

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

«УТВЕРЖДАЮ»

Зав. кафедрой - руководитель
ОАР ИШИТР

_____ А. А. Филипас

« ____ » _____ 2021 г.

**УПРАВЛЕНИЕ ТРЁХФАЗНЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ.
ИЗУЧЕНИЕ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ УПРАВЛЕНИЯ**

методические указания к выполнению лабораторной работы
по курсу «Микропроцессорная техника и средства автоматизации»
для бакалавров по направлению
15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств»

Издательство
Томского политехнического университета
Томск 2021

УДК 681.3

Управление трёхфазным электроприводом. Изучение методов и средств управления. Методические указания к выполнению лабораторной работы по курсу «Микропроцессорная техника и средства автоматизации» для бакалавров по направлению 15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств»/ Составитель В. В. Курганов. - Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2021. - 32 с.

Рецензент доцент, к.т.н. М. В. Скороспешкин

Методические указания рассмотрены и рекомендованы к изучению методическим семинаром ОАР ИШИТР ТПУ

Протокол № _____ от _____ 2021 г.

Зав. кафедрой –

руководитель ОАР ИШИТР

_____ А. А. Филипас

СОДЕРЖАНИЕ

1 Цель лабораторной работы	4
2 Асинхронные двигатели	4
2.1 Процесс преобразования энергии в электрических машинах	
2.2 Генераторный режим	
2.3 Двигательный режим	
2.4 Устройство трехфазных асинхронных двигателей	
2.5 Вращающееся магнитное поле	
2.6 Принцип действия асинхронного и синхронного двигателей	
2.7. Конструкция асинхронного двигателя	
3 Частотные преобразователи	15
3.1 Схемы частотных преобразователей	
3.2 Скалярное и векторное частотное управление	
3.3 Техническая реализация частотных преобразователей	
3.4 Структура и принцип работы низковольтного преобразователя частоты на IGBT транзисторах	
4 Аппаратура лабораторной установки	23
5 Задание и методические указания по выполнению работы.	24
6 Содержание отчёта	27
7 Контрольные вопросы	27
8 Литература.	28
Приложение 1	29

1 Цель лабораторной работы

Целью лабораторной работы является изучение принципа действия асинхронного двигателя и управление им с помощью частотного преобразователя.

2 Асинхронные электродвигатели

Асинхронные электродвигатели (АД) самый распространённый тип электродвигателей. По разным данным до 70% всей электрической энергии, преобразуемой в механическую энергию вращательного или поступательного движения, потребляется асинхронными двигателями. Широкое применение АД связано с рядом их достоинств.

Асинхронные двигатели - это простые в конструктивном отношении и в изготовлении, надежные и самые дешёвые из всех типов электрических двигателей. Они не имеют щеточно-коллекторного узла, как у двигателей постоянного тока, либо узла скользящего токосъёма, как у генераторов постоянного тока, что помимо высокой надёжности обеспечивает минимальные эксплуатационные расходы. В зависимости от числа питающих фаз различают трехфазные и однофазные асинхронные двигатели.

2.1 Процесс преобразования энергии в электрических машинах

Принцип действия любой электрической машины основан на фундаментальных законах электромагнитных взаимодействий: закон электромагнитной индукции Фарадея - Максвелла, законах Ампера и Био–Савара–Лапласа о взаимодействии проводника с током и магнитного поля и законе Ленца, обобщающем эти два закона [1].

Электрическая машина представляет собой электромагнитную систему, состоящую из ферромагнитного сердечника нескольких обмоток.

Электрические машины обладает свойством обратимости. Вращающиеся электрические машины могут работать как в генераторном, так и в двигательном режимах и переходить из одного режима в другой. Однако выпускаемые машины обычно предназначены для одного из режимов, например генераторного или двигательного. Это позволяет наилучшим способом приспособить машину к условиям работы, уменьшить вес, габариты, повысить КПД.

Рассмотрим процесс преобразования электрической энергии во вращающейся электрической машине на простейшей её модели – витке, вращающемся в магнитном поле (рисунок 2.1).

2.2 Генераторный режим

Если в машине привести во вращение якорь (рисунок 2.1а), то в витке (обмотке якоря) будет индуцироваться переменная ЭДС. Направление её будет соответствовать правилу правой руки.

По правилу правой руки определяют направление индукционного тока в проводнике, движущемся в магнитном поле: если расположить правую ладонь так, чтобы отставленный большой палец совпадал с направлением движения проводника, а силовые линии магнитного поля входили в ладонь, то направление индукционного тока в проводнике совпадёт с направлением вытянутых пальцев.

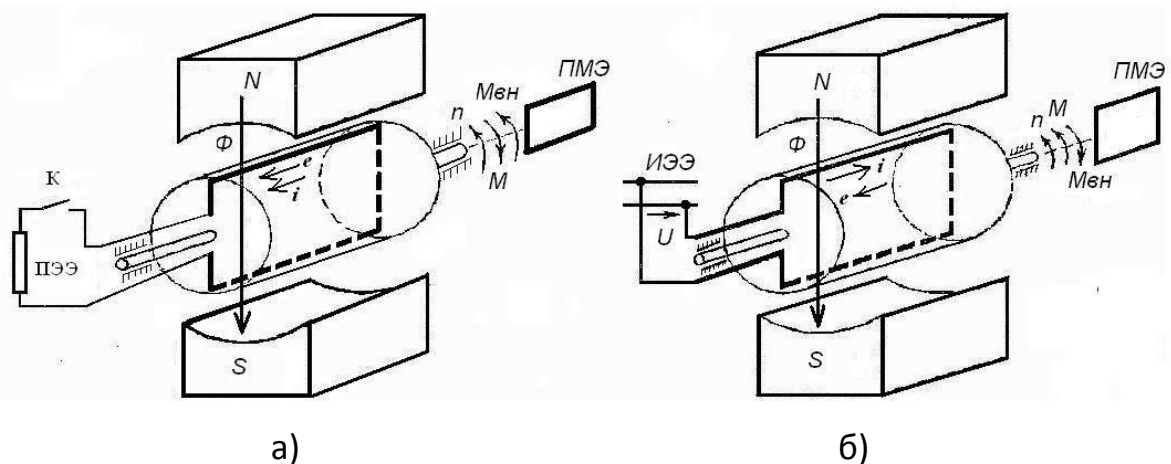


Рисунок 2.1 – Простейшая модель электрической машины при работе в режиме: а – генераторный; б - двигательный

