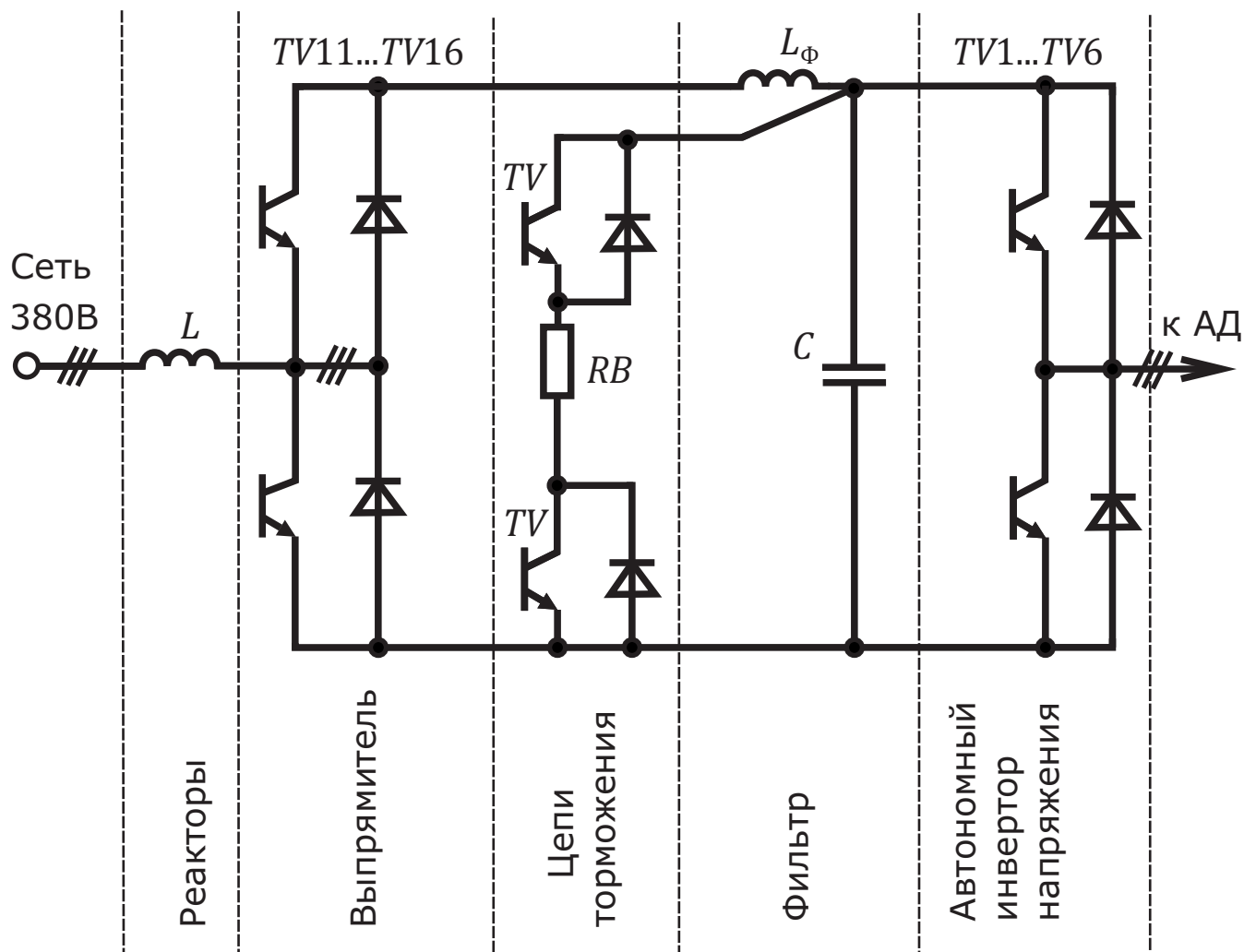


Рис. 2. Функциональная схема силовых цепей преобразователя частоты

Модуль выпрямителя выполнен на шести транзисторах $TV11 \dots TV16$ с обратными диодами. Он может обеспечить два режима взаимодействия преобразователя частоты с питающей сетью: работу преобразователя частоты без рекуперации и с рекуперацией. В первом случае управляющие сигналы не подаются на транзисторы, а функцию неуправляемого выпрямителя выполняет диодный мост. Во втором случае, когда подаются управляющие сигналы на транзисторные ключи, обеспечивается режим рекуперации энергии в сеть.

Для реализации режима рекуперативного торможения, между питающей сетью 50 Гц и входными клеммами выпрямителя установлены токоограничивающие реакторы L .

Модуль автономного инвертора выполнен по трёхфазной мостовой схеме на транзисторах $TV1 \dots TV6$. В этом же модуле находится $L_{\phi C}$ – фильтр звена постоянного тока преобразователя частоты.

Тормозной модуль выполнен на транзисторах TV и предназначен для подключения к внешнему тормозному резистору RB , который на стенде выполнен последовательным соединением трёх силовых резисторов $RQ1, RQ2, RQ3$ (см. модуль “Асинхронный двигатель”).

Система управления

На базе преобразователей Sinamics S120 можно реализовать несколько десятков вариантов структур системы управления (**СУ**) синхронными и асинхронными электроприводами. В учебной лаборатории электропривода в процессе изучения курса **СУЭП** рассматриваются два варианта **СУ**: **СУ** асинхронным электроприводом, работающая в режиме источника момента, и **СУ** скоростью асинхронного электропривода.

Функциональная схема **СУ** лабораторного электропривода на базе Sinamics изображена на **рис. 3** и включает в себя канал регулирования скорости, канал регулирования момента и силовые цепи.

В канале регулирования скорости сигнал n_z , соответствующий заданной установившейся скорости электропривода, через фильтр $\Phi 1$ поступает на вход задатчика интенсивности **ЗИ**. Выходной сигнал **ЗИ** $n_{зи}$ подается на первый вход регулятора скорости **РС**, где сравнивается с сигналом обратной связи по скорости n , который формируется на выходе блока p и через фильтр $\Phi 2$ подается на второй вход **РС**. В блоке p сигнал с датчика положения BQ преобразуется в переменную n . Поясним упрощенную работу модуля p : если считать, что на выходе датчика BQ формируется не серия импульсов, а непрерывный сигнал, пропорциональный положению ротора, то можно считать, что модуль p реализует простую функцию нахождения производной от входного сигнала. Сигнал на выходе **РС** можно ограничить максимальным значением, что на схеме условно показано блоком ограничения **БО**.

I. Канал регулирования скорости

II. Канал регулирования момента

III. Силовые цепи

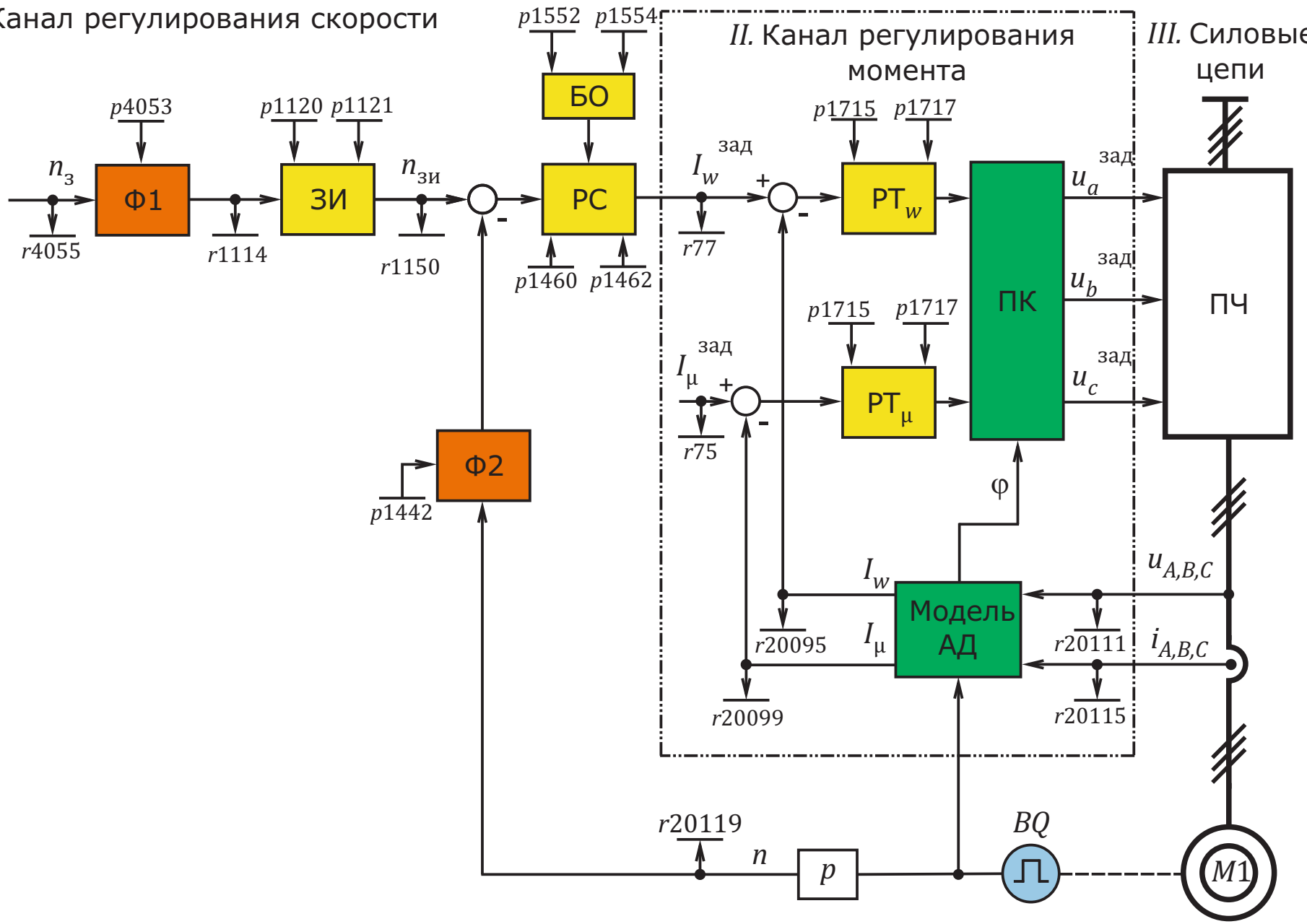


Рис. 3. Функциональная схема системы управления

Канал регулирования момента выполнен в соответствии с типовой схемой векторного регулирования момента, когда электромагнитный момент асинхронного электродвигателя формируется в ортогональной системе координат. Мгновенные значения фазных напряжений u_A, u_B, u_C и фазных токов i_A, i_B, i_C поступают на вход блока "**Модель АД**". **Далее, при объяснении процессов будем полагать, что индуктивные сопротивления рассеяния ротора и статора близки к нулю, а насыщение магнитной системы отсутствует.** На выходе модели АД после математических преобразований выделяется составляющие, которые будем называть по тексту: "активная" I_W и "реактивная" I_μ составляющие пространственного вектора тока статора. В реальной электрической машине в зависимости от типоразмера машины и мощности реальные значения активной и реактивной составляющих тока статора отличаются от I_W и I_μ на 10-15%.

С помощью регулятора PT_W обеспечивается поддержание "активной" составляющей тока статора. Для этого на первый вход регулятора PT_W подается сигнал $I_W^{3АД}$ или с выхода **РС** (когда электропривод работает как типовая схема подчиненного регулирования скорости), или от независимого источника задающего сигнала (когда электропривод работает в режиме самостоятельного источника момента).

На второй вход PT_W подается сигнал отрицательной обратной связи по току I_W .

Регулятором PT_μ поддерживается заданное значение тока I_μ . На первый вход этого регулятора подается сигнал, соответствующий заданному значению $I_\mu^{3АД}$ тока, а на второй – сигнал отрицательной обратной связи по току I_μ .

Преобразователь координат **ПК** преобразует сигналы с выходов регуляторов PT_W и PT_μ в пространственный вектор (в полярной системе координат), соответствующий желаемому значению напряжения, проекции которого на три неподвижные в пространстве и расположенные под углами 120° друг к другу оси соответствуют желаемым мгновенным значениям фазных напряжений преобразователя частоты ПЧ. Положение вектора напряжения относительно неподвижной пространственной системы координат определяется углом $\varphi = \omega_1 t$, где ω_1 - скорость вращения вектора напряжения (**рис. 3**).

Заметим, что все элементы **СУЭП** представлены в виртуальной форме, т.е. существуют в виде отдельных блоков, реализованных в системном программном обеспечении, а не в виде узлов реальной конструкции. Прикладное программное обеспечение "Starter" позволяет выводить на экран монитора и наблюдать изменение во времени промежуточных переменных системы управления, что на функциональной схеме (см. **рис. 3**) показано стрелками, исходящими из точек ветвления соответствующих каналов. Связь ЭВМ и ПЧ аппаратно организована по последовательному интерфейсу через адаптер (коммуникационный процессор) Profibus DP/USB (6ES7972-OCB20). Интерфейс Profibus DP встроен в модуль CU320 преобразователя частоты Sinamics S120. При изменении значений или чтении "объектов" (в технической документации "объекты" называют параметрами, что не всегда верно, так как там кроме параметров могут храниться переменные) преобразователя частоты сеть Profibus работает в ациклическом режиме. ЭВМ подключается к коммуникационному процессору Profibus DP/USB к интерфейсному разъему USB. Предельная скорость обмена информацией между ПЧ и ЭВМ составляет 1,2 Мбит/с.

Горизонтальная черта, в которую упирается стрелка, указывает номер "объекта", которому в системном программном обеспечении соответствует наблюдаемая переменная. Например, стрелка, исходящая из канала $n_{зи}$, показывает, что сигнал $n_{зи}$ можно прочесть в "объекте" r1150. Системное программное обеспечение позволяет изменять величины параметров звеньев **СУЭП**. В звеньях Ф1 и Ф2 можно устанавливать постоянные времени фильтров; в пропорционально-интегральных звеньях **ЗИ**, **РС**, PT_W и PT_μ – величины коэффициентов усиления П-каналов и постоянных времени И-каналов; кроме того, в регуляторе **РС** можно установить переменный уровень ограничения выходного сигнала регулятора.

Преобразование сигналов звеньями системы управления

Физику работы **СУ** и математические преобразования, реализованные в системном программном обеспечении, поясним для установившегося режима работы асинхронного двигателя. В этом режиме по фазным обмоткам статора протекают синусоидальные токи i_A, i_B, i_C , образующие трехфазную симметричную систему (**рис. 4 а**). Пространственные магнитные оси a, b, c фазных обмоток статора сдвинуты равномерно вдоль внутрен-

ней расточки статора на 120° ([рис. 4 б](#)). Если в момент времени t_0 зафиксировать мгновенные значения токов i_A, i_B, i_C , а вдоль осей a, b, c отложить векторы, длина которых равна мгновенным значениям этих токов, то получим вектор-сумму I_1 (обобщенный пространственный вектор).

Между этими векторами в трехфазной синусоидальной симметричной системе существует взаимосвязь: направления векторов i_A, i_B, i_C на [рис. 4 б](#) неизменны, а их длина изменяется во времени по синусоидальному закону в пределах от $+I_m$ до $-I_m$ с угловой частотой ω_1 . Результирующий (обобщенный пространственный) же вектор I_1 , наоборот, вращается с угловой скоростью, равной угловой частоте ω_1 , но длина его постоянна и равна $1,5I_m$.

Если теперь измерять мгновенные величины фазных напряжений u_A, u_B, u_C и построить графики изменения во времени этих напряжений, то аналогично вектору I_1 можно построить результирующий вектор напряжения U_1 ([рис. 4 б](#)). В асинхронном двигателе кривые фазных токов отстают во времени от соответствующих кривых фазных напряжений на угол φ_1 . На такой же угол (но пространственный) сдвинут в сторону отставания и вектор I_1 по отношению к вектору U_1 .

Чтобы не затемнять рисунки, выделим на [рис. 4 б](#) векторы U_1 и I_1 , перенесем их на [рис. 4 в](#) и продолжим рассуждения. Рассмотрим следующий этап преобразования величин, циркулирующих в модели АД, а именно: вычислим проекции вектора I_1 на ось, совпадающую по направлению с вектором U_1 (назовем эту составляющую током I_W – “активной” составляющей тока статора), и ось, направленную поперек вектора U_1 (эту составляющую назовем I_μ – “реактивной” составляющей тока статора). Графический смысл этой процедуры ясен из [рис. 4 в](#). Алгебраические выражения могут быть получены на основании известных формул аналитической геометрии. Составляющие I_W, I_μ являются выходными виртуальными переменными звена “[Модель АД](#)”. Их можно наблюдать, обратившись к “объектам” r20095 и r20099.

Обратим внимание на следующую особенность. Вектор I_1 и его составляющие I_W и I_μ – это вращающиеся векторы. Вектор U_1 также вращается с той же угловой скоростью ω_1 . Поэтому

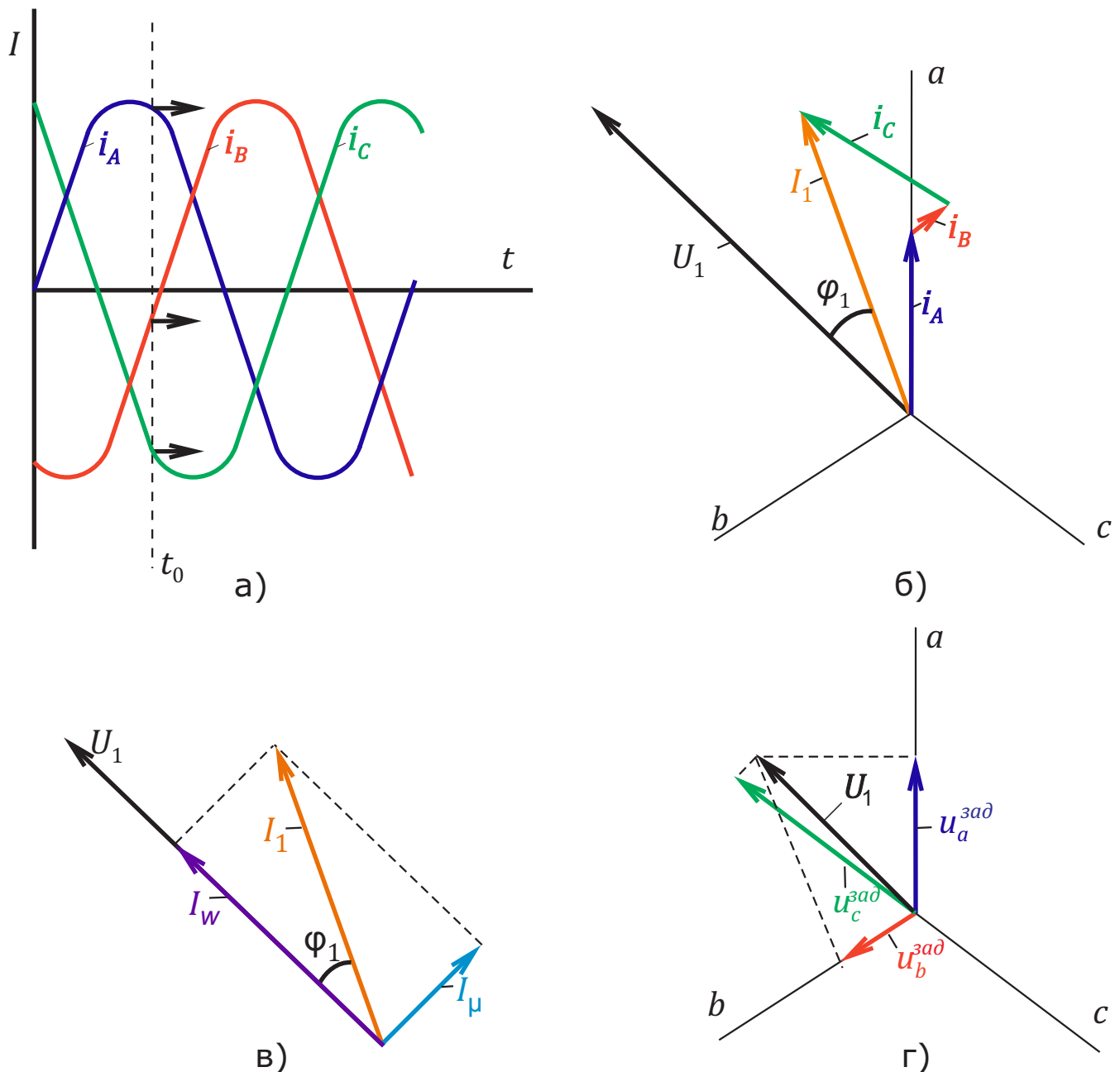


Рис. 4. Преобразование переменных в системе управления:
 а) кривые фазных токов статора; б) полученные результирующие векторы I_1 и U_1 ; в) выделение составляющих I_μ и I_W ; г) получение мгновенных значений заданий фазных напряжений

если рассматривать движение вектора I_1 по отношению к U_1 , то они в установившемся режиме оказываются взаимно неподвижны. Следовательно, I_W и I_μ можно трактовать как два сигнала постоянного тока и тогда для их регулирования можно применять аппаратуру и методы настройки систем регулирования постоянного тока, что и выполняется в схеме регуляторами PT_W (регулятором "активной" составляющей тока статора) и PT_μ (регулятором "реактивной" составляющей).

В этом случае говорят, что формирование момента двигателя производят во вращающейся системе координат, угловая скорость которой равна угловой скорости вращения вектора U_1 , т.е. угловой частоте напряжения на статоре асинхронного двигателя.

Наконец, поясним последнее преобразование, выполняемое преобразователем координат **ПК** (**рис. 4 г**). Здесь пространственный вектор U_3 , амплитуда и положение которого зависят от сигналов с выходов регуляторов PT_W и PT_μ , преобразуется в мгновенные сигналы задания фазных напряжений $u_a^{зад}, u_b^{зад}, u_c^{зад}$. Эти сигналы равны проекциям вектора U_3 на пространственные оси a, b, c .

Исследование электропривода в режиме источника момента

1. Предварительные расчёты

В исходной расчётной точке режима, принятого за базовый, переменные, характеризующие состояние двигателя, имеют следующие значения: напряжение на обмотке статора за вычетом падения напряжения на этой обмотке (**ЭДС** первичной обмотки) $E_1 = 140$ В; частота напряжения на статоре $f_1 = 200$ рад/с; действующее значение тока фазы статора $I_1 = 10$ А; временной угол сдвига между векторами E_1 и тока I_1 $\varphi_1 = 30^\circ$; скольжение в расчётной точке $s = 5\%$; угол φ_2 между векторами E_2 и I_2 примерно равен нулю. Требуется:

1.1. Для базового режима построить векторный треугольник токов в соответствии с уравнением $I_1 + I'_2 = I_\mu$; где I_1 , I'_2 , I_μ – векторы тока статора, ротора (приведенный) и намагничивания;

1.2. Определить значение электромагнитного момента в исходной точке, принимаемое за базовое.

1.3. Переменные, характеризующие состояние двигателя в исходной точке, принять за базовые значения.

1.4. Построить в относительных единицах в зависимости от угловой скорости n двигателя при постоянном моменте, равном базовому значению, следующие графики: $M = f(n)$; $E_1 = f(n)$; $I_1 = f(n)$; $\mu = f(n)$; $I_W = f(n)$; $\cos\varphi_1 = f(n)$.

1.5. Повторить те же статические характеристики при работе электропривода в режиме поддержания момента в электроприводе $M = 0,5M_{\text{БАЗ}}$. Считать, что поддерживается постоянный магнитный поток двигателя $\Phi = \Phi_{\text{БАЗ}}$.

1.6. Повторить те же характеристики для режима идеального холостого хода двигателя. Магнитный поток по-прежнему считать постоянным.

1.7. Задавая электроприводе режим поддержания скорости $n = 0,5n_{\text{БАЗ}}$, рассчитать и построить при изменении момента графики следующих зависимостей $n = f(M)$, $E_1 = f(M)$, тока $I_1 = f(M)$; $I_\mu = f(M)$; $I_W = f(M)$.

1.8. Повторить те же зависимости при работе в режиме поддержания пониженной скорости при $n = 0,5n_{\text{БАЗ}}$.

1.9. На всех характеристиках, соответствующих пунктам 1.4....1.8., выделить точки, соответствующие:

а) базовому режиму;

б) режиму работы электропривода на упор.

1.10. Изобразить, как изменяется в электроприводе треугольник, образованный векторами потокосцеплений статора, ротора и результирующего вектора в зазоре электрической машины: а) при изменении скорости в соответствии с п. 1.4; б) при изменении момента в соответствии с п. 1.7.

2. Подготовка стенда к работе

2.1. Собрать схему соединений в соответствии с функциональной схемой ([см. рис. 1](#)). Неразъёмные клеммы подключены заранее. Разъёмные клеммы следует соединить гибкими проводниками.

2.2. Выполнить соединение между энкодером, расположенным на валу двигателя $M1$ (разъём XR на модуле $A14$) и каналом обратной связи (разъём "[Энкодер](#)" на модуле "Преобразователь частоты").

2.3. Собрать схему источника задающего сигнала тока I_W^{3AD} . Задающее напряжение берётся с выхода задатчика интенсивности $DA1$ (клемма $X2$ на модуле $A12$) и регулируется потенциометром $RP1$ на том же модуле $A12$ ([см. рис. 5](#)). Клемма U_{BX} на модуле «Преобразователь частоты» соответствует сигналу I_W^{3AD} на [рис. 3](#). Чтобы выполнить эти операции, следует клемму $X2$ на модуле $A12$ соединить с клеммой U_{BX} на модуле "Преобразователь частоты", а клемму «общая точка» соединить с аналогичной клеммой на модуле "Преобразователь частоты".

2.4. Аналогично собрать схему узла задания тока I_μ . Напряжение, пропорциональное величине этого тока, следует брать с выхода регулятора $DA2$ (клемма $X6$ модуля $A12$). Перед этим следует на вход $X3$ регулятора $DA2$ подать напряжение с выхода $RP1$ (клемма $X1$ на модуле $A12$), а конденсатор $C1$ ввести, поставив переключатель $SA4$ в положение 5, тем самым регулятор $DA2$ будет насыщен до предельного напряжения, величину которого можно плавно изменять блоком ограничения AQ с помощью потенциометра $SA3$. Чтобы сигнал I_μ^{3AD} задания подать на задающий вход регулятора PT_μ , необходимо в соответствии с [рис. 5](#) клемму $X6$ регулятора $DA2$ соединить с клеммой U_{BX2} на модуле "Преобразователь частоты", а клемму «Общая точка» соединить с аналогичной клеммой модуля "Преобразователь частоты".

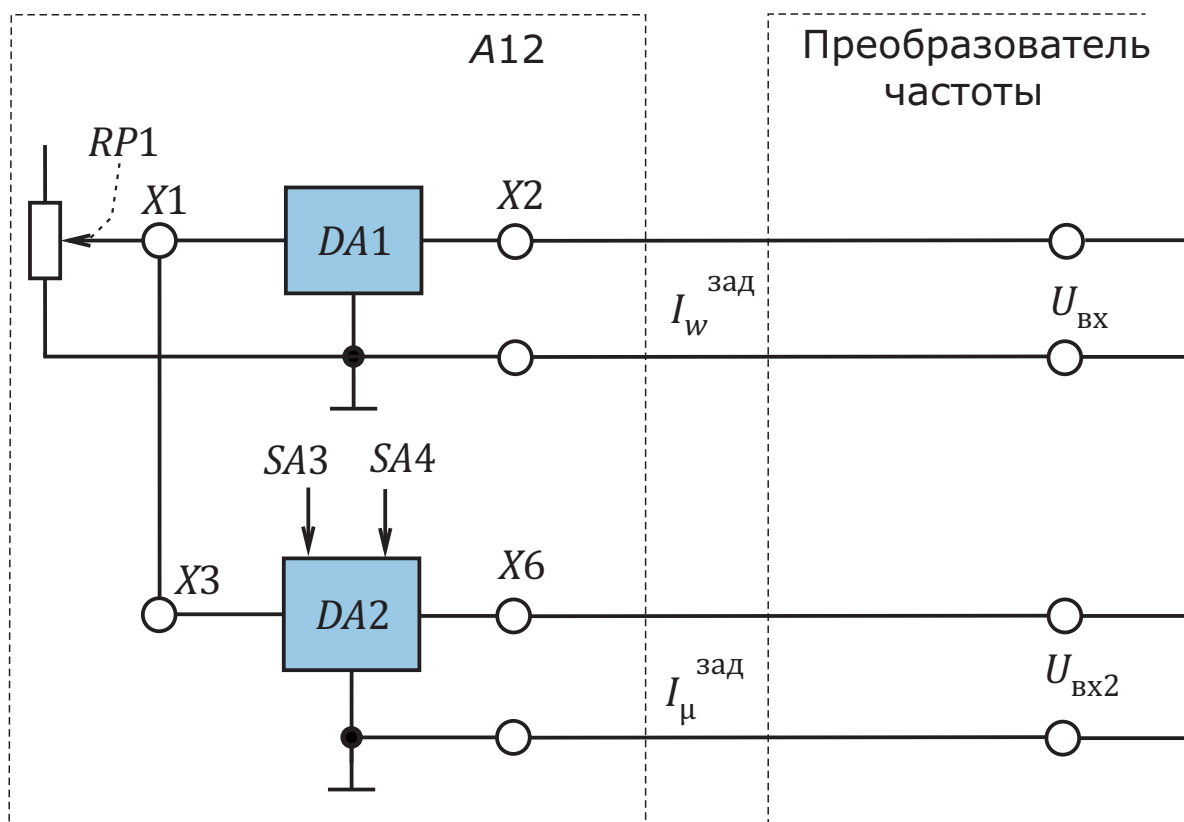


Рис. 5. Схема подключения сигналов $I_{\mu}^{\text{зад}}$ и $I_w^{\text{зад}}$

3. Подключение электропривода

3.1. Подать на стенд напряжение внешней сети 380 В автоматом QF (на правой боковой стенке шкафа).

3.2. Включить автомат $QF1$ (модуль $A1$). Тем самым подаётся напряжение на цепи управления и будут готовы к работе силовые цепи.

3.3. Подключить нагрузочную машину. Для этого: – на модуле $A14$ переключатель $SA1$ поставить в нижнее положение, тем самым будет задан режим поддержания скорости нагрузочной машины;

– переключатель $SA2$ поставить в верхнее положение, тем самым дать разрешение на работу нагрузочной машины; переключатель $SA3$, который задаёт направление вращения нагрузочной машины, оставить в нейтральном положении. Потенциометр $RP1$, задающий величину скорости (или момента) нагру-

зочной машины, поставить в минимальное положение (крайнее против часовой стрелки);

- кнопкой “Пуск” контактора КМ2 (модуль А6) подключить силовые цепи нагрузочной машины к питающей сети.

3.4. Проверить работу нагрузочной машины, для чего:

- дать разрешение на работу нагрузочной машины, поставив переключатель SA2 в верхнее положение;

- выбрать направление вращения нагрузочной машины (“Вперёд” или “Назад”) переключателем SA3;

- плавным поворотом движка потенциометра RP1 обеспечить плавное изменение угловой скорости вращения нагрузочной машины. **Не допускать** резких перемещений движка RP1 и тем более смены направления вращения нагрузочной машины переключателем SA3 без предварительного плавного снижения скорости до нуля;

- проверить работу нагрузочной машины для обоих направлений её вращения.

3.5. Подключить преобразователь частоты к питающей сети, для чего:

- переключатели SA1, SA2 модуля “Преобразователь частоты” поставить в нижнее положение;

- кнопкой “Пуск” контактора КМ1 (модуль А3) подать напряжение питания на силовые цепи преобразователя частоты;

- перевести преобразователь частоты в режим источника момента, для чего переключатель SA3 поставить в верхнее положение.

В режиме готовности преобразователя частоты к работе на панели модуля CU320 высветится цифра “10”.

3.6. Проверить работу аналоговых регуляторов DA1, DA2 (модуль А12). Для этого, пользуясь осциллографом fluke 192b, последовательно посмотреть характер изменения напряжений на клеммах X1, X2 и X6 при изменении уставок потенциометров RP1, SA3.

3.7. Включить в работу преобразователь частоты в режиме векторного регулирования момента, для чего на модуле “Преобразователь частоты” переключатель SA3 поставить в верхнее положение.

4. Экспериментальное исследование электропривода

4.1. Собрать схему в соответствии с [рис. 1](#).

4.2. В настроенной системе электропривода, поддерживая момент $M = M_{\text{БАЗ}}$, экспериментально снять следующие статические характеристики: механическую характеристику, зависимости $U_1 = f(n)$, $I_1 = f(n)$, $I_\mu = f(n)$, $I_W = f(n)$; $I'_2 = f(n)$. Скорость электропривода следует изменять с помощью нагрузочной машины от 0 до $+n_{\text{МАХ}}$. При этом переключатель SA1 (см. модуль A14) должен стоять в положении « ω ».

Уставки задания составляющих $I_\mu^{\text{ЗAD}}$, $I_W^{\text{ЗAD}}$ тока статора следует поддерживать постоянными. Величины этих уставок следует взять такими же, какие указаны для исходного режима на стадии предварительных расчётов. Измеряемые координаты в ходе эксперимента наблюдаются на выходах следующих "объектов": r20095 и r20099

Следующие переменные определяются расчетным путем:
 $\varphi_1 = \text{arctg}(I_\mu/I_W)$; $I'_2 = I_1 \cdot \cos\varphi_1$.

4.3. Поддерживая магнитный поток постоянным $\Phi = \Phi_{\text{БАЗ}}$, уменьшить электромагнитный момент двигателя в два раза до значения $M = 0,5M_{\text{БАЗ}}$. Повторить те же статические характеристики, которые указаны в п. 4.2.

4.4. Поддерживая магнитный поток двигателя постоянным, перевести электропривод в режим идеального холостого хода. Снять те же статические характеристики, поддерживая режим идеального холостого хода с помощью нагрузочной машины.

(Как можно убедиться в существовании режима идеального холостого хода?)

4.5. Задавая электромашинному агрегату с помощью нагрузочной машины режим поддержания постоянной скорости (переключатель SA1 стоит в положении " ω "), экспериментально снять при поддержании $n = n_{\text{БАЗ}}$ следующие зависимости: $n = f(M)$, $I_\mu = f(M)$, $E_1 = f(M)$, $I_1 = f(M)$, $I_W = f(M)$. Момент нагрузки изменять в диапазоне от $-M_{\text{МАХ}}$ до $+M_{\text{МАХ}}$. Принять $|M_{\text{МАХ}}| = 1,2M_{\text{БАЗ}}$.

4.6. Повторить те же характеристики при работе электропривода в режиме поддержания пониженной скорости $n = 0,5n_{\text{БАЗ}}$.

4.7. Для двух точек (одна соответствует двигательному режиму, другая – генераторному), указанных преподавателем, построить треугольник, образованный векторами потокосцеплений статора, ротора и результирующего вектора в зазоре электрической машины.

4.8. При работе электропривода в базовой точке снять осциллограммы фазного напряжения на статоре $U_{\Phi}(t)$ и фазного тока $I_{\Phi}(t)$.

4.9. Поддерживая неизменной скорость и уменьшив момент в два раза, снять те же осциллограммы.

4.10. Вернуться в исходную базовую точку, затем при неизменном моменте двигателя уменьшить скорость электропривода в два раза. Снова снять те же осциллограммы.

Сопоставить три серии осциллограмм по величине амплитуды напряжения и тока, по частоте, по сдвигу по фазе между синусоидами напряжения и тока.

4.11. Повторить работу электропривода в тех же точках и зафиксировать в каждом из названных трёх режимов величины токов I_W , I_{μ} , определить для каждой точки амплитудные значения фазных токов и фазовый сдвиг между векторами напряжения и тока.

Исследование электропривода в режиме источника скорости

1. Предварительные расчеты

1.1. Воспользоваться численными значениями переменных, характеризующих базовый режим электропривода, в режиме источника момента, определить величину базового момента электропривода и принять это значение момента за номинальное.

1.2. Для режима поддержания скорости $n = n_{\text{БАЗ}}$ рассчитать и построить при изменении момента графики следующих зависимостей: скорости $n = f(M)$; ЭДС обмотки статора $E_1 = f(M)$; тока статора $I_1 = f(M)$; тока намагничивания (возбуждения) $I_{\mu} = f(M)$; активной составляющей тока $I_W = f(M)$; напряжения в звене постоянного тока $U_d = f(M)$. Величину момента изменять в диапазоне от $-1,2 \cdot M_{\text{Н}}$ до $+1,2 \cdot M_{\text{Н}}$.

1.3. Повторить те же зависимости при работе в режиме поддержания пониженной скорости при $n = 0,5 \cdot n_{\text{БАЗ}}$.

1.4. Ввести ограничение максимального момента двигателя на уровне $M_{\text{МАКС}} = 1,2 \cdot M_{\text{Н}}$.

1.5. Построить механическую характеристику электропривода $n = f(M)$, содержащую участки поддержания скорости и ограничения момента.

На характеристике выделить точки, соответствующие:

а) базовому режиму;

б) режиму работы электропривода на упор.

В этих точках найти численные значения следующих переменных: ЭДС обмотки статора E_1 , тока статора I_1 , тока намагничивания (возбуждения) I_{μ} , активной составляющей тока I_W , напряжения в звене постоянного тока U_d .

2. Подготовка стенда к работе и подключение электропривода

2.1. Собрать схему соединений в соответствии с функциональной схемой ([см. рис. 1](#)). Неразъемные клеммы подключены заранее. Разъемные клеммы следует соединить гибкими проводниками.

2.2. Подать на стенд напряжение внешней сети 380 В автоматом QF (на правой боковой стенке шкафа).

Включить модуль *A1*. Тем самым подаётся напряжение на цепи управления 5 В и будут готовы к работе силовые цепи.

2.3. Подключить нагрузочную машину, проверить её работу, подключить преобразователь частоты к питающей сети и проверить его работу.

Указанные процедуры выполнить в соответствии с рекомендациями, изложенными в п.п. 2.3, 2.4 настоящего пособия в разделе «Исследование электропривода в режиме источника момента».

2.4. Проверить работу аналоговых регуляторов **ЗИ** (*DA1*), **РС** (*DA2*) (модуль *A12*). Для этого с помощью осциллографа fluke 192В последовательно посмотреть характер изменения напряжений на клеммах *X1*, *X2* и *X6* при изменении уставок потенциометров *RP1*, *RP2*, а также при пользовании переключателями *SA1*, *SA2*, *SA3* и *SA4*.