До включения ключа K электрическая цепь машины будет разомкнута и ток через неё протекать не будет. Такой режим называется холостым ходом. В режиме холостого хода имеют место потери энергии: механические $\Pi_{\text{мех}}$ (трение в подшипниках, вращающихся частей о воздух и т.д.) и магнитные потери – потери в стали $\Pi_{\text{ст}}$ (от гистерезиса и вихревых токов в перемагничиваемых ферромагнитных частях машины). Для компенсации этих потерь к валу машины необходимо приложить от некоторого внешнего источника механической энергии внешний вращающий момент $M_{\text{вн0}}$

$$M_{\text{вн0}} = M_{\text{тр}} + M_{\text{ст}} = \frac{\Pi_{\text{мех}} + \Pi_{\text{ст}}}{\Omega},$$

где $M_{\text{тр}} = \frac{\Pi_{\text{мех}}}{\Omega}$ - момент сил трения, возникающих во вращающихся частях машины;

$$M_{\text{ст}} = \frac{\Pi_{\text{ст}}}{\Omega} - \text{тормозящий момент, вызываемый потерями в стали;}$$

Ω - угловая скорость вращения якоря.

При замыкании ключа K по витку протекает ток, и машина отдаёт подключенному к ней потребителю ПЭЭ электрическую энергию. В результате взаимодействия тока i с магнитным полем возникает электромагнитный вращающий момент M , направление которого соответствует правилу левой руки.

Правило левой руки определяет направление механической силы, которая действует на находящийся в магнитном поле проводник с током: если расположить левую ладонь так, чтобы вытянутые пальцы совпадали с направлением тока, а силовые линии магнитного поля входили в ладонь, то отставленный большой палец укажет направление силы, действующей на проводник.

Этот момент направлен против внешнего момента и является тормозным. Для того чтобы продолжить нормальную работу машины, необходимо увеличить внешний вращающий момент $M_{\text{вн}}$.

Таким образом, в рассмотренной машине будет наблюдаться процесс пре-

образования механической энергии в электрическую. Такой режим называется генераторным. Для генераторного режима характерно следующее:

- ток i и ЭДС совпадают по направлению (для машин переменного тока с направлением ЭДС совпадает активная составляющая тока), это указывает на то, что машина отдаёт энергию;
- электромагнитный момент M и направление вращения якоря не совпадают, то есть момент является тормозным, из этого следует необходимость получения энергии извне.

2.3 Двигательный режим

Подключим якорь машины к источнику электрической энергии ИЭЭ в соответствии с рисунком 2.1б. В этом случае в витке будет протекать ток i . В результате взаимодействия этого тока с магнитным полем возникнет электромагнитный вращающий момент M , направление которого будет определяться правилом левой руки. При вращении якоря в витке будет индуцироваться ЭДС, направление которой будет соответствовать правилу правой руки, то есть будет направлена против тока в витке и встречно приложенному напряжению.

Если потребитель механической энергии отсутствует, то имеет место режим холостого хода. При этом от источника ИЭЭ будет потребляться некоторое количество энергии, необходимое для компенсации потерь мощности $P_{\text{мех}}$ и $P_{\text{ст}}$. При этом по витку будет протекать некоторый ток i_0 , который будет создавать некоторый электромагнитный момент M_0

$$M_0 = M_{\text{тр}} + M_{\text{ст}} \quad (2.2)$$

Если к валу подключить потребителя механической энергии ПМЭ, то на вал будет действовать внешний тормозной момент $M_{\text{вн}}$, стремящийся замедлить вращения якоря. Для того чтобы машина продолжала нормально работать, необходимо увеличить электромагнитный вращающий момент M , создаваемый током i , т.е. увеличить ток:

$$M = M_{\text{тр}} + M_{\text{ст}} + M_{\text{вн}} = M_0 + M_{\text{вн}} \quad (2.3)$$

Другими словами любое увеличение механической нагрузки на валу приводит к увеличению тока i и потребляемой электрической энергии, то есть наблюдается преобразование электрической энергии в механическую. Такой режим называется **двигательным**.

Для двигательного режима характерно следующее:

- ЭДС возникающая в обмотке якоря направлена против тока i и внешнего напряжения (для машин переменного тока ЭДС направлена против активной составляющей тока), из этого следует необходимость получения машиной извне электрической энергии;
- электромагнитный момент M и направление вращения якоря совпадают, что характеризует отдачу машиной механической энергии.

2.4 Устройство трехфазных асинхронных двигателей

Трехфазный асинхронный двигатель (АД), представляет собой электрическую машину, состоящую из двух основных частей: неподвижного статора и вращающегося ротора. Статор двигателя состоит из станины, в которую впрессовывают магнитопровод с трехфазной распределенной обмоткой. Назначение статора - намагничивание машины или создание вращающегося магнитного поля. Для уменьшения потерь от вихревых токов, возникающих в результате перемагничивания, магнитопровод статора состоит из тонких (от 0,28 до 1 мм) изолированных друг от друга листов, штампованных из специальной электротехнической стали. В листах различают зубцовую зону и ярмо (рисунок 1.а). Листы собирают и скрепляют таким образом, что в магнитопроводе формируются зубцы и пазы статора (рисунок 2.2.б). Магнитопровод представляет собой малое магнитное сопротивление для магнитного потока, создаваемого обмоткой статора, и благодаря явлению намагничивания этот поток усиливает.

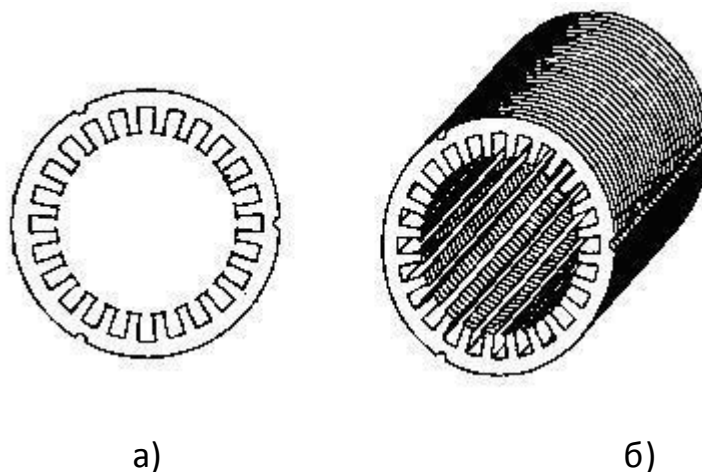


Рисунок 2.2 - Магнитопровод статора

В пазы магнитопровода укладываются проводники, которые соединяясь между собой образуют ряд катушек. Все катушки разбиты на одинаковые группы по числу фаз, которые располагаются симметрично вдоль окружности статора (рисунок 2.3а) или ротора. Все катушки одной каждой группы, электрически соединённые между собой, образуют одну фазу обмотки.

Простейшим элементом обмотки является виток (рисунок 2.3б), состоящий из двух проводников 1 и 2, размещённых в пазах, находящихся друг от друга на некотором расстоянии y . Это расстояние приблизительно равно одному полюсному делению τ , под которым понимают длину дуги, соответствующую одному полюсу:

$$\tau = \frac{\pi D}{2p}, \quad (2.4)$$

D - диаметр внутренней расточки статора или ротора;

$2p$ - число пар полюсов.

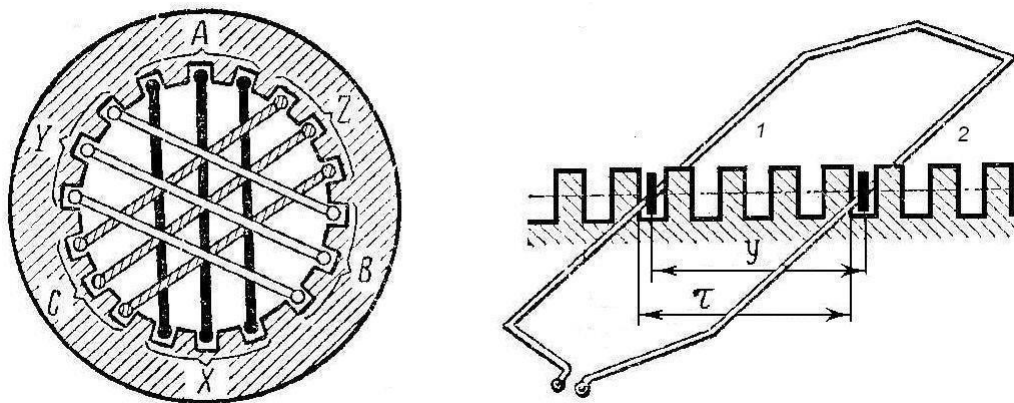


Рисунок 2.3 – Расположение катушек трёхфазной обмотки на статоре (а) и образование витка из двух проводников (б)

2.5 Вращающееся магнитное поле

Действие многофазной машины переменного тока основано на использовании явления вращающегося магнитного поля, создаваемого статором.

Вращающееся магнитное поле создает любая многофазная система переменного тока, т. е. система с числом фаз две, три и т. д.

Наибольшее распространение получил трехфазный переменный ток. Поэтому рассмотрим вращающееся магнитное поле трехфазной обмотки машины переменного тока (рисунок 2.4).

На статоре расположены три катушки, оси которых сдвинуты взаимно на углы 120° . Каждая катушка для наглядности изображена состоящей из одного витка, находящегося в двух пазах (впадинах) статора. В действительности катушки имеют большое число витков. Буквами А, В, С обозначены начала катушек, X, Y, Z — концы их. Катушки соединены звездой, т. е. концы X, Y, Z соединяются между собой, образуя общую нейтраль, а начала А, В, С подключаются к трехфазной сети переменного тока (рисунок 2.4а). Катушки могут соединяться и треугольником (рисунок 2.4б).

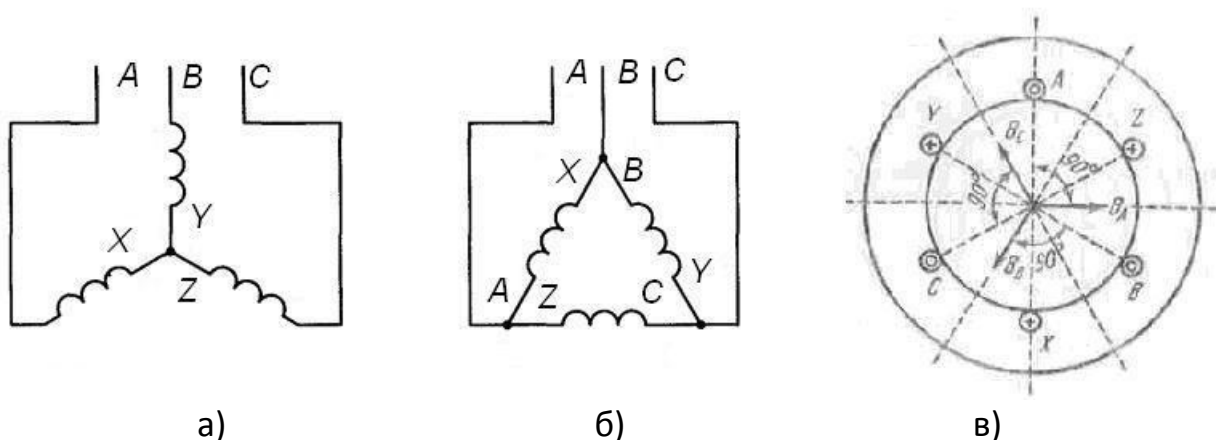


Рисунок 2.4 – Схемы соединений обмоток и простейшая трёхфазная обмотка реле в разрезе

По катушкам протекают синусоидальные токи с одинаковой амплитудой I_m и частотой $\omega = 2\pi f$. Фазы токов смещены на $1/3$ периода (рисунок 2.5).