Убедиться в возможности изменения величины и знака напряжения на выходе потенциометра *RP1*, темпа на выходе датчика **ЗИ**, регулировки уставки блока ограничения.

Включить в работу преобразователь частоты в режиме векторного регулирования момента, для чего на модуле *A6* переключатель *SA3* поставить в верхнее положение.

3. Настройка системы электропривода

3.1. Определить знак подключения датчика скорости ко входу регулятора скорости **РС**. Для этого:

– собрать схему разомкнутого контура регулирования скорости (**см. рис. 6**) и выставить минимальный коэффициент усиления регулятора **РС** при закороченном конденсаторе *C1*;

– подать на вход *R1* (клемма *X3*) с выхода датчика интенсивности **ЗИ** небольшой сигнал, достаточный для вращения двигателя со скоростью не выше $(0,1 - 0,2) \cdot n_n$. Из-за мягкой механической характеристики электропривода при работе только контура косвенного регулирования момента режим поддержания заданной скорости вращения двигателя может быть очень нестабильным;

– кратковременно подать сигнал $U_{ДС}$ обратной связи по скорости с выхода преобразователя «частота-напряжение» **ПЧН** (модуль *A4*) на вход *R2* (клемма *X4*) и определить её знак. Он должен быть отрицательным. Если связь положительная, то сле-

дует поменять полярность сигнала $U_{дс}$, поступающего на вход $R2$ регулятора **PC**;

- замкнуть контур регулирования скорости.

3.2. Выбрать оптимальные значения параметров регулятора **PC** ($DA2$). Сначала следует настроить П-канал (выбором величины сопротивления $R4$ с помощью переключателя $SA2$), а потом – И-канал (выбором величины ёмкости конденсатора $C1$ с помощью переключателя $SA4$). Качество настройки следует оценивать по виду переходной функции замкнутого контура регулирования скорости.

I. Канал регулирования скорости

III. Сеть 380 В

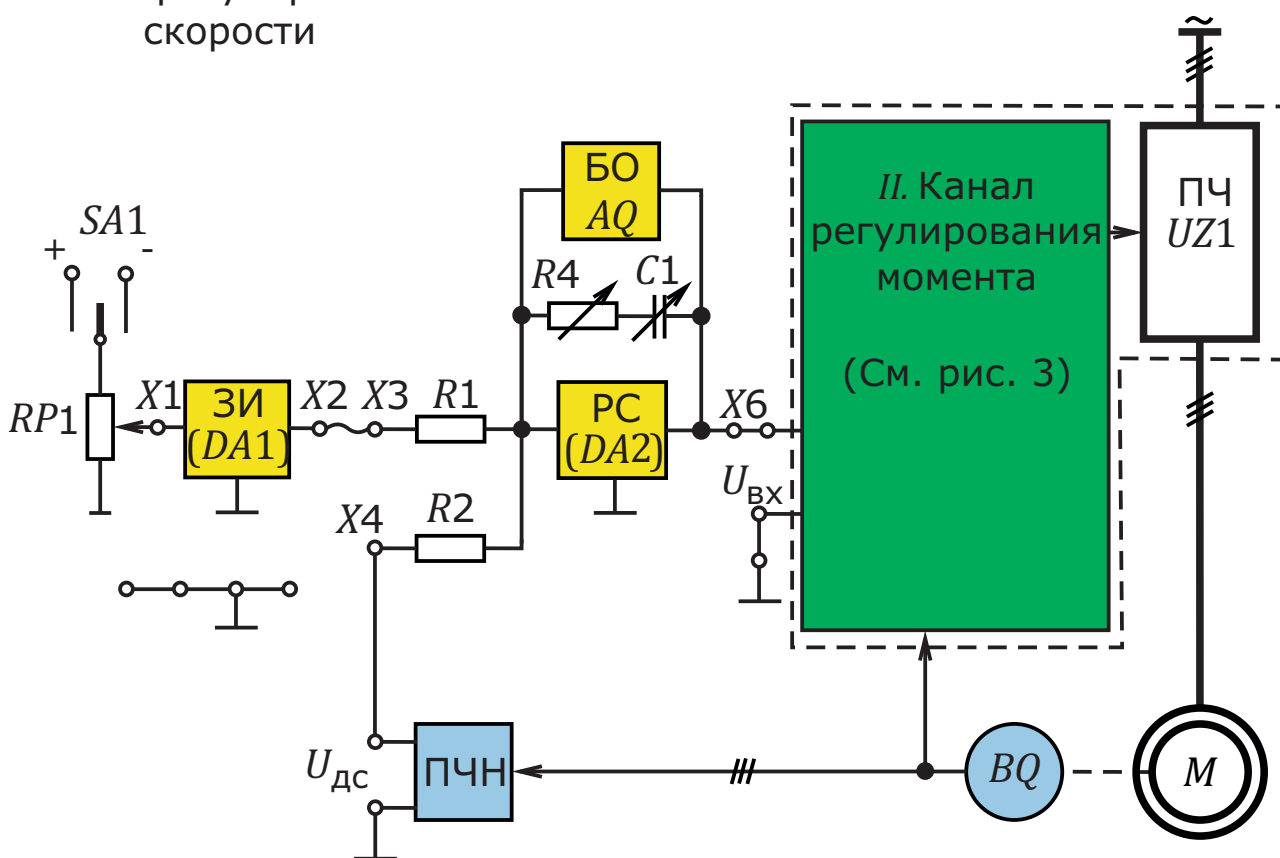


Рис. 6. Функциональная схема электропривода в режиме поддержания скорости

Как безопасно снять экспериментальную переходную функцию контура регулирования скорости?

3.3. Настроить узел ограничения максимального момента электропривода, для чего:

- установить в режиме холостого хода скорость электродвигателя равной $(0,4 - 0,5) \cdot n_H$;

- переключателем $SA3$ выбрать максимальное значение уставки блока ограничения AQ ;

- с помощью нагрузочной машины установить момент нагрузки, заданный преподавателем (как правило, задают $M_{\text{МАКС}} \approx 1,2 \cdot M_{\text{Н}}$);
- постепенно снижая уставку блока ограничения AQ переключателем $SA3$, зафиксировать режим, когда скорость двигателя начнет резко падать.

4. Экспериментальное исследование электропривода

4.1. В настроенной системе электропривода при фиксированном значении момента статической нагрузки $M_C = \text{const}$ (величина его задается преподавателем), изменяя только сигнал задания скорости $U_{\text{ВХ}}$, экспериментально снять следующие статические характеристики электропривода:

- скорости двигателя $n = f(U_{\text{ВХ}})$.
- тока статора электродвигателя $I_C = f(U_{\text{ВХ}})$;
- напряжения на статоре двигателя $U_C = f(U_{\text{ВХ}})$;
- напряжения на выходе регуляторов $U_{\text{РТ}\mu} = f(U_{\text{ВХ}})$,
 $U_{\text{РС}} = f(U_{\text{ВХ}})$;
- напряжения звена постоянного тока преобразователя $U_d = f(U_{\text{ВХ}})$;

4.2. При тех же условиях опыта снять энергетические характеристики электропривода:

- активной мощности, потребляемой из сети, $P = f(M)$;
- полной мощности, потребляемой из сети, $S = f(n)$;
- реактивной мощности, потребляемой из сети, $Q = f(n)$;
- механической мощности на валу двигателя $P_{\text{В}} = f(n)$.

4.3. По результатам предыдущего пункта рассчитать и построить энергетические характеристики электропривода:

- КПД электропривода от скорости;
- коэффициента мощности от скорости.

4.4. В настроенной системе электропривода при неизменном напряжении задания, соответствующем скорости холостого хода двигателя, заданной преподавателем, экспериментально снять в функции момента на валу двигателя следующие статические характеристики электропривода:

- скорости двигателя $n = f(M)$. (механическую характеристику электропривода);
- тока, потребляемого электроприводом из сети, $I_C = f(M)$;
- тока фазы статора двигателя $I_{\phi} = f(M)$;

- напряжения (фазного) на статоре двигателя $U_{\phi} = f(M)$;
- напряжения на выходе регулятора скорости $U_{PC} = f(M)$;

4.5. При тех же условиях опыта снять энергетические характеристики электропривода:

- активной мощности, потребляемой из сети, $P_C = f(M)$;
- полной мощности, потребляемой из сети, $S_C = f(n)$;
- реактивной мощности, потребляемой из сети, $Q_C = f(n)$;
- механической мощности на валу двигателя, $P_C = f(n)$;

4.6. По результатам предыдущего пункта рассчитать и построить энергетические характеристики электропривода:

- КПД электропривода от скорости;
- коэффициента мощности от скорости.

4.7. Для двух точек статических характеристик на участке поддержания заданного значения скорости электропривода (см. п. 4.4) построить векторные диаграммы токов двигателя в соответствии с векторным уравнением $I_1 + I_2' = I_{\mu}$, где I_1 - вектор тока в обмотке статора; I_2' - вектор тока ротора, приведенный к обмотке статора; I_{μ} - вектор намагничивающего тока.

Для сравниваемых состояний электропривода:

- сопоставить величины: а) площадей моментных треугольников, ограниченных векторами I_1 , I_2' , и I_{μ} ; б) электромагнитного момента $M_{ЭМ}$; в) момента M на валу электродвигателя:

- сопоставить величины: а) токов I_{μ} ; б) **ЭДС** статорных обмоток.

- вычислить и сопоставить: а) величины $\cos\varphi_{АД}$ - коэффициента мощности на зажимах статора двигателя, вычисленного на основании векторной диаграммы токов статора и б) величины $\cos\varphi_{ЭП}$ - коэффициента мощности электропривода, измеряемого на статоре переменного тока преобразователя частоты измерителем мощности (модуль АЗ). Почему столь существенно отличаются величины этих коэффициентов мощностей?

4.8. Для двух точек статических характеристик, анализируемых в п. 4.7, но взятых на участке ограничения момента, построить те же векторные диаграммы и выполнить те же сопоставления. Объяснить, почему результаты сопоставлений по п. 4.7 и п. 4.8 столь существенно отличаются друг от друга.

4.9. Установить сигналом задания при $M_C = 0$ постоянную скорость электропривода (величина задается преподавателем). С помощью осциллографа снять осциллограммы в установившемся режиме работы электропривода: напряжения на статор-

ной обмотке двигателя $U_{\Phi} = f(t)$, тока статора $I_{\Phi} = f(t)$. Увеличить момент статической нагрузки M_C до значения, соответствующего п. 4.1 и установить прежнее значение скорости электропривода. Снять те же осциллограммы $U_{\Phi} = f(t)$ и $I_{\Phi} = f(t)$. Дать сравнительный анализ осциллограмм, объяснив причины изменения амплитуд на кривых U_{Φ} и I_{Φ} при изменении момента статической нагрузки M_C .

Измерить частоту, а также амплитуду U_{Φ} и I_{Φ} в долях от их номинальных напряжений и токов двигателя.

4.10. В настроенной системе электропривода снять осциллограммы разгона электропривода на холостом ходу до скорости, соответствующей сигналу задания в п. 4.4:

- напряжения на выходе датчика интенсивности $U_{ЗИ} = f(t)$;

- тока статора двигателя $I_{\Phi} = f(t)$ (по огибающей);

- скорости вращения двигателя $n = f(t)$.

Обработав осциллограммы, указать показатели процесса:

I_M - максимальное значение тока статора при разгоне, $t_{пп}$ - время переходного процесса разгона электропривода.

4.11. В настроенной системе электропривода снять осциллограммы переходных процессов, вызванных скачкообразным приложением момента статической нагрузки:

- тока статора двигателя $I_{\Phi} = f(t)$ (по огибающей);

- скорости вращения двигателя $n = f(t)$.

Величину момента статической нагрузки принять такой же, как в п.4.1, а величину сигнала задания – как в п. 4.4. Обработав осциллограммы, указать показатели процесса: Δn_D - динамическое падение скорости в переходном процессе; t_M - время достижения скоростью величины Δn_D ; $t_{пп}$ - время переходного процесса; I_M - максимальное значение тока статора во время процесса.

Контрольные вопросы

1. Перечислите основные функциональные узлы электропривода и их назначение.

2. Изложите последовательность включения и отключения лабораторного стенда.

3. Укажите мероприятия, позволяющие исключить аварийные режимы при включении и отключении

электропривода

4. Чем токи i_A , i_B , i_C отличаются от токов I_W и I_μ ?
5. С какой целью статическая характеристика регулятора скорости выполнена с насыщением?
6. Как определить знак обратной связи по скорости?
7. Какие показатели процесса нужно обеспечить при настройке контура регулирования скорости?
8. Как экспериментально на стенде проверить величину постоянной времени И-канала в регуляторе скорости?
9. Как измерить в одной точке статической характеристики величину полной мощности S , потребляемой из сети, механической мощности P_B на валу двигателя?
10. Как рассчитать (в одной точке) величину КПД электропривода?

АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД НА БАЗЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ *UNIDRIVE SP*

Цель работы: 1. Ознакомиться со структурой и функциональной схемой, принципом работы и особенностями наладки типового частотнорегулируемого асинхронного электропривода.

2. Изучить регулировочные, энергетические и динамические характеристики асинхронного электропривода с разными структурами системы управления.

Функциональная схема электропривода

Силовые цепи

Исследуемый асинхронный электропривод выполнен на базе транзисторного преобразователя частоты *Unidrive SP* с управлением от программируемого микроконтроллера [6].

Трёхфазный асинхронный двигатель *M1* получает питание от транзисторного преобразователя частоты по схеме ([рис. 7](#)). Здесь напряжение питающей сети 380 В, которое берётся с нижних губок вводного автоматического выключателя *QF* (на правой боковой стенке стенда) через клеммы *A, B, C*, (модуль *A1* «Модуль питания»), контактор *KM1* (включается кнопкой *SB1.1*) подаётся на входные клеммы *L1, L2, L3* преобразователя частоты *UZ1* (модуль *A6*) контактором *KM2* (модуль *A2*).

Конструктивной особенностью данного стенда является наличие двух преобразователей частоты *Unidrive SP*, соединённых по звену постоянного тока, что позволяет реализовать структуру преобразователя как с неуправляемым выпрямителем на входе, так и с управляемым (активным). В первом случае питание подается только на первый преобразователь *UZ1* через контактор *KM2*, в этом случае реализуется типовая схема с неуправляемым выпрямителем на входе и автономным инвертором на выходе. Во втором случае питание подается через контактор *KM4* и согласующие реакторы *L* также на автономный инвертор второго преобразователя *UZ2* (модуль *A7*). Это позволяет реализовать схему с рекуперацией электрической энергии в сеть.

Выходные клеммы *U, V, W* автономного инвертора подключаются к клеммам *A1, B1, C1* обмотки статора асинхронного двигателя (модуль *A5*): первые две фазы – непосредственно, а третья – через входные (силовые) клеммы *X3* и *X4* датчика тока

ДТ5 (модуль A11). Обмотка статора соединена в трёхфазную звезду, поэтому клеммы $A2$, $B2$, $C2$ между собой закорочены, образуя общую точку. Кольца обмотки ротора асинхронного двигателя выведены на клеммы $X1$, $X2$, $X3$ и между собой закорочены, т.е. асинхронный двигатель с фазным ротором работает как короткозамкнутый.

Силовые цепи преобразователя частоты показаны на схеме ([рис. 2](#)).

Для исследования тормозных режимов в электроприводе необходимо подключить внешний тормозной резистор к силовым клеммам BR и $+DC$ преобразователя частоты. Этот резистор представляет собой последовательное соединение резисторов $RQ1$, $RQ2$, $RQ3$, расположенных на модуле A5 "Асинхронный двигатель".

Система управления

На базе преобразователей *Unidrive SP* можно реализовать несколько структур системы управления ([СУ](#)) синхронными и асинхронными электроприводами. В учебной лаборатории электропривода в процессе изучения курса [СУЭП](#) рассматриваются [СУ](#) моментом и скоростью асинхронного электропривода.

Функциональная схема [СУ](#) лабораторного электропривода на базе *Unidrive SP* изображена на [рис. 8](#) и включает в себя канал регулирования скорости, канал регулирования момента и силовые цепи.

В канале регулирования скорости сигнал n_z , соответствующий заданной установившейся скорости электропривода, через фильтр $\Phi 1$ поступает на вход задатчика интенсивности [ЗИ](#), в котором происходит установка заданных величин ускорения и замедления. Выходной сигнал [ЗИ](#) $n_{зи}$ подается на первый вход регулятора скорости [РС](#), где сравнивается с сигналом обратной связи по скорости n , который формируется на выходе модуля p . В блоке p сигнал с датчика положения BQ преобразуется в переменную n . Упрощенную работу блока p можно пояснить следующим образом: если считать, что на выходе датчика BQ формируется не серия импульсов, а непрерывный сигнал, пропорциональный положению ротора, то можно считать, что модуль p реализует простую функцию нахождения производной от входного сигнала. Сигнал на выходе [РС](#) можно ограничить максимальным значением, что на схеме условно показано блоком

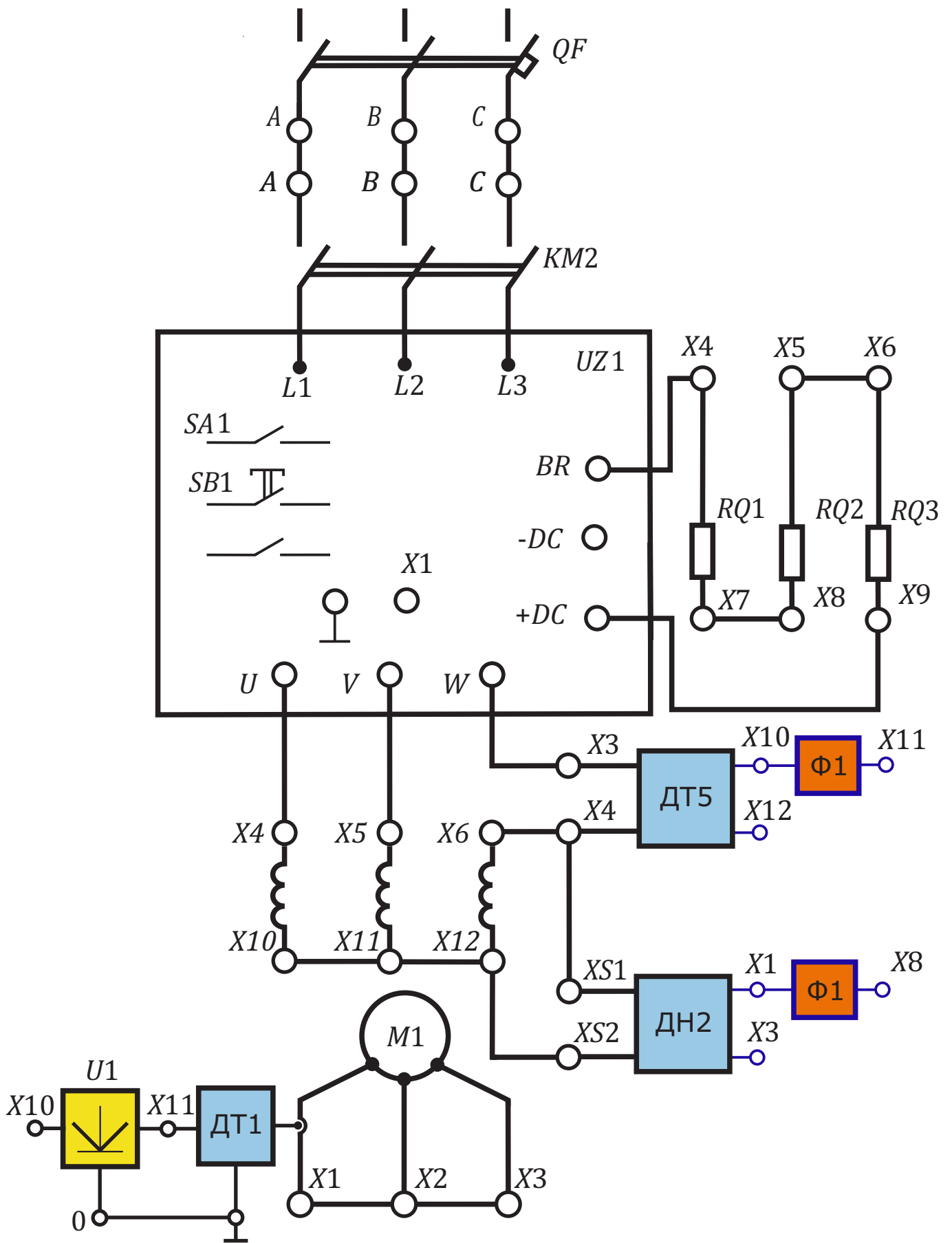


Рис. 7. Силовые цепи электропривода

ограничения **БО**. В "объекте" регулятора скорости независимо задаются параметры пропорционального и интегрального каналов.