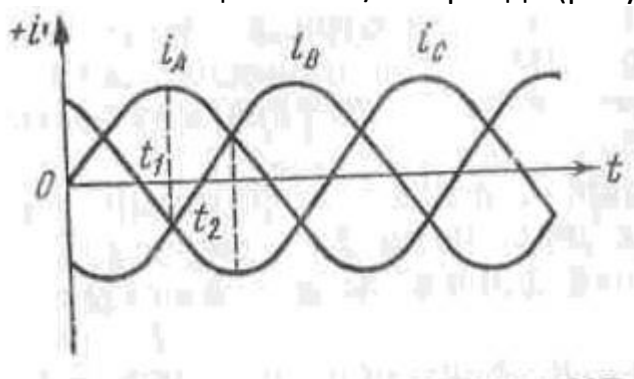


Рисунок 2.5 – Кривые изменения токов трёхфазной обмотки во времени

Токи, протекающие в катушках, возбуждают переменные магнитные поля, магнитные линии которых будут пронизывать катушки в направлении, перпендикулярном их плоскостям. Следовательно, средняя магнитная линия или ось магнитного поля, создаваемого катушкой А — Х, будет направлена под углом 90° к плоскости этой катушки. Направления магнитных полей всех трех катушек показаны на рисунке 2.4в векторами B_A , B_B и B_C , сдвинутыми один относительно другого также на 120° .

Условимся считать положительными направления токов в катушках от начала к концу обмотки каждой фазы.

При этом в проводниках статора, подключенных к начальным точкам А, В, С, токи, принятые положительными, будут направлены на зрителя, а в проводниках, подключенных к конечными точкам Х, Y и Z, — от зрителя (см. рисунок 2.4в).

Положительным направлениям токов будут соответствовать положительные направления магнитных полей, показанные на том же рисунке и определяемые по правилу буравчика.

На рисунке 2.5 приведены кривые токов всех трех катушек, которые позволяют найти мгновенное значение тока каждой катушки для любого момента времени.

Не касаясь количественной стороны явления, определим сначала направления магнитного поля, созданного трехфазной обмоткой для различных моментов времени.

В момент $t = 0$ ток в катушке А - Х равен нулю, в катушке В - Y отрицателен, в катушке С - Z положителен. Следовательно, в этот момент тока в проводниках А и Х нет, в проводниках С и Z он имеет положительное направление, а в проводниках В и Y — отрицательное направление (рисунок 2.6а)

Таким образом, в выбранный нами момент $t = 0$ в проводниках С и Y ток направлен на зрителя, а в проводниках В и Z — от зрителя.

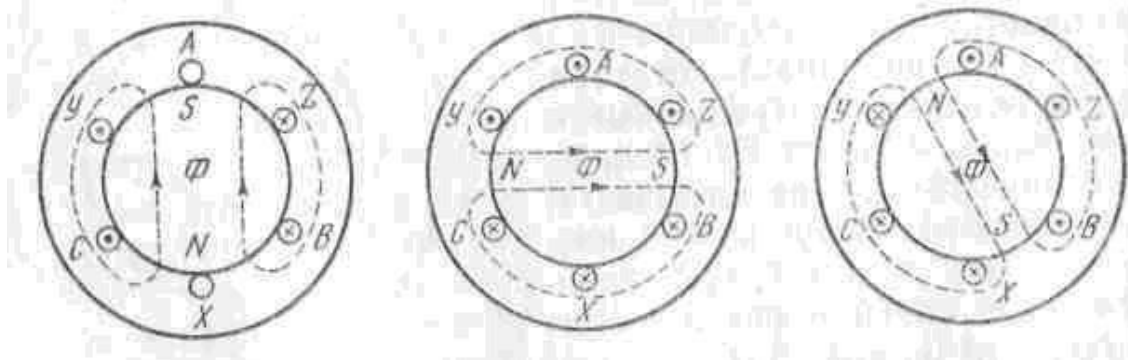


Рисунок 2.6 – Магнитное поле трёхфазной обмотки в различные моменты времени при изменении чередования фаз

При таком направлении тока согласно правилу буравчика магнитные линии созданного магнитного поля направлены снизу вверх, следовательно, в нижней части внутренней окружности статора находится северный полюс, а в верхней части — южный.

В момент t_1 в фазе А ток положителен, в фазах В и С — отрицателен. Следовательно, в проводниках У, А и Z ток направлен на зрителя, а в проводниках С, Х и В — от зрителя (рисунок 2.6б), и магнитные линии магнитного поля повернуты на 90° по часовой стрелке относительно своего начального направления.

В момент t_2 ток в фазах А и В положителен, а в фазе С — отрицателен. Следовательно, в проводниках А, Z и В ток направлен на зрителя, а в проводниках У, С и Х — от зрителя и магнитные линии магнитного поля повернуты еще на больший угол относительно своего начального направления (рисунок 2.6в).

Таким образом, во времени происходит непрерывное и равномерное изменение направлений магнитных линий магнитного поля, созданного трехфазной обмоткой, т. е. это магнитное поле вращается с постоянной скоростью.

В нашем случае вращение магнитного поля происходит по часовой стрелке.

Если изменить чередование фаз трехфазной обмотки, т. е. изменить подключение к сети любых двух из трех катушек, то изменится и направление вращения магнитного поля. На рисунке 2.7 показана трехфазная обмотка, у которой изменено подключение катушек В и С к сети. Из направления магнитных линий магнитного поля для ранее выбранных моментов времени $t=0$, t_1 и t_2 видно, что вращение магнитного поля происходит теперь против часовой стрелки.

Магнитный поток, создаваемый трехфазной системой переменного тока в симметричной системе катушек, является величиной постоянной и в любой момент времени равен полуторному значению максимального потока одной фазы

$$\Phi = \frac{3}{2} \Phi_m$$

Это можно доказать, определив результирующий магнитный поток Φ для любого момента времени.