Канал регулирования момента выполнен в соответствии с типовой схемой векторного регулирования момента, когда электромагнитный момент асинхронного электродвигателя формируется в ортогональной системе координат регуляторами PT_w и PT_μ "активной" и "реактивной" составляющих тока статора. Мгновенные значения фазных напряжений u_A, u_B, u_C и фазных токов i_A, i_B, i_C поступают на вход блока "**Модель АД**". На выходе модели АД после математических преобразований выделяется "активная" I_w и "реактивная" I_μ составляющие пространственного вектора тока статора.

С помощью регулятора тока PT_w обеспечивается поддержание "активной" составляющей тока статора. Для этого на его первый вход подается сигнал задания с выхода **РС** (когда электропривод работает как типовая схема подчиненного регулирования скорости) или от независимого источника задающего сигнала (когда электропривод работает в режиме самостоятельного источника момента). На второй вход регулятора тока подается сигнал отрицательной обратной связи по составляющей I_w тока статора.

Для задания необходимого значения "реактивной" составляющей I_μ в объекте **5.10** необходимо изменить значение коэффициента мощности двигателя, соответствующего требуемому значению тока I_μ .

В схеме управления совпадают параметры обоих регуляторов тока. Например, при установке параметров регулятора PT_w программа принудительно устанавливает такие же параметры в регуляторе PT_μ и наоборот.

Заметим, что все элементы **СУЭП** представлены в виртуальной форме, т.е. существуют в виде отдельных блоков системного программного обеспечения, реализованных в микроконтроллере, а не в виде узлов реальной конструкции. Прикладное программное обеспечение СТ-soft позволяет выводить на экран монитора и наблюдать изменение во времени промежуточных переменных системы управления, что на функциональной схеме (**см. рис. 8**) показано стрелками, исходящими из точек ветвления соответствующих каналов. Связь ЭВМ и ПЧ аппаратно организована по последовательному интерфейсу через адаптер

(коммуникационный процессор) ModbusRTU/USB. Интерфейс Modbus RTU встроен в модуль преобразователя частоты Unidrive SP. При изменении значений или чтении "объектов" (в технической документации "объекты" называют параметрами, что не всегда верно, так как там кроме параметров могут храниться переменные) преобразователя частоты сеть Modbus RTU работает в ациклическом режиме. ЭВМ подключается к коммуникационному процессору Modbus RTU/USB к интерфейсному разъему USB.

На [рис. 8](#) горизонтальная черта, в которую упирается стрелка, указывает номер "объекта", которому в программе соответствует наблюдаемая переменная. Например, стрелка, исходящая из канала $n_{зи}$, показывает, что сигнал $n_{зи}$ прочитан в "объекте" **3.24**.

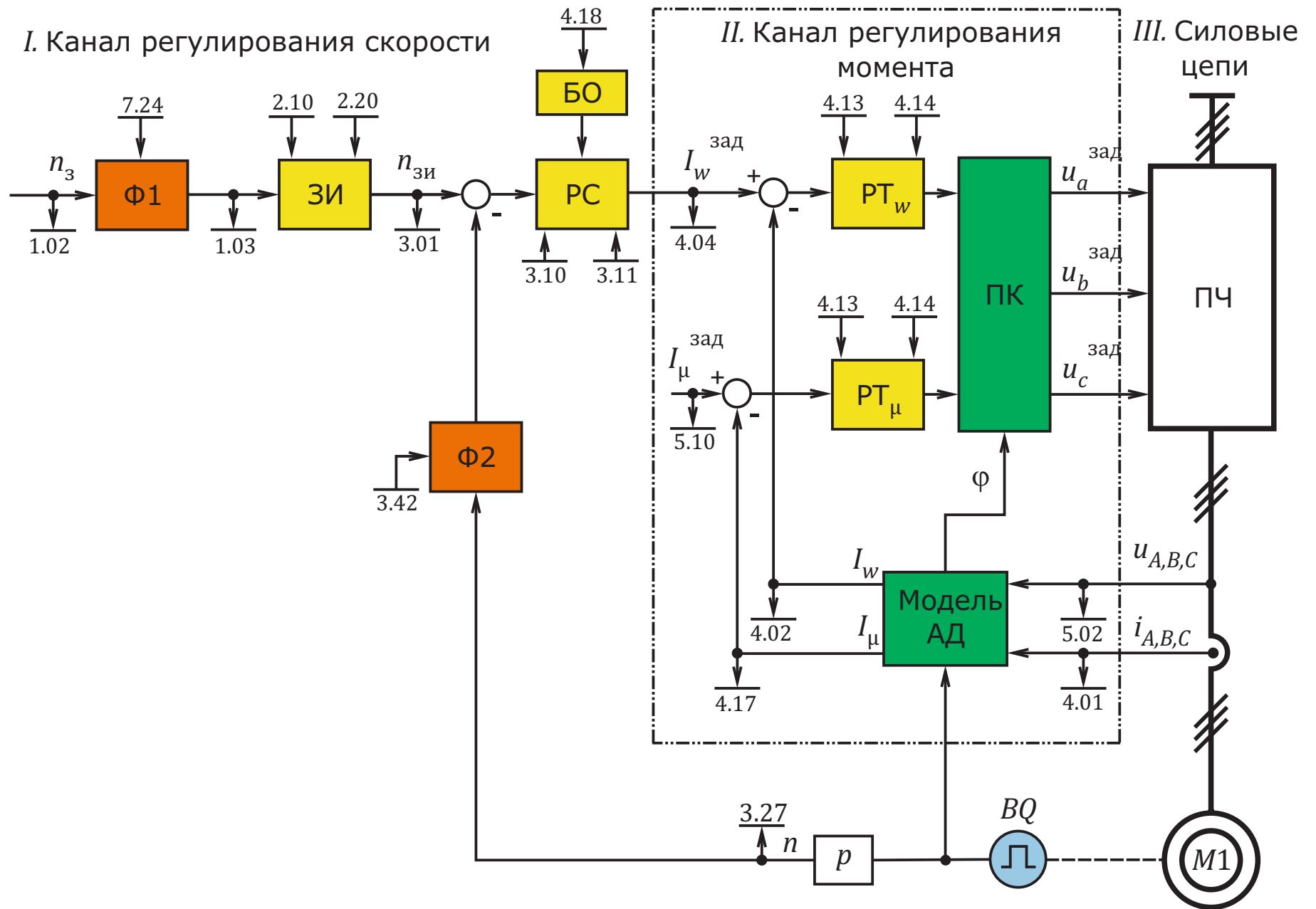


Рис. 8. Функциональная схема системы управления

Исследование электропривода в режиме источника момента

1. Предварительные расчёты

В исходной расчётной точке режима, принятого за базовый, переменные, характеризующие состояние двигателя, имеют следующие значения: напряжение на обмотке статора за вычетом падения напряжения на этой обмотке (**ЭДС** первичной обмотки) $E_1=140$ В; частота напряжения на статоре $f_1=200$ рад/с; действующее значение тока фазы статора $I_1=10$ А; косинус временного угла сдвига между векторами E_1 и I_1 $\cos\varphi = 0,7$; скольжение в расчётной точке $s = 5\%$; угол φ_2 между векторами E_2 и I_2 примерно равен нулю. Требуется:

1.1. Для базового режима построить векторный треугольник токов в соответствии с уравнением $I_1 + I_2' = I_\mu$; где I_1 , I_2' , I_μ – векторы тока статора, ротора (приведенный) и намагничивания;

1.2. Определить значение электромагнитного момента в исходной точке, принимаемое за номинальное.

1.3. Переменные, характеризующие состояние двигателя в исходной точке, принять за базовые значения.

1.4. Построить в относительных единицах в зависимости от угловой скорости n двигателя при постоянном моменте, равном базовому значению, следующие графики: $M = f(n)$; $E_1 = f(n)$;

$I_1 = f(n)$; $I_\mu = f(n)$; $I_W = f(n)$; $\cos\varphi_1 = f(n)$. Принять $Z_1 \approx 0$.

1.5. Повторить те же статические характеристики при работе электропривода в режиме поддержания момента в электроприводе $M = 0,5M_{\text{БАЗ}}$. Считать, что поддерживается постоянный магнитный поток двигателя $\Phi = \Phi_{\text{БАЗ}}$, сопротивление обмоток статора $Z_1 \approx 0$.

1.6. Повторить те же характеристики для режима идеально-го холостого хода двигателя. Магнитный поток по-прежнему считать постоянным.

1.7. Задавая электроприводе режим поддержания скорости $n = n_{\text{БАЗ}}$, рассчитать и построить при изменении момента графики следующих зависимостей $n = f(M)$; $E_1 = f(M)$; $I_1 = f(M)$; $I_\mu = f(M)$; $I_W = f(M)$.

1.8. Повторить те же зависимости при работе в режиме поддержания пониженной скорости при $n = 0,5n_{\text{БАЗ}}$.

1.9. На всех характеристиках, соответствующих пунктам 1.4...1.8, выделить точки, соответствующие:

- а) базовому режиму;
- б) режиму работы электропривода на упор.

2. Подготовка стенда к работе

2.1. Собрать схему соединений в соответствии с функциональной схемой ([см. рис. 7](#)). Неразъёмные клеммы подключены заранее. Разъёмные клеммы следует соединить гибкими проводниками.

2.2. Собрать схему источника задающего сигнала момента. Задающий сигнал I_w^{3AD} следует взять с выхода датчика интенсивности $DA1$ (клемма $X2$ на модуле $A13$) и регулировать его величину потенциометром $RP1$ на том же модуле $A13$ ([см. рис. 9](#)). Сигнал задания момента следует брать с выхода потенциометра $RP1$ (клемма $X1$). Клемму $X2$ на модуле $A13$ следует соединить с клеммой $X1$ на преобразователе частоты (модуль $A6$), а клемму «0» («общая точка») соединить с аналогичной клеммой на модуле $A6$.

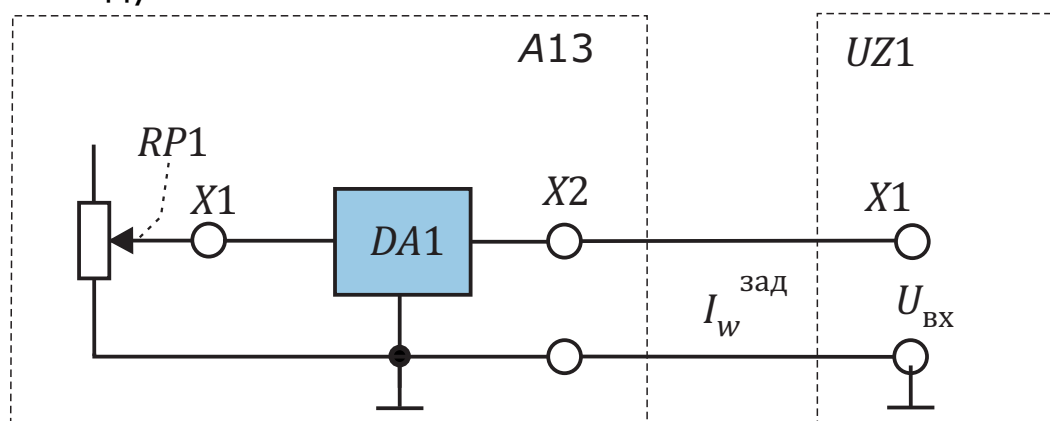


Рис. 9. Схема подключения сигналов I_w^{3AD}

Программным путем, выбрав параметр **5.10** в преобразователе $UZ1$ (модуль $A6$), установить косинус угла сдвига между фазными напряжением и током $\cos\varphi = 0,7$. Тем самым автоматически будет установлена требуемая величина составляющей тока $I_\mu^{зад}$.

При желании реальную величину тока I_μ можно наблюдать, выбрав параметр **4.17**.

2.3. Подключить питание преобразователя нагрузочной машины *Mentor 2*. Для этого подключить его входные клеммы

$L1, L2, L3$ (модуль $A8$) к клеммам A, B, C (модуль $A2$) напряжения питающей сети.

3. Подключение электропривода

3.1. Подать на стенд напряжение внешней сети 380 В автоматом QF (на правой боковой стенке шкафа).

3.2. Включить кнопкой $SB1.1$ контактор $KM1$ (модуль $A1$). Тем самым подаётся напряжение на цепи управления и будут готовы к работе силовые цепи.

3.3. Подключить нагрузочную машину. Для этого:

– на модуле $A4$ “Нагрузочная машина” переключатель $SA1$ поставить в нижнее положение, тем самым будет задан режим поддержания скорости нагрузочной машины;

убедиться, что переключатель $SA2$ находится в положении $M2$. **Внимание! В ходе лабораторной работы переключать тумблер $SA2$ категорически запрещено!**

– переключатель $SA3$ поставить в верхнее положение “Вперёд”, тем самым задать направление вращения нагрузочной машины. Потенциометр $RP1$, задающий величину скорости (или момента) нагрузочной машины, поставить в минимальное положение (крайнее против часовой стрелки);

3.4. Проверить работу нагрузочной машины, для чего:

– подать питание на силовые цепи преобразователя нагрузочной машины кнопкой $SB1.1$ (модуль $A1$);

– выбрать направление вращения нагрузочной машины (“Вперёд” или “Назад”) переключателем $SA3$ (модуль $A4$);

– плавным поворотом движка потенциометра $RP1$ (модуль $A4$) обеспечить плавное изменение угловой скорости вращения нагрузочной машины. **Не допускать** резких перемещений движка $RP1$ и тем более смены направления вращения нагрузочной машины переключателем $SA3$ без предварительного плавного снижения скорости до нуля;

– проверить работу нагрузочной машины для обоих направлений её вращения.

3.5. Подключить преобразователь частоты к питающей сети, для чего:

– переключатель $SA1$ преобразователя частоты (модуль $A6$) поставить в верхнее положение. Тем самым будет разрешена работа автономного инвертора в преобразователе частоты $UZ1$ (модуль $A6$);

3.6. Проверить работу аналоговых регуляторов $DA1$, $DA2$ (модуль $A13$). Для этого, пользуясь осциллографом, последовательно посмотреть характер изменения напряжений на клеммах $X1$, $X2$ и $X6$ при изменении уставок потенциометров $RP1$, $SA3$.

4. Экспериментальное исследование электропривода

4.1. Собрать схему в соответствии с [рис. 7](#).

4.2. В настроенной системе электропривода, поддерживая момент $M = M_{\text{БАЗ}}$, экспериментально снять следующие статические характеристики: механическую характеристику, зависимости $U_1 = f(n)$, $I_1 = f(n)$, $I_\mu = f(n)$, $I_W = f(n)$; $I_2 = f(n)$. Скорость электропривода следует изменять с помощью нагрузочной машины от 0 до $+n_{\text{МАХ}}$. При этом переключатель $SA1$ (см. модуль $A4$) должен стоять в положении « ω ».

Уставки задания составляющих $I_\mu^{\text{ЗAD}}$, $I_W^{\text{ЗAD}}$ тока статора следует поддерживать постоянными. Величины этих уставок следует взять такими же, какие указаны для исходного режима на стадии предварительных расчётов.

Следующие переменные определяются расчетным путем: $\varphi_1 = \arctg(I_\mu/I_W)$; $I_2 = I_1 \cdot \cos\varphi_1$.

4.3. Поддерживая магнитный поток постоянным $\Phi = \Phi_{\text{БАЗ}}$, уменьшить электромагнитный момент двигателя в два раза до значения $M = 0,5M_{\text{БАЗ}}$. Повторить те же статические характеристики, которые указаны в п. 4.2.

4.4. Поддерживая магнитный поток двигателя постоянным, перевести электропривод в режим идеального холостого хода. Снять те же статические характеристики, поддерживая режим идеального холостого хода с помощью нагрузочной машины.

(Как можно убедиться в существовании режима идеального холостого хода?)

4.5. Задавая электромашинному агрегату с помощью нагрузочной машины режим поддержания постоянной скорости (переключатель $SA1$ (модуль $A4$) стоит в положении « ω »), экспериментально снять при поддержании $n = n_{\text{БАЗ}}$ следующие зависимости $n = f(M)$, $I_\mu = f(M)$, $E_1 = f(M)$, $I_1 = f(M)$, $I_W = f(M)$. Момент нагрузки изменять в диапазоне от $-M_{\text{МАХ}}$ до $+M_{\text{МАХ}}$. Принять $|M_{\text{МАХ}}| = 1,2M_{\text{БАЗ}}$.

4.6. Повторить те же характеристики при работе электропривода в режиме поддержания пониженной скорости $n = 0,5n_{\text{БАЗ}}$.

4.7. Для двух точек (одна соответствует двигательному режиму, другая – генераторному), указанных преподавателем, построить треугольник, образованный векторами потокосцеплений статора, ротора и результирующего вектора в зазоре электрической машины.

4.8. При работе электропривода в базовой точке снять осциллограммы фазного напряжения на статоре $U_{\Phi}(t)$ и фазного тока $I_{\Phi}(t)$.

4.9. Поддерживая неизменной скорость и уменьшив момент в два раза, снять те же осциллограммы.

4.10. Вернуться в исходную базовую точку, затем при неизменном моменте двигателя уменьшить скорость электропривода в два раза. Снова снять те же осциллограммы.

Сопоставить три серии осциллограмм по величине амплитуды напряжения и тока, по частоте, по сдвигу по фазе между синусоидами напряжения и тока.

4.11. Повторить работу электропривода в тех же точках и зафиксировать в каждом из названных трёх режимов величины токов I_W , I_{μ} определить для каждой точки амплитудные значения фазных токов и фазовый сдвиг между векторами напряжения и тока.

Исследование электропривода в режиме источника скорости

1. Предварительные расчеты

1.1. Воспользоваться численными значениями переменных, характеризующих базовый режим электропривода в режиме источника момента. Определить величину базового момента и принять это значение момента за номинальное.

1.2. Для режима поддержания скорости $n = n_{\text{БАЗ}}$ рассчитать и построить при изменении момента графики следующих зависимостей: скорости $n = f(M)$; ЭДС обмотки статора $E_1 = f(M)$; тока статора $I_1 = f(M)$; тока намагничивания (возбуждения) $I_{\mu} = f(M)$; активной составляющей тока $I_W = f(M)$; напряжения в звене постоянного тока $U_d = f(M)$. Величину момента изменять в диапазоне от $-1,2 \cdot M_{\text{Н}}$ до $+1,2 M_{\text{Н}}$.

1.3. Повторить те же зависимости при работе в режиме поддержания пониженной скорости при $n = 0,5 \cdot n_{\text{БАЗ}}$.

1.4. Ввести ограничение максимального момента двигателя на уровне $M_{\text{МАКС}} = 1,2 \cdot M_{\text{Н}}$.

1.5. Построить механическую характеристику электропривода $n = f(M)$, содержащую участки поддержания скорости и ограничения момента.

На характеристике выделить точки, соответствующие:

а) базовому режиму;

б) режиму работы электропривода на упор.

В этих точках найти численные значения следующих переменных: **ЭДС** обмотки статора E_1 , тока статора I_1 , тока намагничивания (возбуждения) I_{μ} , активной составляющей тока I_W , напряжения в звене постоянного тока U_d .

2. Подготовка стенда к работе и подключение электропривода

2.1. Собрать схему соединений в соответствии с функциональной схемой ([см. рис. 7](#)). Неразъемные клеммы подключены заранее. Разъемные клеммы следует соединить гибкими проводниками.

2.2. Подать на стенд напряжение внешней сети 380 В автоматом QF (на правой боковой стенке шкафа).

Включить тумблером модуль $A1$. Тем самым подаётся напряжение на цепи управления 5 В и будут готовы к работе силовые цепи.

2.3. Подключить нагрузочную машину, проверить её работу, подключить преобразователь частоты к питающей сети и проверить его работу.

Указанные процедуры выполнить в соответствии с рекомендациями, изложенными в разделе «Исследование электропривода в режиме источника момента».

2.4. Проверить работу аналоговых регуляторов **ЗИ** ($DA1$), **РС** ($DA2$) (модуль $A13$). Для этого с помощью цифрового осциллографа fluke 192В последовательно посмотреть характер изменения напряжений на клеммах $X1$, $X2$ и $X6$ при изменении уставок потенциометров $RP1$, $RP2$, а также при пользовании переключателями $SA1$, $SA2$, $SA3$ и $SA4$.

Убедиться в возможности изменения величины и знака напряжения на выходе потенциометра $RP1$, темпа на выходе датчика **ЗИ**, регулировки уставки блока ограничения.

Включить в работу преобразователь частоты в режиме векторного регулирования момента, для чего на модуле $A6$ переключатель $SA3$ поставить в верхнее положение.

3. Настройка системы электропривода

3.1. Определить знак подключения датчика скорости ко входу регулятора скорости **РС**. Для этого:

– собрать схему разомкнутого контура регулирования скорости (**см. рис. 10**) и выставить минимальный коэффициент усиления регулятора **РС** при закороченном конденсаторе $C1$;

– подать на вход $R1$ (клемма $X3$) с выхода датчика интенсивности **ЗИ** небольшой сигнал, достаточный для вращения двигателя со скоростью не выше $(0,1 - 0,2) \cdot n_n$. Из-за мягкой механической характеристики электропривода при работе только контура косвенного регулирования момента режим поддержания заданной скорости вращения двигателя может быть очень нестабильным;

– кратковременно подать сигнал $U_{дс}$ обратной связи по скорости с выхода преобразователя «частота-напряжение» **ПЧН** (модуль $A5$) на вход $R2$ (клемма $X4$) и определить её знак. Он

должен быть отрицательным. Если связь положительная, то следует поменять полярность сигнала $U_{дс}$, поступающего на вход $R2$ регулятора **PC**;

I. Канал регулирования скорости

III. Сеть 380 В

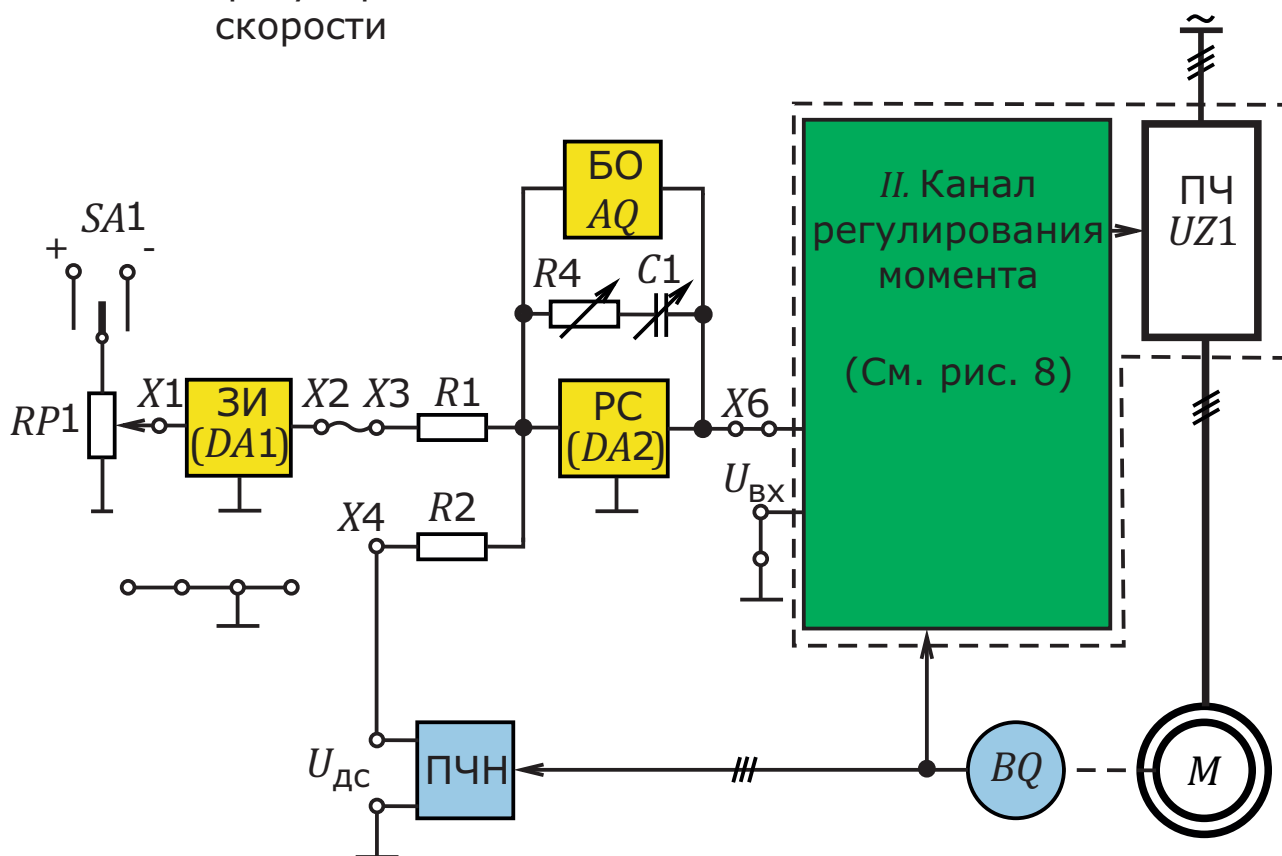


Рис. 10. Функциональная схема электропривода в режиме поддержания скорости

– замкнуть контур регулирования скорости.

3.2. Выбрать оптимальные значения параметров регулятора **PC** ($DA2$). Сначала следует настроить П-канал (выбором величины сопротивления $R4$ с помощью переключателя $SA2$), а потом –И-канал (выбором величины ёмкости конденсатора $C1$ с помощью переключателя $SA4$). Качество настройки следует оценивать по виду переходной функции замкнутого контура регулирования скорости.

Как безопасно снять экспериментальную переходную функцию контура регулирования скорости?

3.3. Настроить узел ограничения максимального момента электропривода, для чего:

– установить в режиме холостого хода скорость электродвигателя равной $(0,4 - 0,5) \cdot n_H$;

– переключателем $SA3$ выбрать максимальное значение уставки блока ограничения AQ ;

- с помощью нагрузочной машины установить момент нагрузки, заданный преподавателем (как правило, задают $M_{\text{МАКС}} \approx 1,2 \cdot M_{\text{Н}}$);
- постепенно снижая уставку блока ограничения AQ переключателем $SA3$, зафиксировать режим, когда скорость двигателя начнет резко падать.

4. Экспериментальное исследование электропривода

4.1. В настроенной системе электропривода при фиксированном значении момента статической нагрузки $M_c = \text{Const}$ (величина его задается преподавателем), изменяя только сигнал задания скорости $U_{\text{ВХ}}$, экспериментально снять следующие статические характеристики электропривода:

- скорости двигателя $n = f(U_{\text{ВХ}})$;
- тока статора электродвигателя $I_c = f(U_{\text{ВХ}})$;
- напряжения на статоре двигателя $U_c = f(U_{\text{ВХ}})$;
- напряжения на выходе регуляторов $U_{\text{РТ}\mu} = f(U_{\text{ВХ}})$,
 $U_{\text{РС}} = f(U_{\text{ВХ}})$;
- напряжения звена постоянного тока преобразователя $U_d = f(U_{\text{ВХ}})$;

4.2. При тех же условиях опыта снять энергетические характеристики электропривода:

- активной мощности, потребляемой из сети, $P = f(M)$;
- полной мощности, потребляемой из сети, $S = f(n)$;
- реактивной мощности, потребляемой из сети, $Q = f(n)$;
- механической мощности на валу двигателя $P_B = f(n)$.

4.3. По результатам предыдущего пункта рассчитать и построить энергетические характеристики электропривода:

- КПД электропривода от скорости;
- коэффициента мощности от скорости.

4.4. В настроенной системе электропривода при неизменном напряжении задания, соответствующем скорости холостого хода двигателя, заданной преподавателем, экспериментально снять в функции момента на валу двигателя следующие статические характеристики электропривода:

- скорости двигателя $n = f(M)$. (механическую характеристику электропривода);
- тока, потребляемого электроприводом из сети, $I_c = f(M)$;
- тока фазы статора двигателя $I_\phi = f(M)$;

- напряжения (фазного) на статоре двигателя $U_{\phi} = f(M)$;

- напряжения на выходе регулятора скорости $U_{PC} = f(M)$;

4.5. При тех же условиях опыта снять энергетические характеристики электропривода:

- активной мощности, потребляемой из сети, $P_C = f(M)$;

- полной мощности, потребляемой из сети, $S_C = f(n)$;

- реактивной мощности, потребляемой из сети, $Q_C = f(n)$;

- механической мощности на валу двигателя, $P_C = f(n)$.

4.6. По результатам предыдущего пункта рассчитать и построить энергетические характеристики электропривода:

- КПД электропривода от скорости;

- коэффициента мощности от скорости.

4.7. Для двух точек статических характеристик на участке поддержания заданного значения скорости электропривода (см. п. 4.4.) построить векторные диаграммы токов двигателя в соответствии с векторным уравнением $I_1 + I_2' = I_{\mu}$,

где I_1 - вектор тока в обмотке статора; I_2' - вектор тока ротора, приведенный к обмотке статора; I_{μ} - вектор намагничивающего тока.

Для сравниваемых состояний электропривода:

- сопоставить величины: а) площадей моментных треугольников, ограниченных векторами I_1 , I_2' , и I_{μ} ; б) электромагнитного момента $M_{ЭМ}$; в) момента M на валу электродвигателя:

- сопоставить величины: а) токов I_{μ} ; б) ЭДС статорных обмоток.

- вычислить и сопоставить: а) величины $\cos\varphi_{Ад}$ - коэффициента мощности на зажимах статора двигателя, вычисленного на основании векторной диаграммы токов статора и б) величины $\cos\varphi_{ЭП}$ - коэффициента мощности электропривода, измеряемого на сети переменного тока преобразователя частоты измерителем мощности (модуль АЗ). Почему столь существенно отличаются величины этих коэффициентов мощности?

4.8. Для двух точек статических характеристик, анализируемых в п. 4.7, но взятых на участке ограничения момента, построить те же векторные диаграммы и выполнить те же сопоставления. Объяснить, почему результаты сопоставлений по п. 4.7 и п. 4.8 столь существенно отличаются друг от друга.

4.9. Установить сигналом задания при $M_C = 0$ постоянную скорость электропривода (величина задается преподавателем).

С помощью осциллографа снять осциллограммы в установившемся режиме работы электропривода: напряжения на статорной обмотке двигателя $U_\phi = (t)$, тока статора $I_\phi = (t)$. Увеличить момент статической нагрузки M_c до значения, соответствующего п. 4.1. и установить прежнее значение скорости электропривода. Снять те же осциллограммы $U_\phi = (t)$ и $I_\phi = (t)$. Дать сравнительный анализ осциллограмм, объяснив причины изменения амплитуд на кривых U_ϕ и I_ϕ при изменении момента статической нагрузки M_c .

Измерить частоту, а также амплитуду U_ϕ и I_ϕ в долях от их номинальных напряжений и токов двигателя.

4.10. В настроенной системе электропривода снять осциллограммы разгона электропривода на холостом ходу до скорости, соответствующей сигналу задания в п. 1.7:

- напряжения на выходе задатчика интенсивности $U_{зи} = (t)$;

- тока статора двигателя $I_\phi = (t)$ (по огибающей);

- скорости вращения двигателя $n = f(t)$.

Обработав осциллограммы, указать показатели процесса: I_M - максимальное значение тока статора при разгоне, $t_{пп}$ - время переходного процесса разгона электропривода.

4.11. В настроенной системе электропривода снять осциллограммы переходных процессов, вызванных скачкообразным приложением момента статической нагрузки:

- тока статора двигателя $I_\phi = (t)$ (по огибающей);

- скорости вращения двигателя $n = f(t)$.

Величину момента статической нагрузки принять такой же, как в п.4.1, а величину сигнала задания – как в п. 4.4. Обработав осциллограммы, указать показатели процесса: Δn_d - динамическое падение скорости в переходном процессе; t_M - время достижения скоростью величины Δn_d ; $t_{пп}$ - время переходного процесса; I_M - максимальное значение тока статора во время процесса.

Исследование электропривода в режиме рекуперативного торможения

Особенности схемы силовых цепей лабораторного стенда

Чтобы преобразователь частоты мог работать в режиме рекуперативного торможения, необходимо подключать его к промышленной сети переменного напряжения через активный выпрямитель. Так как имеющиеся преобразователи частоты подключаются к сети только через неуправляемые выпрямители, то в учебной лаборатории режим работы преобразователя частоты с активным выпрямителем формируется искусственно с помощью двух преобразователей $UZ1$ и $UZ2$ ([см. рис. 11](#)). Здесь функцию активного выпрямителя выполняет автономный инвертор преобразователя $UZ2$, а инвертор преобразователя $UZ1$ непосредственно подключен к статорным цепям асинхронного двигателя $M1$. Преобразователи $UZ1$ и $UZ2$ гальванически связаны между собой по цепи постоянного тока. С учетом сказанного исходная схема силовых цепей ([см. рис. 7](#)) изменена. Силовые цепи дополнены контакторами $KM3$ и $KM4$, которые необходимы для питания преобразователя $UZ2$. В режиме рекуперативного торможения асинхронного электропривода напряжение питающей сети 380 В через автоматический выключатель QF (на правой боковой стенке стенда), клеммы A, B, C (модуль $A1$ «Модуль питания»), контактор $KM1$ (включается кнопкой $SB1.1$), модуль измерительный (модуль $A3$), контактор $KM4$ (модуль $A2$), токоограничивающие реакторы L подаётся на клеммы U, V, W преобразователя частоты $UZ2$ (модуль $A7$), который переведен в режим активного выпрямителя. Звено постоянного тока преобразователя $UZ2$ (клеммы $+DC, -DC$) объединяется со звеном постоянного тока преобразователя $UZ1$ (модуль $A6$). Далее выходные клеммы U, V, W преобразователя $UZ1$ подключаются к клеммам $A1, B1, C1$ обмотки статора асинхронного двигателя. Заметим, что при работе асинхронного электропривода в режиме рекуперативного торможения клеммы $L1, L2$ и $L3$ обоих преобразователей $UZ1$ и $UZ2$ оказываются незадействованными и отключёнными от питающей сети 380 В.

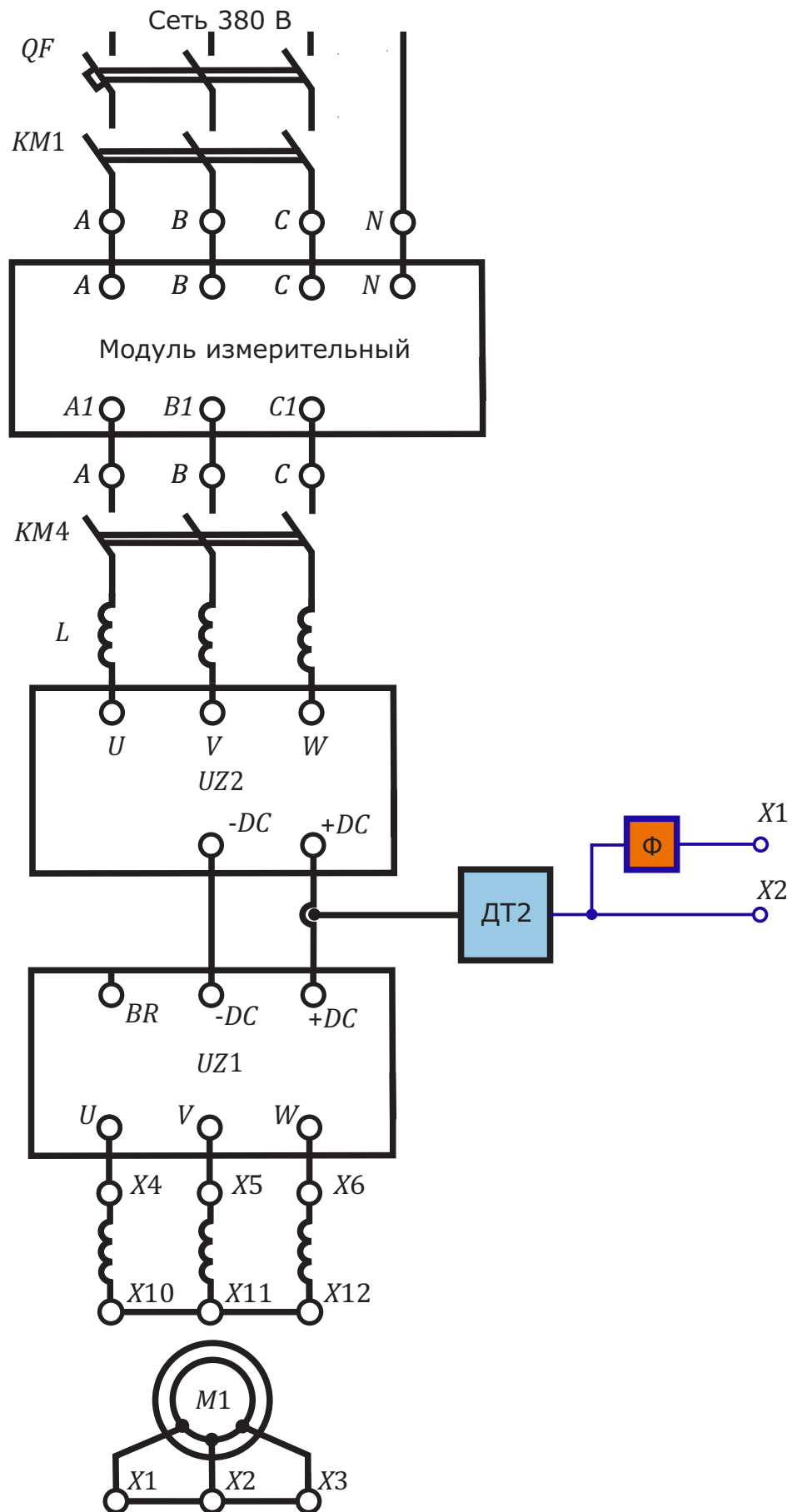


Рис. 11. Схема силовых цепей при работе электропривода в режиме рекуперативного торможения

Система управления активным выпрямителем

Функциональная схема системы управления (**СУ**) активным выпрямителем аналогична схеме (**рис. 8**) и изображена на **рис. 12**. Она включает в себя внешний контур регулирования напряжения звена постоянного тока и внутренний двухканальный контур регулирования тока, потребляемого (или отдаваемого) из сети.