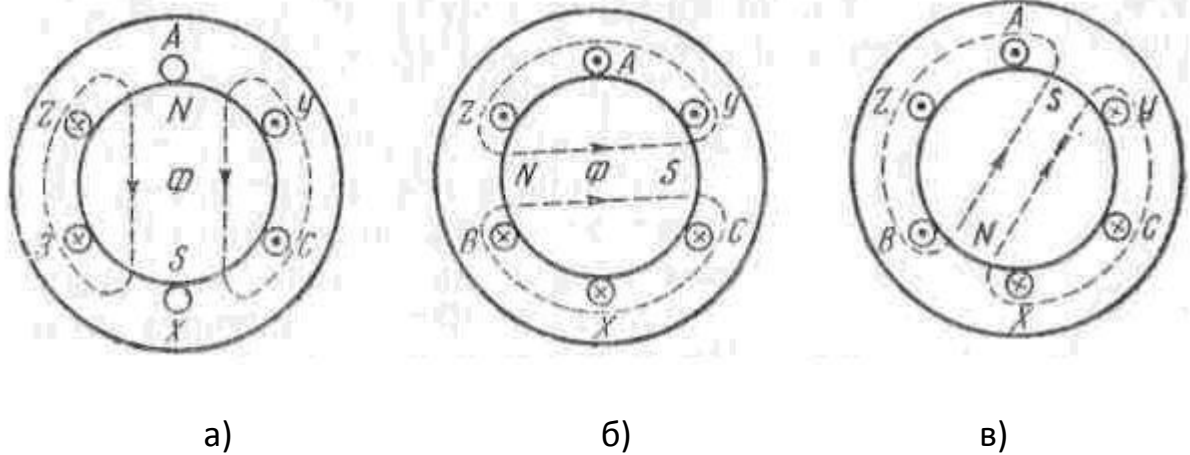


Рисунок 2.7 – Магнитное поле трёхфазной обмотки в различные моменты времени при изменении чередования фаз

Так, для момента t_1 , когда $\omega t_1 = 90^\circ$, токи в катушках принимают следующие значения:

$$i_A = I_m \sin 90^\circ = I_m;$$

$$i_B = I_m \sin (90 - 120) = -\frac{1}{2} I_m;$$

$$i_C = I_m \sin (90 - 240) = -\frac{1}{2} I_m.$$

Следовательно, магнитный поток Φ_A катушки А в выбранный момент имеет наибольшее значение и направлен по оси этой катушки, т. е. положительно. Магнитные потоки катушки В и С вдвое меньше максимального и отрицательны (рисунок 2.8)

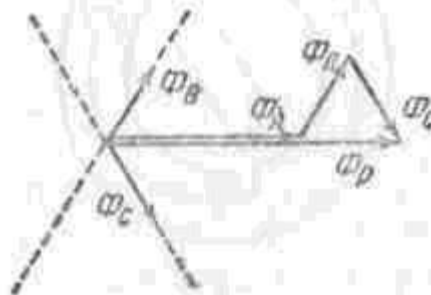


Рисунок 2.8 – Результирующий магнитный поток трёхфазной обмотки

Геометрическую сумму потоков Φ_a , Φ_b , Φ_c можно найти, построив их последовательно в принятом масштабе в виде отрезков. Соединив начало первого отрезка с концом последнего, получим отрезок результирующего магнитного потока Φ_p . Численно этот поток будет в полтора раза больше максимального потока одной фазы.

Если частота тока f , т. е. ток претерпевает f периодов изменения в одну секунду, то магнитный поток трехфазной обмотки совершит f оборотов в секунду или $60f$ оборотов в минуту, т. е.,

$$n_1 = 60f$$

n_1 — число оборотов вращающегося магнитного поля в минуту.

Мы рассмотрели простейший случай, когда обмотка имеет одну пару полюсов.

Если обмотку статора выполнить так, что провода каждой фазы будут разбиты на 2, 3, 4 и т. д. одинаковые группы, симметрично расположенные по окружности статора, то число пар полюсов будет соответственно равно 2, 3, 4 и т. д.

В многополюсных обмотках магнитное поле за один период изменения тока поворачивается на угол, соответствующий расстоянию между двумя одноименными полюсами.

Таким образом, если обмотка имеет 2, 3, 4 и т. д. пары полюсов, то магнитное поле за время одного периода изменения тока поворачивается на

$\frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \frac{1}{4}$ и т. д. часть окружности статора. В общем случае, обозначив буквой p число пар полюсов, найдем путь, пройденный магнитным полем за один период изменения тока, равным одной p -той доли окружности статора. Следовательно, число оборотов в минуту магнитного поля обратно пропорционально числу пар полюсов, т. е.

$$n_1 = \frac{60f}{p}$$

2.6 Принцип действия асинхронного и синхронного двигателей

Вращающееся магнитное поле, создаваемое расположенными на статоре обмотками с током, взаимодействует с токами ротора, приводя его во вращение. Наибольшее распространение в настоящее время получил асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором типа «беличьей клетки» ввиду своей простоты и надежности. В пазах ротора такой машины размещены токонесущие медные или алюминиевые стержни. Концы всех стержней с обоих торцов ротора соединены медными или алюминиевыми же кольцами, которые замыкают стержни накоротко. Отсюда и произошло такое название ротора.

В короткозамкнутой обмотке ротора под действием ЭДС, вызываемой вращающимся полем статора, возникают вихревые токи. Взаимодействуя с полем, они увлекают ротор во вращение со скоростью ω , принципиально меньшей скорости вращения поля ω_0 . Отсюда название двигателя - асинхронный.

Величина

$$S = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}$$

называется относительным скольжением. Для двигателей нормального исполнения $S=0,02 \dots 0,07$.

Неравенство скоростей магнитного поля и ротора является принципиаль-

ным, если учесть, что при $\omega = \omega_0$ вращающееся магнитное поле не будет пересекать токопроводящих стержней ротора и, следовательно, в них не будут наводиться токи, участвующие в создании вращающегося момента.

Принципиальное отличие синхронного двигателя от асинхронного заключается в исполнении ротора. Последний у синхронного двигателя представляет собой магнит, выполненный (при относительно небольших мощностях) на базе постоянного магнита или на основе электромагнита. Поскольку разноименные полюсы магнитов притягиваются, то вращающееся магнитное поле статора, которое можно интерпретировать как вращающийся магнит, увлекает за собой магнитный ротор, причем их скорости равны. Это объясняет название двигателя – синхронный.

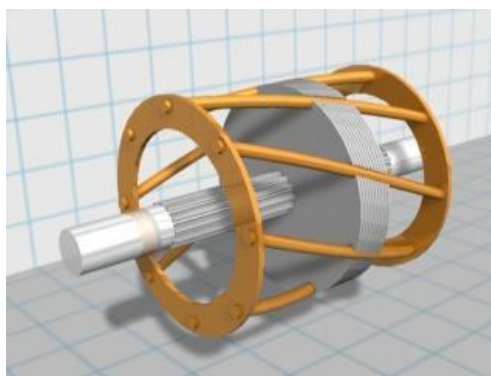
В отличие от асинхронного двигателя, $\cos \varphi$ у которого обычно не превышает 0,8..0,85, у синхронного двигателя можно добиться большего значения $\cos \varphi$ и сделать даже так, что ток будет опережать напряжение по фазе. В этом случае, подобно конденсаторным батареям, синхронная машина используется для повышения коэффициента мощности.

2.7 Конструкция асинхронного двигателя

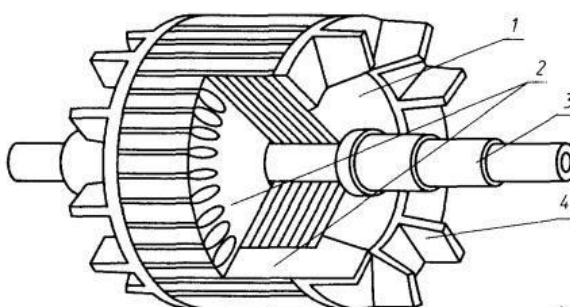
Ротор двигателя состоит из магнитопровода, набранного, как и статор, из штампованных листов стали, с выполненными в нем пазами, в которых располагается обмотка ротора. Различают два вида обмоток ротора: фазную и короткозамкнутую. Фазная обмотка аналогична обмотке статора, соединенной в звезду. Концы обмотки ротора соединяют вместе и изолируют, а начала присоединяют к контактным кольцам, располагающимся на валу двигателя. На контактные кольца, изолированные друг от друга и от вала двигателя и вращающиеся вместе с ротором, накладываются неподвижные щетки, к которым присоединяют внешние цепи. Это позволяет, изменяя сопротивление ротора, регулировать скорость вращения двигателя и ограничивать пусковые токи.

Наибольшее применение получила короткозамкнутая обмотка типа «беличьей клетки». Обмотка ротора крупных двигателей включает латунные или медные стержни, которые вбивают в пазы, а по торцам устанавливают коротко-

замыкающие кольца, к которым припаивают или приваривают стержни (рисунок 2.9а). Для серийных АД малой и средней мощности обмотку ротора изготавливают путем литья под давлением алюминиевого сплава. При этом в пакете ротора 1 заодно отливаются стержни 2 и короткозамыкающие кольца 4 с крылышками вентиляторов для улучшения условий охлаждения двигателя, затем пакет напрессовывается на вал 3. (рисунок 2.9б). На разрезе, выполненном на этом рисунке, видны профили пазов, зубцов и стержней ротора.



а)



б)

Рисунок 2.9 - Ротор асинхронного двигателя с короткозамкнутой обмоткой типа «беличья клетка»

Общий вид асинхронного двигателя представлен на рисунке 2.10. Ротор 5 напрессовывается на вал 2 и устанавливается на подшипниках 1 и 11 в расточке статора в подшипниковых щитах 3 и 9, которые прикрепляются к торцам статора 6 с двух сторон. К свободному концу вала 2 присоединяют нагрузку. На другом конце вала укрепляют вентилятор 10 (двигатель закрытого обдуваемого исполнения), который закрывается колпаком 12. Вентилятор обеспечивает более интенсивное отведение тепла от двигателя для достижения соответствующей нагрузочной способности. Для лучшей теплоотдачи станину отливают с ребрами 13 практически по всей поверхности станины. Статор и ротор разделены воздушным зазором, который для машин небольшой мощности находится в пределах от 0,2 до 0,5 мм. Для прикрепления двигателя к фундаменту, раме или непосредственно к приводимому в движение механизму на станине предусмотрены лапы 14 с отверстиями для крепления. Выпускаются также двигатели фланцевого исполнения. У таких машин на одном из подшипниковых щитов (обычно со стороны вала) выполняют фланец, обеспечивающий присоединение двигателя к рабочему механизму

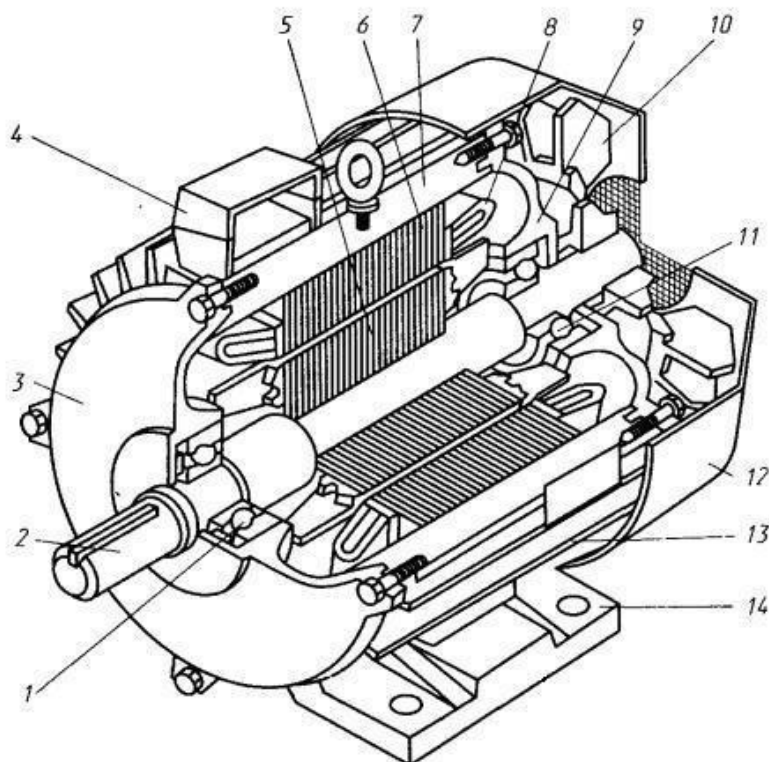


Рисунок 2.10. Общий вид асинхронного двигателя

Выпускаются также двигатели, имеющие и лапы, и фланец. Установочные размеры двигателей (расстояние между отверстиями на лапах или фланцах), а также их высоты оси вращения нормируются. Высота оси вращения - это расстояние от плоскости, на которой расположен двигатель, до оси вращения вала ротора. Высоты осей вращения двигателей небольшой мощности: 50, 56,63, 71, 80, 90, 100 мм.