Во внутреннем контуре регулирования тока мгновенные значения фазных напряжений u_A, u_B, u_C и фазных токов i_A, i_B, i_C поступают на вход блока «Преобразователь $abc/w\mu$ ». На выходе этого блока после математических преобразований выделяется активная I_w и реактивная I_μ составляющие пространственного вектора результирующего тока в первичной цепи активного выпрямителя AB . С помощью регулятора PT_w обеспечивается поддержание активной составляющей тока первичной цепи AB , а регулятором PT_μ – тока намагничивания. С помощью преобразователя координат **ПК** сигналы с выходов PT_w и PT_μ преобразуются в три сигнала, образующие трёхфазную симметричную систему управляющих воздействий.

Экспериментальное исследование электропривода

1. Выполнить подготовку стенда к работе и подключение электропривода в соответствии с программой, изложенной в разделе «Исследование электропривода в режиме источника скорости».

2. В настроенной системе электропривода при неизменном напряжении задания, соответствующем скорости холостого хода двигателя, заданной преподавателем, экспериментально снять в функции момента на валу двигателя следующие статические характеристики электропривода:

- скорости двигателя $n = f(M)$. (механическую характеристику электропривода);
- тока, потребляемого электроприводом из сети, $I_C = f(M)$;
- тока фазы статора двигателя $I_\phi = f(M)$;
- напряжения (фазного) на статоре двигателя $U_\phi = f(M)$;
- напряжения на выходе регулятора скорости $U_{PC} = f(M)$;

3. При тех же условиях опыта снять энергетические характеристики электропривода:

- активной мощности, потребляемой из сети, $P_C = f(M)$;

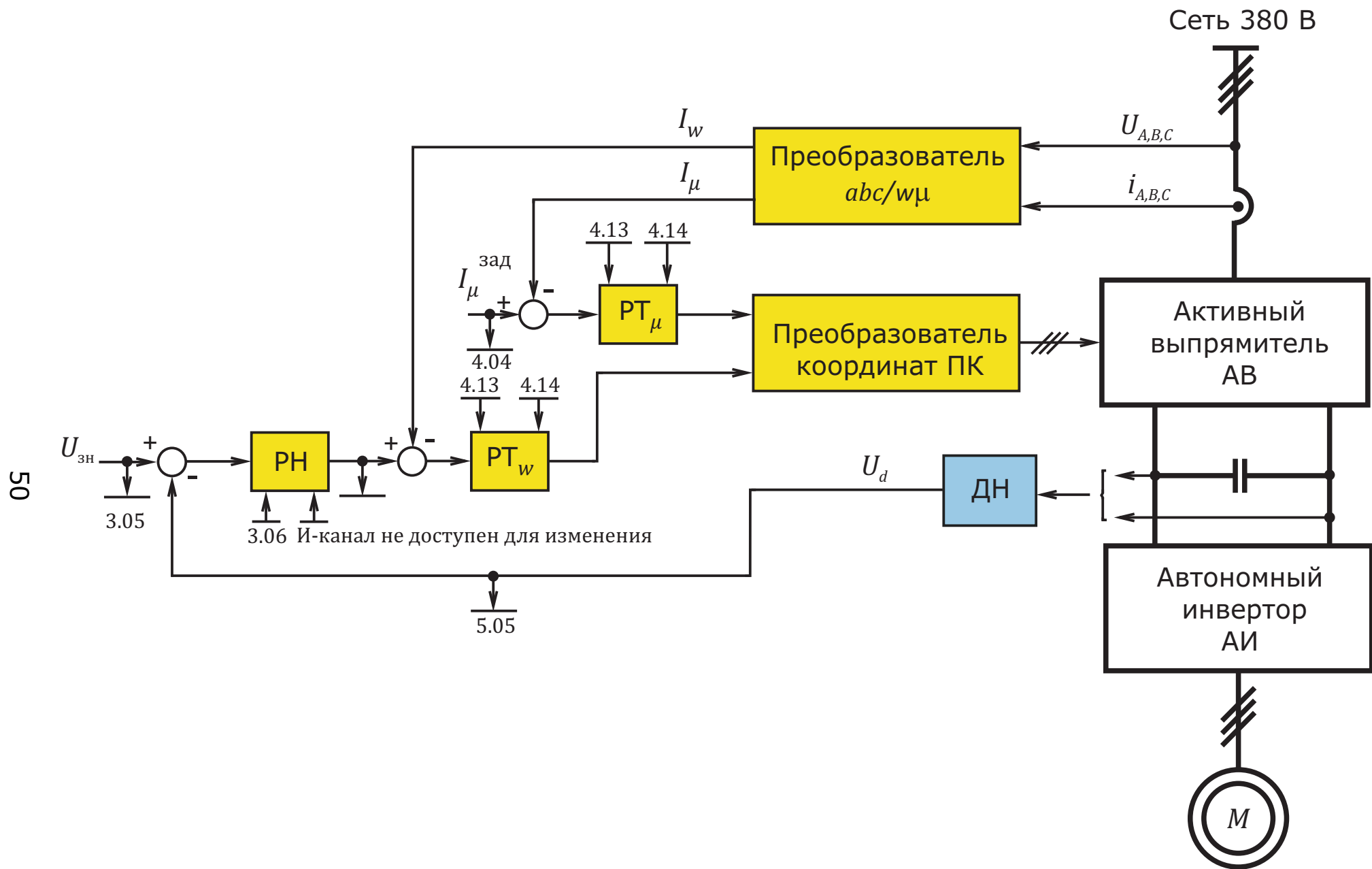


Рис. 12. Функциональная схема управления активным выпрямителем

- полной мощности, потребляемой из сети, $S_C = f(M)$;
- реактивной мощности, потребляемой из сети, $Q_C = f(M)$;
- механической мощности на валу двигателя, $P_C = f(M)$.

4. По результатам предыдущего пункта рассчитать и построить энергетические характеристики электропривода:

- КПД электропривода от момента;
- коэффициента мощности от момента.

Контрольные вопросы

1. Перечислите основные функциональные узлы электропривода и их назначение.

2. Изложите последовательность включения и отключения лабораторного стенда.

3. Укажите мероприятия, позволяющие исключить аварийные режимы при включении и отключении электропривода.

4. Чем токи i_A , i_B , i_C отличаются от токов I_W и I_μ ?

5. Как ограничить в схеме максимальное значение тока статора I_1 ?

6. Можно ли в схеме осуществить режим торможения; если можно, то как?

7. Как можно изменить величину максимального момента двигателя?

8. Как определить масштабы тока статора и напряжения на статоре при осциллографировании этих величин?

9. В чём заключается разница между результирующим вектором тока статора и изображающим вектором?

АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД НА БАЗЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ACS 800

Цель работы: 1. Ознакомиться со структурой и функциональной схемой, принципом работы и особенностями наладки типового частотнорегулируемого асинхронного электропривода.

2. Изучить регулировочные, энергетические и динамические характеристики асинхронного электропривода с разными структурами системы управления.

Принцип *DTC*-управления моментом

В конце прошлого века известная электротехническая фирма *ABB* сообщила о новом способе формирования момента в асинхронных электроприводах – *DTC*-управлении моментом (*Direct Torque Control* [8]), который в отечественной технической литературе обычно называют прямым управлением моментом [9,10].

Как и в других высококачественных системах регулирования асинхронных электроприводов, электропривод с *DTC*-регулированием выполнен по двухканальному принципу, поддерживая две независимые переменные: потокосцепление ψ и момент M .

В основе принципа работы асинхронного электропривода с *DTC*-регулированием, лежит управление движением вдоль расточки статора волны магнитного потока, который создаётся фазными токами. Полуволна этого потока может регулироваться по амплитуде и по скорости (т.е. по частоте). Как и принято в литературе [11], представим эту полуволну вектором ψ (см. рис. 13), имеющим регулируемые амплитуду ψ_m и угол поворота α . На величину амплитуды ψ воздействуют величиной фазных токов асинхронного двигателя, а на угол α – ча-

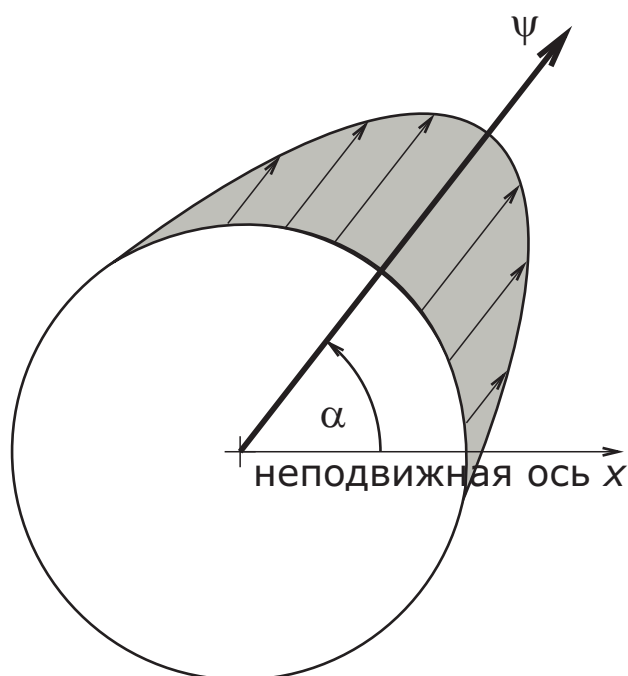


Рис. 13. Представление полуволны магнитного потока асинхронного двигателя пространственным вектором ψ

стотой этих же токов, образующих симметричную трехфазную систему. Если вектор ψ при вращении в ту же сторону, что и ротор асинхронного двигателя, «забегает вперед», то двигатель развивает положительный момент «вперед», при отставании – «назад». Принято считать [11], что поворот магнитного потока вдоль окружности расточки статора не требует (если не брать в расчёт индуктивности рассеяния обмоток) затрат энергии. По этой причине в рассматриваемом электроприводе регулирование момента, где желательно максимальное быстродействие, осуществляется поворотом вектора ψ , а регулирование потока – изменением амплитуды этого вектора.

В основу **DTC**-регулирования момента асинхронного двигателя АД положены следующие положения:

- система регулирования момента выполнена двухканальной, в качестве независимых параллельных каналов приняты каналы регулирования потокосцепления ψ и момента M . Желательные значения модуля $\psi_{\text{зад}}$ и $M_{\text{зад}}$ подаются на два входа системы регулирования момента или как внешние сигналы задания (при исследовании электропривода в режиме источника момента), или с выходов регуляторов внешних контуров регулирования (при исследовании электропривода в режиме источника скорости);

- так как датчиков прямого измерения потокосцепления ψ и электромагнитного момента M нет, то используют их оценки – вычисленные косвенно через измеряемые (наблюдаемые) переменные (фазные токи i_A, i_B, i_C и напряжения u_A, u_B, u_C) мгновенные значения потокосцепления и момента, полученные как результат решения уравнений состояния асинхронного двигателя. Эти уравнения помещены в отдельный вычислительный блок программы работы системы управления, обычно именуемый «Модель асинхронного двигателя АД»;

- обратные связи, как правило, выполняются по оценкам регулируемых переменных, а не по сигналам датчиков, непосредственно измеряющих эти переменные. В исследуемом электроприводе – это оценки потокосцепления (обозначено « $\hat{\psi}$ ») и момента (обозначено « \hat{M} »);

- в качестве управляющей переменной, непосредственно воздействующей на двигатель, принят пространственный вектор потокосцепления, текущее состояние которого однозначно определяется двумя переменными: амплитудой вектора ψ и его углом поворота α . Напомним, что пространственным вектором $\bar{\psi}$

обозначена волна магнитного потока синусоидальной формы, которая «бежит» вдоль окружности внутренней расточки статора и может изменяться по амплитуде и скорости перемещения;

– регуляторы потокосцепления и момента (точнее – оценок этих переменных) выполнены релейного типа. Регулятор потокосцепления выполняется двухпозиционным, регулятор момента – двух- или трехпозиционным. В статической характеристике регуляторов имеется петля гистерезиса, это позволяет добиться выполнения условий абсолютной устойчивости контуров регулирования. Напомним, что условие абсолютной устойчивости нелинейной системы регулирования допускает существование установившихся колебаний, но не более заданного значения [12]

Так как релейный регулятор имеет лишь два (или три) фиксированных состояния выходного сигнала, то система управления резко упрощается;

– известно [13], что качество замкнутой системы регулирования определяется точностью датчиков обратных связей и быстродействием контура. В таком случае вполне оправдан дискретный характер изменения выходной переменной релейного регулятора потокосцепления, воздействующего на амплитуду вектора ψ . По этой же причине принят и дискретный характер выходного сигнала регулятора момента, воздействующего на угол поворота вектора ψ : поворот вектора ψ по ходу движения принимается за положительный момент, против хода – за отрицательный.

В силу тех же обстоятельств нет необходимости точно определять угловое положение вектора ψ в текущий момент времени. Поэтому принято угловое положение вектора ψ вычислять с точностью до сектора 60° , т.е. при полном (электрическом) обороте вектора ψ получается шесть фиксированных приближенных ответов угла поворота α . Так как в схеме число возможных сочетаний выходных сигналов регуляторов равно шести (два в регуляторе потокосцепления и три в регуляторе момента), а число возможных фиксированных приближенных текущих угловых положений вектора ψ тоже шести, то возможное число дискретных управляющих сигналов равно 36, что для современной вычислительной техники является очень несложной задачей.

Функциональная схема электропривода

Силовые цепи

Исследуемый асинхронный электропривод выполнен на базе транзисторного преобразователя частоты ACS 800[7].

Трёхфазный асинхронный двигатель $M1$ получает питание от транзисторного преобразователя частоты ACS 800 по схеме ([рис. 14](#)). Здесь напряжение питающей сети 380 В, которое берётся с нижних губок вводного автоматического выключателя QF (на левой боковой стенке стенда), через клеммы A, B, C , (модуль $A1$ «Питание стенда»), автомат $QF1$, через клеммы $A1, B1, C1$ и через измеритель мощности (модуль $A2$), контактор $KM1$ (включается кнопкой «Пуск») и через клеммы $A3, B3, C3$ («Модуль питания» $A3$) подаётся на одноименные входные клеммы преобразователя частоты (модуль $A7$).

Выходные клеммы U, V, W автономного инвертора (модуль $A7$) подключаются к клеммам $X4, X5, X6$ (модуль $A8$) обмотки статора асинхронного двигателя: первые две фазы – непосредственно, а третья – через входные (силовые) клеммы $X3$ и $X4$ датчика тока ДТ5 (модуль $A4$). Обмотка статора соединена в трёхфазную звезду, поэтому клеммы $X7, X8, X9$ между собой закорочены, образуя общую точку. Кольца обмотки ротора асинхронного двигателя выведены на клеммы $X10, X11, X12$ и между собой закорочены, т.е. асинхронный двигатель с фазным ротором работает как короткозамкнутый.

Силовые цепи преобразователя частоты показаны на схеме ([рис. 2](#)).

Система управления

Функциональная схема двухканальной системы [DTC](#)-регулирования момента приведена на [рис. 15](#). Асинхронный двигатель MA подключен статорными обмотками к выходным клеммам преобразователя частоты [ПЧ](#).

Сигналы, пропорциональные мгновенным значениям фазных токов i_A, i_B, i_C и фазных напряжений u_A, u_B, u_C , поступают в систему управления электропривода и обрабатываются блоком вычислительной программы «[Модель АД](#)», который выделяет оценки переменных состояния двигателя $\hat{\psi}$ и \hat{M} и направляет их на входы регуляторов потокосцепления и момента навстречу

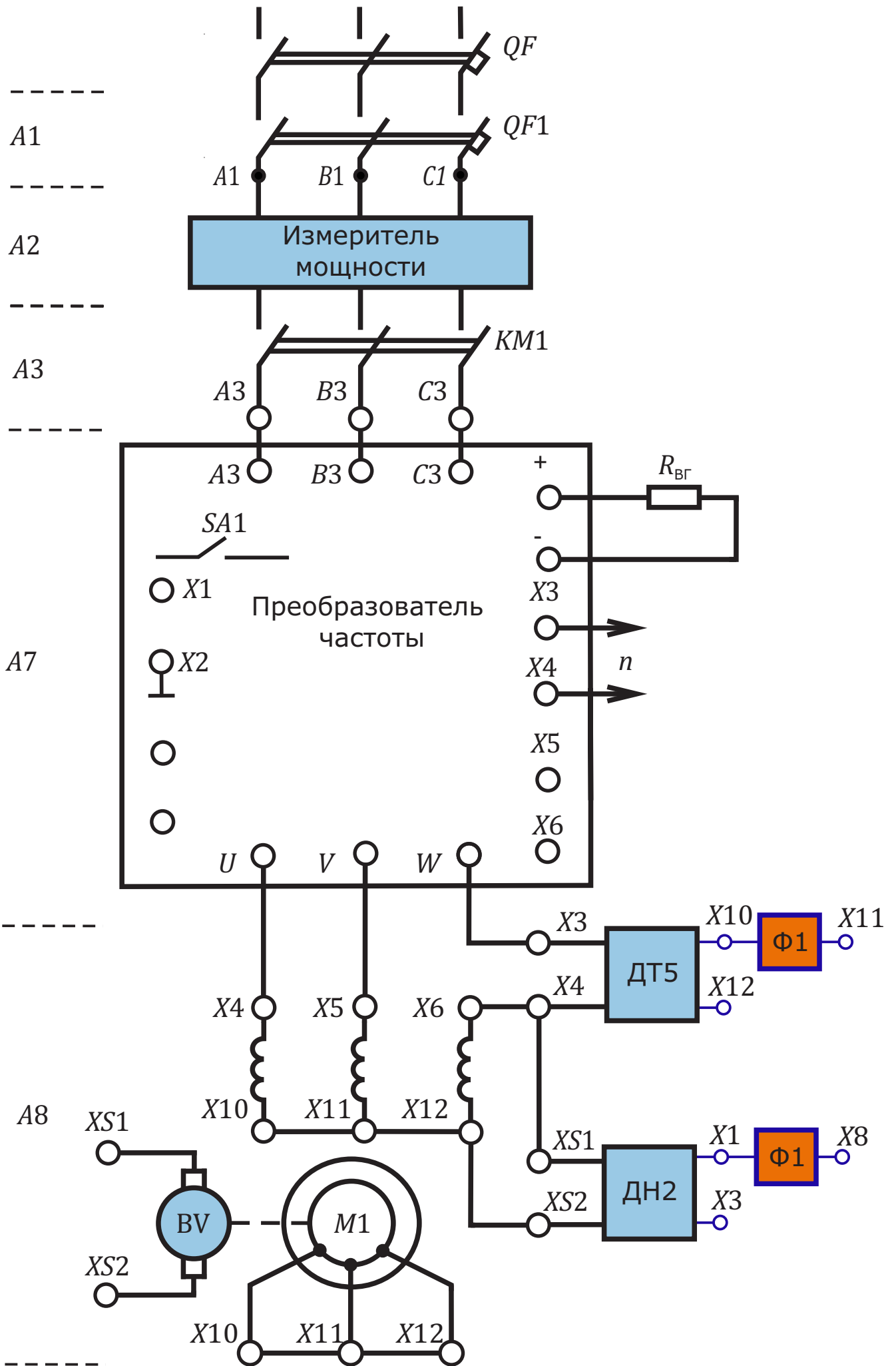


Рис. 14. Силовые цепи электропривода

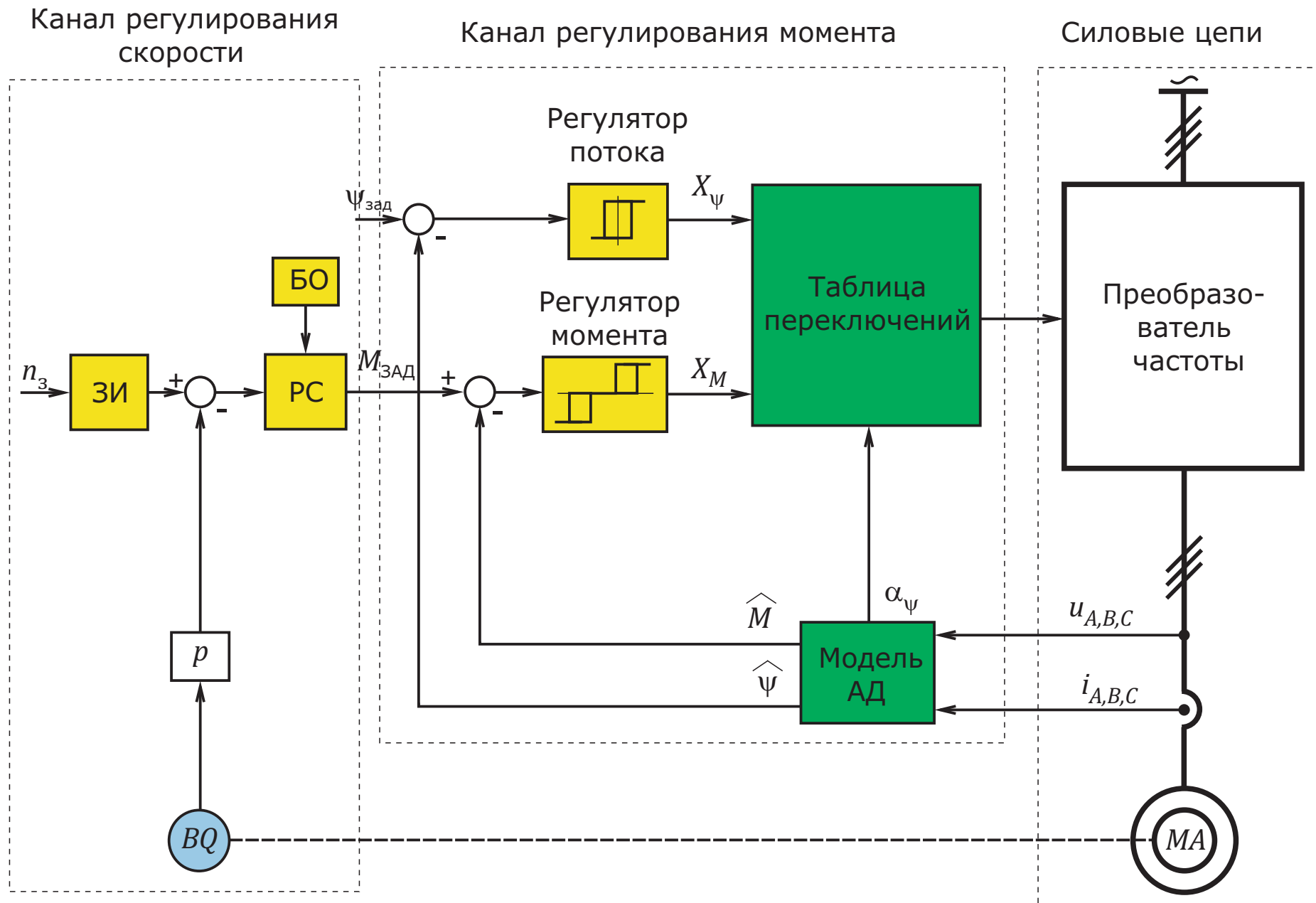


Рис. 15. Функциональная схема электропривода с DTC регулированием

задающим сигналам $\psi_{\text{зад}}$ и $M_{\text{ЗАД}}$. Кроме названных сигналов $\hat{\psi}$ и \hat{M} блок «Модель АД» вычисляет также мгновенные значения углового положения α вектора ψ . Так как требуемая точность определения (вычисления) угла α не превышает угловой ширины сектора 60° , то обычно на вход табличного определителя передается только номер сектора, в котором в данный момент времени находится вектор ψ . Номер сектора определяется по соотношению мгновенных величин и знаков фазных напряжений u_A, u_B, u_C .

Регуляторы потока ψ и момента M генерируют сигналы X_ψ и X_M , которые соответствуют желаемому направлению изменения приращения амплитуды и угла поворота вектора ψ . Релейная характеристика этих регуляторов, во-первых, способствует форсировке процессов в последующих звеньях прямого канала, повышая быстродействие системы электропривода, а во-вторых, резко упрощает логику работы последующих звеньев системы регулирования, ограничивая изменение их состояния лишь набором фиксированных значений.

Таблица переключений обрабатывает входные сигналы α_ψ , X_ψ и X_M . Сигнал α_ψ снимается с выхода «[Модели АД](#)» и указывает на текущее угловое положение вектора ψ . Так как угол поворота этого вектора задаётся с точностью до сектора 60° , то достаточно указать только номер сектора, которых на один оборот приходится шесть ([рис. 16](#)).

Сигналы X_ψ и X_M , снимаемые с выхода регуляторов и поступающие на вход звена «Таблица переключений», указывают, в каком направлении следует изменять вектор ψ .

Набор возможных состояний вектора ψ , задаваемых сигналом α_ψ и набор возможных команд, задаваемых сигналами X_ψ и X_M , оформлены в виде «Таблицы переключений» ([см. рис.17](#)). Здесь набор команд приведен в столбцах X_ψ и X_M , а набор состояний – в строке $\alpha_{1,\dots,6}$. Если требуется создать положительное приращение длины вектора ψ , то на выходе регулятора ψ ставится «+1», а если отрицательное, то – «-1». Аналогично на выходе регулятора M ставится «+1», если действие регулятора направлено на увеличение момента, ставится «-1», если нужно уменьшить момент, и «0», если разница между $M_{\text{ЗАД}}$ и M относительно мала и вектор ψ можно не изменять.

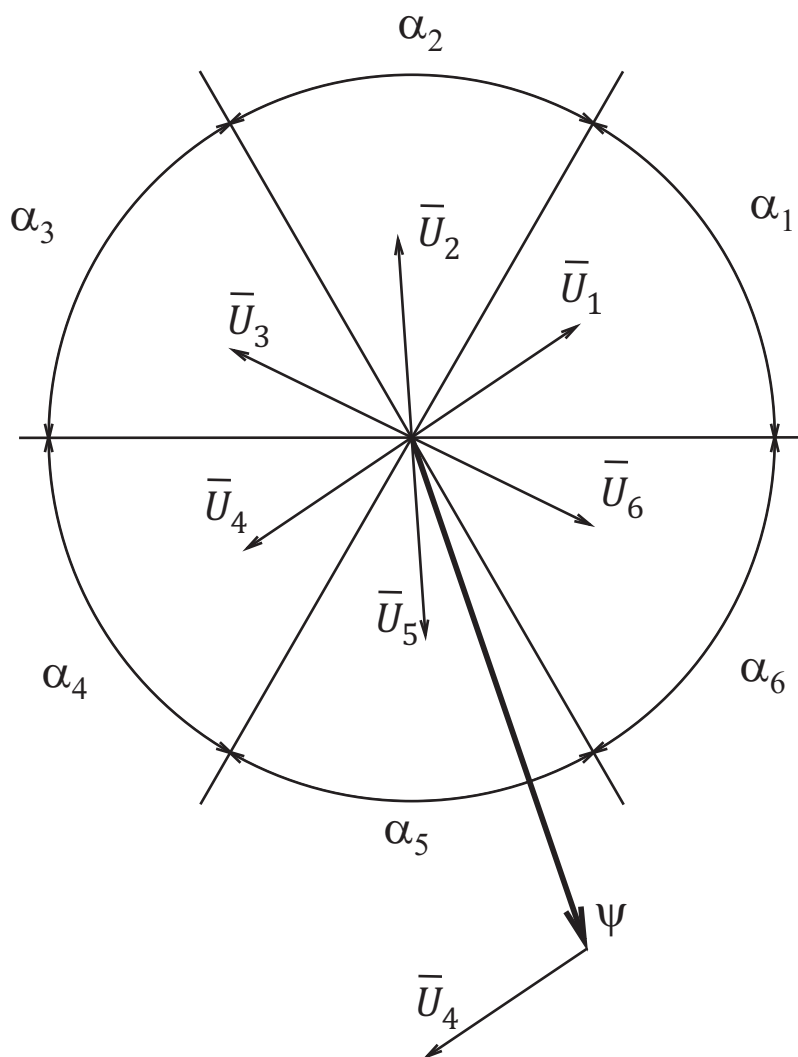


Рис. 16. Возможные пространственные положения вектора напряжения на статоре, номера секторов α и пример выбора направления приращения вектора ψ

Набор возможных значений угла поворота вектора ψ в текущий момент времени указан в горизонтальной строке $\alpha_1, \dots, \alpha_6$.

Нужное приращение $\Delta\psi$ вектора ψ в заданный момент времени находится из «Таблицы переключений» по месту расположения квадрата (клеточки таблицы), лежащего на пересечении строки выбранной регуляторами команды и столбца, соответствующего текущему угловому положению α вектора ψ .

Например, в какой-то момент времени показания регуляторов следующие: $X_\psi = +1$, $X_M = -1$, выходной сигнал α «Модели АД» соответствует сектору α_5 . В этом случае, как это следует из таблицы ([рис. 17](#)), приращение $\Delta\psi$ вектора потокосцепления ψ должно создаваться воздействием вектора напряжения на ста-

торе \bar{U}_4 . Для наглядности начало этого вектора на [рис. 16](#) перенесено в конец текущего положения вектора ψ .

Поясним, как реализуются в схеме приращения $\Delta\psi$ потокосцепления. Вектор \bar{U} напряжения на статоре двигателя связан с вектором $\bar{\psi}$ потокосцепления известным из курса ТОЭ соотношением:

$$\bar{U} \approx d\bar{\psi} / dt.$$

Заменяя бесконечно малые приращения переменных на малые конечные, соответствующие одному такту Δt частотно-широотно-импульсной модуляции цепи статора, получим

$$\Delta\bar{\psi} \approx \bar{U} \cdot \Delta t.$$

Набор команд		Набор состояний вектора ψ					
Выходной сигнал регулятора		Текущее положение вектора ψ , задаваемое номером сектора α					
X_ψ	X_M	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6
+1	+1	U_2	U_3	U_4	U_5	U_6	U_1
	0	0	0	0	0	0	0
	-1	U_6	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5
-1	+1	U_3	U_4	U_5	U_6	U_1	U_2
	0	0	0	0	0	0	0
	-1	U_5	U_6	U_1	U_2	U_3	U_4

Рис. 17. Таблица переключений вектора напряжения на статоре в зависимости от состояния регуляторов и текущего положения вектора ψ

Вектор \bar{U} характеризуется амплитудой U и фазой α . В электроприводе с [DTC](#)-регулированием амплитуда вектора \bar{U} принята постоянной, соответствующей полуторакратной амплитуде трёхфазного напряжения питающей сети. Конкретное значение фазы $\alpha_1, \dots, \alpha_6$ задаётся выбором сочетания включенных транзисторов автономного инвертора.

Прикладное программное обеспечение DriveWindow позволяет выводить на экран монитора и наблюдать изменение во времени промежуточных переменных системы управления. Связь ЭВМ и ПЧ аппаратно организована по последовательному интерфейсу через преобразователь оптоволоконной сети в USB. Интерфейсный модуль RDCO установлен в преобразователе частоты и формирует сигналы, которые передаются по оптоволоконному каналу. Оптоволоконная сеть организована по системе "кольцо". ЭВМ подключается к оптоволоконному преобразователю через интерфейсный разъем USB.

Исследование электропривода в режиме источника момента

1. Предварительные расчёты

В исходной расчётной точке режима, принятого за базовый, переменные, характеризующие состояние двигателя, имеют следующие значения: напряжение на обмотке статора за вычетом падения напряжения на этой обмотке (**ЭДС** первичной обмотки) $E_1 = 140$ В; частота напряжения на статоре $f_1 \approx 200$ рад/с; действующее значение тока фазы статора $I_1 = 10$ А; косинус временного угла сдвига между векторами E_1 и I_1 $\cos\varphi = 0,7$; скольжение в расчётной точке $s = 5\%$; угол φ_2 между векторами E_2 и I_2 примерно равен нулю.

Требуется:

1.1. Для базового режима построить векторный треугольник токов в соответствии с уравнением $I_1 + I_2' = I_\mu$; где I_1 , I_2' , I_μ – векторы тока статора, ротора (приведенный) и намагничивания;

1.2. Определить значение электромагнитного момента в базовом режиме.

1.3. Переменные, характеризующие состояние двигателя в этом режиме, принять за базовые значения.

1.4. Построить в относительных единицах в зависимости от угловой скорости n двигателя при постоянном моменте, равном базовому значению, следующие графики: $M = f(n)$; $E_1 = f(n)$; $I_1 = f(n)$; $I_\mu = f(n)$; $I_W = f(n)$; $\cos\varphi_1 = f(n)$. Принять $Z_1 \approx 0$.

1.5. Повторить те же статические характеристики при работе электропривода в режиме поддержания момента в электроприводе $M = 0,5M_{\text{БАЗ}}$. Считать, что поддерживается постоянный магнитный поток двигателя $\Phi = \Phi_{\text{БАЗ}}$, сопротивление обмоток статора $Z_1 \approx 0$.

1.6. Повторить те же характеристики для режима идеального холостого хода двигателя. Магнитный поток по-прежнему считать постоянным.

1.7. Задавая электроприводу режим поддержания скорости $n = n_{\text{БАЗ}}$, рассчитать и построить при изменении момента графики следующих зависимостей $n = f(M)$, $E_1 = f(M)$; $I_1 = f(M)$; $I_\mu = f(M)$; $I_W = f(M)$.

1.8. Повторить те же зависимости при работе в режиме поддержания пониженной скорости при $n = 0,5n_{\text{БАЗ}}$.

1.9. На всех характеристиках, соответствующих пунктам 1.4...1.8, выделить точки, соответствующие:

- а) базовому режиму;
- б) режиму работы электропривода на упор.

2. Подготовка стенда к работе

2.1. Собрать схему соединений в соответствии с функциональной схемой ([см. рис. 14](#)). Неразъёмные клеммы подключены заранее. Разъёмные клеммы следует соединить гибкими проводниками.

2.2. Собрать схему источника задающего сигнала момента. Задающий сигнал $\psi_{\text{ЗАД}}$ следует взять с выхода задатчика интенсивности $DA1$ (клемма $X2$ на модуле $A12$) и регулировать его величину потенциометром $RP1$ на том же модуле $A12$ ([см. рис. 15](#)). Сигнал задания момента $M_{\text{ЗАД}}$ следует брать с выхода потенциометра $RP1$ (клемма $X1$). Клемму $X2$ на модуле $A12$ следует соединить с клеммой $X1$ на преобразователе частоты (модуль $A7$), а клемму «0» («общая точка») соединить с аналогичной клеммой $X2$ на модуле $A7$.

Программным путем, выбрав параметр **99.05** в преобразователе $UZ1$ (модуль $A7$), установить косинус угла сдвига между фазными напряжением и током $\cos\varphi = 0,7$. Тем самым автоматически будет установлена требуемая величина составляющей тока $I_{\mu}^{\text{зад}}$.

При желании реальную величину тока I_W можно наблюдать, выбрав параметр **1.05**.

Подключить питание преобразователя нагрузочной машины *Mentor II*. Для этого подключить его входные клеммы $A1, B1, C1$ (модуль $A6$ «Питание нагрузочной машины») контакторам $KM2$ к питающей сети.

3. Подключение электропривода

3.1. Подать на стенд напряжение внешней сети 380 В автоматом QF (на левой боковой стенке шкафа).

3.2. Включить автомат $QF1$ модуль $A1$ «Питание стенда». Тем самым подаётся напряжение на цепи управления.

3.3. Подключить нагрузочную машину. Для этого:

– на модуле *A14* “Модуль нагрузочной машины” переключатель *SA1* поставить в нижнее положение, тем самым будет задан режим поддержания скорости нагрузочной машины;

– переключатель *SA2* поставить в верхнее положение. Тем самым будет получено разрешение на работу нагрузочной машины. **Внимание! В ходе лабораторной работы переключать тумблер *SA2* категорически запрещено!**

– переключатель *SA3* поставить в верхнее положение “Вперёд”, тем самым задать направление вращения нагрузочной машины. Потенциометр *RP1*, задающий величину скорости (или момента) нагрузочной машины, поставить в минимальное положение (крайнее против часовой стрелки);

3.4. Проверить работу нагрузочной машины, для чего:

– подать питание на силовые цепи преобразователя нагрузочной машины кнопкой «Пуск» контактора *KM2* (модуль *A6* «Питание нагрузочной машины»);

– выбрать направление вращения нагрузочной машины (только “Вперёд” или только “Назад”) переключателем *SA3* (модуль *A14*);

– плавным поворотом движка потенциометра *RP1* (модуль *A14*) обеспечить плавное изменение угловой скорости вращения нагрузочной машины. **Не допускать** резких перемещений движка *RP1* и тем более смены направления вращения нагрузочной машины переключателем *SA3* без предварительного плавного снижения скорости до нуля;

– проверить работу нагрузочной машины для обоих направлений её вращения.

3.5. Подключить преобразователь частоты к питающей сети, для чего:

– клеммы *A3, B3, C3* на модуле *A3* соединить с одноименными клеммами на модуле *A7* преобразователя частоты;

– кнопкой «Пуск» включить контактор *KM1* (Модуль *A3* «Модуль питания»). Тем самым будут готовы к работе силовые цепи;

– переключатель *SA1* преобразователя частоты (модуль *A7*) поставить в верхнее положение. Тем самым будет разрешена работа автономного инвертора в преобразователе частоты *UZ1* (модуль *A7*);

3.6. Проверить работу аналоговых регуляторов $DA1$, $DA2$ (модуль $A12$ «[Аналоговые регуляторы](#)»). Для этого собрать схему (рис. 18.). Пользуясь осциллографом, последовательно посмотреть характер изменения напряжений на клеммах $X1$, $X2$ и $X6$ при изменении уставок потенциометров $RP1$, $SA3$.