3 Частотные преобразователи

Преобразователь частоты – это устройство, предназначенное для преобразования переменного тока (напряжения) одной частоты в переменный ток (напряжение) другой частоты.

3.1 Схемы частотных преобразователей

Схема любого преобразователя частоты состоит из силовой и управляющей частей. Силовая часть преобразователей обычно выполнена на тиристорах или транзисторах, которые работают в режиме электронных ключей. Управляющая часть выполняется на цифровых микропроцессорах и обеспечивает управление силовыми электронными ключами, а также решение большого количества вспомогательных задач (контроль, диагностика, защита).

Преобразователи частоты, применяемые в регулируемом электроприводе, в зависимости от структуры и принципа работы силовой части разделяются на два класса:

- преобразователи частоты с явно выраженным промежуточным звеном постоянного тока.
- преобразователи частоты с непосредственной связью (без промежуточного звена постоянного тока).

Каждый из существующих классов преобразователей имеет свои достоинства и недостатки, которые определяют область рационального применения каждого из них.

Первыми появились преобразователи с непосредственной связью (рисунок 3.1а), в которых силовая часть представляет собой управляемый выпрямитель и выполнена на не запираемых тиристорах. Система управления поочередно отпирает группы тиристоров и подключает статорные обмотки двигателя к питающей сети.

Таким образом, выходное напряжение преобразователя формируется из «вырезанных» участков синусоид входного напряжения. На рисунке 3.1б показан пример формирования выходного напряжения для одной из фаз нагрузки. На входе преобразователя действует трехфазное синусоидальное напряжение u_a, u_b, u_c . Выходное напряжение $u_{\text{ВЫХ}}$ имеет несинусоидальную «пилообразную» форму, которую условно можно аппроксимировать синусоидой (утолщенная линия). Из рисунка видно, что частота выходного напряжения не может быть равна или выше частоты питающей сети. Она находится в диапазоне от 0 до 30 Гц. Как следствие малый диапазон управления частоты вращения двигателя (не более 1 : 10). Это ограничение не позволяет применять такие преобразователи в современных частотно регулируемых приводах с широким диапазоном регулирования технологических параметров.

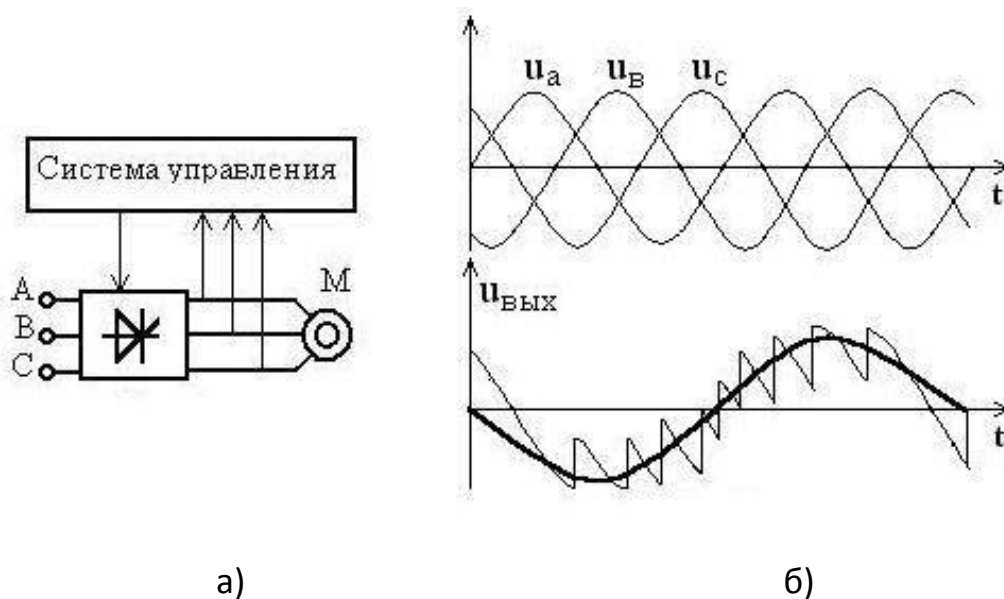


Рисунок 3.1 – Структурная схема преобразователя с непосредственной связью и способ преобразования частоты напряжения

Использование не запираемых тиристоров требует относительно сложных систем управления, которые увеличивают стоимость преобразователя.

«Резаная» синусоида на выходе преобразователя является источником высших гармоник, которые вызывают дополнительные потери в электрическом двигателе, перегрев электрической машины, снижение момента, очень сильные помехи в питающей сети. Применение компенсирующих устройств приводит к повышению стоимости, массы, габаритов, понижению к.п.д. системы в целом.

Наряду с перечисленными недостатками преобразователей с непосредственной связью, они имеют определенные достоинства. К ним относятся:

- практически самый высокий КПД относительно других преобразователей (98,5% и выше);
- способность работать с большими напряжениями и токами, что делает возможным их использование в мощных высоковольтных приводах;
- относительная дешевизна, несмотря на увеличение абсолютной стоимости за счет схем управления и дополнительного оборудования.

Подобные схемы преобразователей используются в старых приводах и новые конструкции их практически не разрабатываются.

Наиболее широкое применение в современных частотно регулируемых приводах находят преобразователи с явно выраженным звеном постоянного тока (рисунок 3.2).