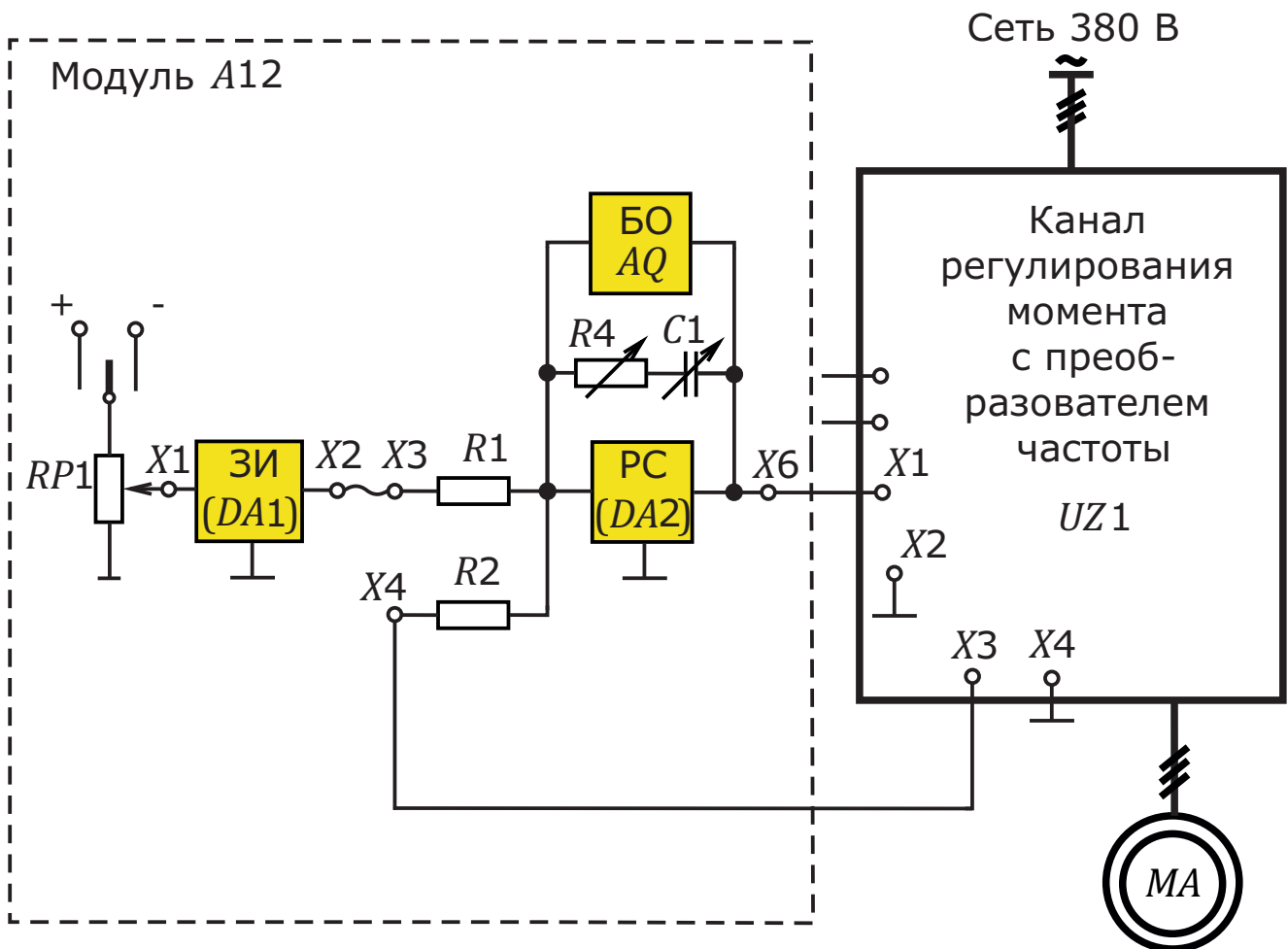


Рис. 18. Функциональная схема электропривода с DTC-регулированием в режиме поддержания скорости

4. Экспериментальное исследование электропривода

4.1. Собрать схему в соответствии с [рис. 14.](#)

4.2. В настроенной системе электропривода, поддерживая на входе канала регулирования момента сигналы $M_{\text{зад}} = \text{Const}$ и $\Psi_{\text{зад}} = \text{const}$, экспериментально снять следующие статические характеристики: механическую характеристику, зависимости $U_1 = f(n)$, $I_1 = f(n)$, $I_{\mu} = f(n)$, $I_W = f(n)$; $I_2 = f(n)$. Скорость электропривода следует изменять с помощью нагрузочной машины от 0 до $+n_{\text{МАХ}}$. При этом переключатель $SA1$ (см. модуль

A14) должен стоять в нижнем положении, соответствующем режиму поддержания скорости « ω ». Требуемые значения сигналов $M_{\text{ЗАД}}$ и $\psi_{\text{ЗАД}}$ определяются студентом на основании исходных данных для предварительных расчетов.

Измеряемые координаты в ходе эксперимента наблюдаются на выходах следующих "объектов": $n - 02.18$; $U_1 - 01.09$; $I_W - 01.05$; $I_1 - 01.04$.

4.3. Поддерживая магнитный поток постоянным $\Phi = \Phi_{\text{БАЗ}}$, уменьшить электромагнитный момент двигателя в два раза до значения $M = 0,5M_{\text{БАЗ}}$. Снять те же статические характеристики, которые указаны в п. 4.2.

4.4. Поддерживая магнитный поток двигателя постоянным, перевести электропривод в режим идеального холостого хода. Снять те же статические характеристики, поддерживая режим идеального холостого хода с помощью нагрузочной машины.

(Как можно убедиться в существовании режима идеального холостого хода?)

4.5. Задавая электромашинному агрегату с помощью нагрузочной машины режим поддержания постоянной скорости $n = n_{\text{БАЗ}}$ (переключатель SA1 модуля A14 стоит в положении " ω "), экспериментально снять следующие зависимости $n = f(M)$, $I_{\mu} = f(M)$, $E_1 = f(M)$, $I_1 = f(M)$, $I_W = f(M)$. Момент нагрузки изменять в диапазоне от $-M_{\text{МАХ}}$ до $+M_{\text{МАХ}}$.

Принять $|M_{\text{МАХ}}| = 1,2M_{\text{БАЗ}}$.

4.6. Снять те же характеристики при работе электропривода в режиме поддержания пониженной скорости $n = 0,5n_{\text{БАЗ}}$.

4.7. Для двух точек (одна соответствует двигательному режиму, другая – генераторному), указанных преподавателем, построить треугольник, образованный векторами потокосцеплений статора, ротора и результирующего вектора в зазоре электрической машины.

4.8. При работе электропривода в базовой точке снять осциллограммы фазного напряжения на статоре $U_{\Phi}(t)$ и фазного тока статора $I_{\Phi}(t)$.

4.9. Поддерживая неизменной скорость и уменьшив момент в два раза, снять те же осциллограммы.

4.10. Вернуться в исходную базовую точку, затем при неизменном моменте двигателя уменьшить скорость электропривода в два раза. Снова снять те же осциллограммы.

Сопоставить три серии осциллограмм по величине амплитуды напряжения и тока, по частоте, по сдвигу фазы между синусоидами напряжения и тока.

4.11. Повторить работу электропривода в тех же точках и зафиксировать в каждом из названных трёх режимов величины токов I_W , I_μ , определить для каждой точки амплитудные значения фазных токов и фазовый сдвиг между векторами напряжения и тока.

Контрольные вопросы

1. Перечислите основные функциональные узлы электропривода и их назначение.

2. Изложите последовательность включения и отключения лабораторного стенда.

3. Укажите мероприятия, позволяющие исключить аварийные режимы при включении и отключении электропривода.

4. Чем токи i_A , i_B , i_C отличаются от токов I_W и I_μ ?

5. Как в схеме ограничить максимальное значение тока статора I_1 ?

6. Как задать величину $\psi_{\text{зад}}$ соответствующей номинальному значению потока?

7. Поясните отличия электромагнитного момента двигателя от момента на валу. Как они определяются в исследуемой схеме?

8. С какой целью в регуляторах потока и момента введена петля гистерезиса?

9. Поясните назначение таблицы переключений.

10. Есть ли какие-то преимущества в преднамеренном снижении точности определения пространственного положения вектора ψ до сектора с углом 60 градусов?

11. Какие аппаратные и алгоритмические преимущества имеет способ **DTC**-формирования момента по сравнению с традиционным векторным управлением?

12. Можно ли в схеме ([см. рис. 14](#)) осуществить режим торможения, если можно, то как?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Терехов, В.М. Системы управления электроприводов: Учебник для студентов высших учебных заведений / В.М. Терехов, О.И. Осипов; под ред. В.М. Терехова. – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 304с.
2. Усынин, Ю.С. Системы управления электроприводов: Учебное пособие. – 2-е издание, испр. и доп. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2004. – 328с.
3. Григорьев, М.А. Замкнутые системы управления электропривода. Сборник задач с пояснениями / М.А. Григорьев; под ред. проф. Ю.С. Усынин. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009. – 32с.
4. Усынин, Ю.С. Сборник задач по курсу "Системы управления электроприводов" / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, Н.Ю. Сидоренко; под ред. Ю.С. Усынина. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2005. – 31 с.
5. Sinamics [Электронный ресурс] URL: http://iadt.siemens.ru/products/motors_drives/converters/ac-converters/sinamics_s/sinamics-s120/ (Дата обращения: 28.04.2013).
6. Unidrive [Электронный ресурс] URL: <http://www.controltechniques.ru/> (Дата обращения: 06.05.2013)
7. ABB [Электронный ресурс] URL: <http://www.abb.ru/> (Дата обращения: 01.05.2013)
8. Direct Torque Control of AC motor drives / M. Aaltonen, P. Tiitinen, J. Laku, S. Heikkilä / ABB Review – 1995. - №3. – pp. 19-24.
9. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием: учебник для студентов высших учебных заведений / Г.Г. Соколовский. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 272с.
10. Рудаков, В.В. Системы управления электроприводов. Прямое управление моментом в электроприводе переменного тока: Учебное пособие / В.В. Рудаков, А.Е. Козярук. Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет). Санкт-Петербург, 2007. – 75 с.
11. Беспалов В.Я. Электрические машины: учебное пособие для студентов высших учебных заведений / В.Я. Беспалов, Н.Ф. Котеленец. – М.: Издательский центр «Академия», 2006.- 320с.

12. Цыпкин Я.З. Основы теории автоматических систем / Я.З. Цыпкин. – М.: Издательство «Наука», 1977. – 560с.

13. Усынин Ю.С. Теория автоматического управления: учебное пособие для вузов / Ю.С. Усынин. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2010. – 176с.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

1. Двигатель M1

Тип	MTF111-6
Номинальная мощность	3,5 кВт
Напряжение статора номинальное	380 В
Ток статора номинальный	10,4 А
Частота вращения номинальная	895 об/мин
Ток ротора номинальный	15 А
Напряжение на кольцах ротора	176 В
Момент максимальный	85 Нм
Момент инерции ротора	0,05 кгм ²
КПД номинальный	70 %
Коэффициент мощности номинальный	0,73
Ток холостого хода номинальный	9,65 А
Коэффициент мощности холостого хода	0,125
Сопrotивление фазной обмотки статора:	
активное	2,1 Ом
индуктивное	2,45 Ом
Сопrotивление фазной обмотки ротора:	
активное	0,6 Ом
индуктивное	0,76 Ом
Коэффициент приведения сопротивлений	3,92

2. Двигатель нагрузочного устройства

Тип	ПБ2П160МГ
Мощность номинальная	$P_H = 5$ кВт
Напряжение номинальное	$U_H = 220$ В
Ток якоря номинальный	$I_H = 26,5$ А
Частота вращения номинальная	$n_H = 2200$
Напряжение обмотки возбуждения	$U_{BH} = 220$ В
Момент инерции якоря	$J_{я} = 0,083$ кгм ²
Коэффициент полезного действия	КПД 83,1 %

3. Преобразователь частоты	Unidrive SP 2401
Номинальная мощность	7,5 кВт
Номинальное напряжение	(380...480±10%)
Число фаз	3
Частота питающего напряжения	(48...62) Гц
Рассеиваемая мощность потерь	180 Вт
Номинальный ток	15,7 А
4. Преобразователь частоты	Sinamics S120
Номинальная мощность	10 кВт
Номинальное напряжение	(380...480±10%)
Число фаз	3
Частота питающего напряжения	(47...63) Гц
Рассеиваемая мощность потерь	201,2 Вт
Номинальный ток	18 А
5. Преобразователь частоты	ACS800
Номинальная мощность	5,5 кВт
Номинальное напряжение	(380...500±10%) В
Число фаз	3
Частота питающего напряжения	(48...63) Гц
Рассеиваемая мощность потерь	200 Вт
Номинальный ток	24 А
6. Датчик положения BQ	Omron
Тип	E6C2-CWZ1X
Разрешение	1000 им/об
Выходной сигнал	A, B, Z, \bar{A} , \bar{B} , \bar{Z}
Напряжение питания VDC	5 В
7. Датчик положения BQ	AutomationDirect
Тип	TRD S500 VD
Разрешение	500 им/об
Выходной сигнал	A+, B+, Z+, A-, B-, Z-
Напряжение питания VDC	5 В
Максимальный потребляемый ток	150 мА

8. Датчики тока

Тип	Lem
Номинальный ток	15 А
Коэффициент передачи $U_{\text{ВЫХ}}/I$	0,37 В/А

9. Датчик напряжения

Тип	Lem
Номинальное напряжение	220 В
Коэффициент передачи $U_{\text{ВЫХ}}/U_{\text{ВХ}}$	0,37 В/В

10. Модулятор-демодулятор

Номинальное входное напряжение	10 В
Номинальная нагрузка	20 мА
Коэффициент передачи $U_{\text{ВЫХ}}/U_{\text{ВХ}}$	1 В/В

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Термины и определения

СУЭП – система управления электроприводом: представляет собой систему векторного управления асинхронным двигателем, либо релейно-векторную систему регулирования

СУ – система управления

РС – регулятор скорости

ЗИ – задатчик интенсивности – задает темп нарастания выходного сигнала

БО – блок ограничения – ограничивает предельное напряжение на выходе регулятора скорости

ПК – преобразователь координат

Энкодер – импульсный датчик положения ротора

ЭДС – электродвижущая сила первичной обмотки

ПЧН – преобразователь частоты сигналов, поступающий на вход системы, подаваемых с выхода энкодера в напряжение пропорционально скорости

ДТС – Direct torque control. Система с непосредственным формированием момента. Релейно-векторная система управления

Модель АД – математическая модель асинхронного двигателя – система уравнений, включающая уравнение баланса напряжений в статорной и роторной цепи, уравнение Лагранжа II рода (основное уравнение движения электропривода)

Аналоговые регуляторы – регуляторы П, ПИ – типа, реализованные на базе операционных усилителей

ПЧ – двухзвенный преобразователь частоты инверторного типа с неуправляемым (или активным) выпрямителем.

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Общий вид лаборатории



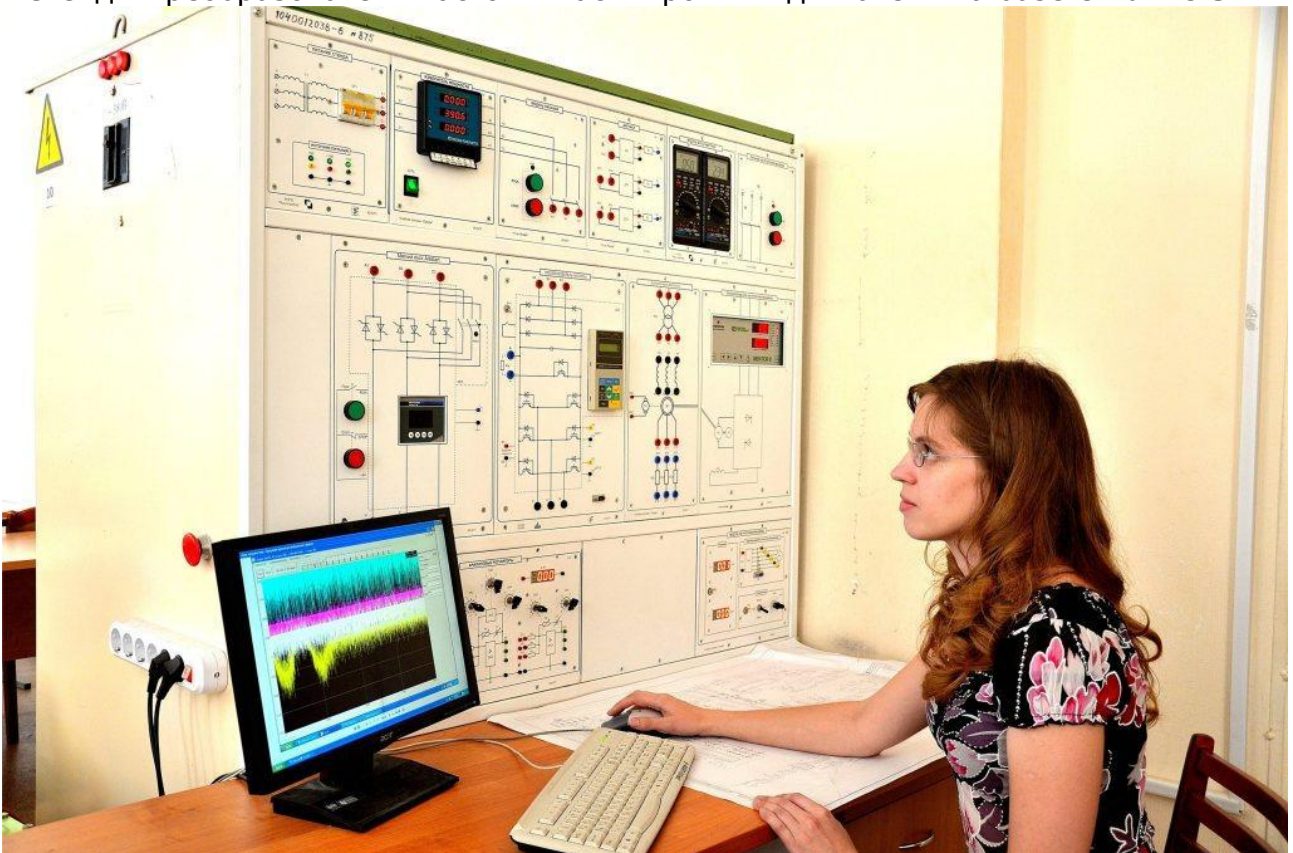
Общий вид лаборатории



Стенд «Преобразователь частоты - асинхронный двигатель на базе Sinamics S120»



Стенд «Преобразователь частоты - асинхронный двигатель на базе Unidrive SP»



Стенд «Преобразователь частоты - асинхронный двигатель на базе АВВ»

Электронное учебное издание

Усынин Юрий Семёнович
Григорьев Максим Анатольевич
Шишков Александр Николаевич
Бутаков Сергей Михайлович

**СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ.
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО АСИНХРОННЫМ
ЭЛЕКТРОПРИВОДАМ**

Учебное пособие