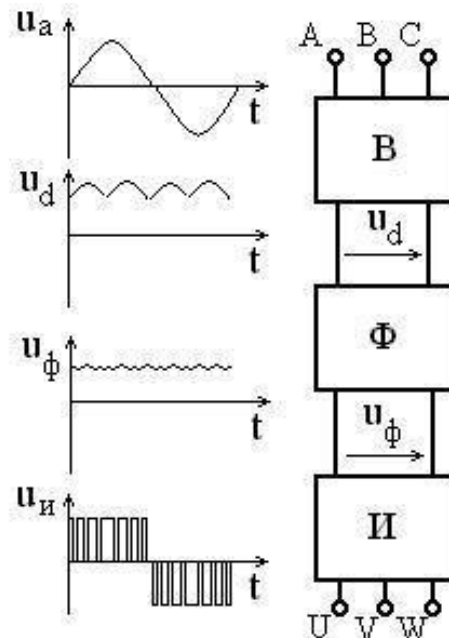


Рисунок 3.2 – Структурная схема частотного преобразователя с двойным преобразованием

В преобразователях этого класса используется двойное преобразование электрической энергии: входное синусоидальное напряжение с постоянной амплитудой и частотой выпрямляется в выпрямителе (В), фильтруется фильтром

(Ф), сглаживается, а затем вновь преобразуется инвертором (И) в переменное напряжение изменяемой частоты и амплитуды. Двойное преобразование энергии приводит к снижению к.п.д. и к некоторому ухудшению массогабаритных показателей по отношению к преобразователям с непосредственной связью.

3.2 Скалярное и векторное частотное управление

В наиболее распространенных частотных преобразователях с двойным преобразованием, используемых для управления асинхронными двигателями с короткозамкнутым ротором, применяется скалярное и векторное частотное управление.

При скалярном управлении по определенному закону изменяют амплитуду и частоту приложенного к двигателю напряжения. Изменение частоты питающего напряжения приводит к отклонению от расчетных значений максимального и пускового моментов двигателя, к.п.д., коэффициента мощности.

Поэтому для поддержания требуемых рабочих характеристик двигателя необходимо с изменением частоты одновременно изменять и амплитуду напряжения.

В существующих преобразователях частоты при скалярном управлении чаще всего поддерживается постоянное отношение максимального момента двигателя к моменту сопротивления на валу. То есть при изменении частоты амплитуда напряжения изменяется таким образом, что отношение максимального момента двигателя к текущему моменту нагрузки остается неизменным. Это отношение называется перегрузочная способность двигателя.

При постоянстве перегрузочной способности номинальные коэффициент мощности и к.п.д. двигателя на всем диапазоне регулирования частоты вращения практически не изменяются.

Вместе с тем на малых частотах, начиная с некоторого значения частоты, максимальный момент двигателя начинает падать. Для компенсации этого и для увеличения пускового момента используется повышение уровня напряжения питания.

Важным достоинством скалярного метода является возможность одновременного управления группой электродвигателей. Частотные преобразователи, реализующие скалярное управление, применимы практически во всех случаях управления электроприводом и имеют диапазон регулирования частоты вращения двигателя до 1:40.

Векторное управление позволяет существенно увеличить диапазон управления, точность регулирования, повысить быстродействие электропривода. Этот метод обеспечивает непосредственное управление вращающим моментом двигателя.

Вращающий момент определяется током статора, который создает возбуждающее магнитное поле. При непосредственном управлении моментом необходимо изменять не только амплитуду, но и фазу статорного тока, то есть вектор

тока. Этим и обусловлен термин «векторное управление».

Для управления вектором тока, а, следовательно, положением магнитного потока статора относительно вращающегося ротора требуется знать точное положение ротора в любой момент времени. Задача решается либо с помощью выносного датчика положения ротора, либо определением положения ротора путем вычислений по другим параметрам двигателя. В качестве этих параметров используются токи и напряжения статорных обмоток.

Менее дорогим является частотно регулируемый электропривод с векторным управлением без датчика обратной связи скорости, однако векторное управление при этом требует большого объема и высокой скорости вычислений от преобразователя частоты.

Кроме того, для непосредственного управления моментом при малых, близких к нулевым скоростям вращения работа частотно регулируемого электропривода без обратной связи по скорости невозможна.

Векторное управление с датчиком обратной связи скорости обеспечивает диапазон регулирования до 1:1000 и выше, точность регулирования по скорости – сотые доли процента, точность по моменту – единицы процентов.

3.3 Техническая реализация частотных преобразователей.

Для формирования синусоидального переменного напряжения используются автономные инверторы напряжения и автономные инверторы тока.

В качестве электронных ключей в инверторах применяются запираемые тиристоры GTO или их усовершенствованные аналоги и биполярные транзисторы с изолированным затвором IGBT.

GTO (запираемый тиристор) - это ключ, который может быть включен и выключен через управляющий электрод. Прибор требует источник тока для включения и выключения.

Запираемый тиристор оптимизирован для низких потерь в проводящем состоянии. Типичная частота переключения - от 200 до 500 Гц. Приборы GTO по своей природе являются сравнительно медленными ключами. Среднее время перехода от включенного к выключенному состоянию и обратно составляет от 10 до 30 мкс.

IGBT-transistor (Insulated Gate Bipolar Transistor) – биполярный транзистор с изолированным затвором - полностью управляемый полупроводниковый прибор, в основе которого лежит трёхслойная структура. Его срабатывание (включение и выключение) осуществляются за счет подачи или снятия положительного напряжения между затвором и эмиттером.

IGBT – это следствие развития технологии силовых транзисторов со структурой металл-оксид-полупроводник (MOSFET – Metal Oxid Semiconductor Field Effect Transistor), управляемые электрическим полем и сочетают в себе два транзистора в объединенной полупроводниковой структуре: биполярный (силовой) и полевой (управляющий).

Для IGBT-транзисторов с номинальным напряжением в диапазоне 600-1200 В в полностью включённом состоянии прямое падение напряжения, так же как и для биполярных транзисторов, находится в диапазоне 1,5-3,5 В.

Биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT) на сегодняшний день являются основными полностью управляемыми приборами силовой электроники в области коммутируемых токов более 50 А и напряжений от 0,5 кВ. Помимо области высоковольтных силовых преобразователей на мощности от единиц киловатт, IGBT-транзисторы используются в бытовой технике для управления относительно маломощными приводами с широким диапазоном регулирования скорости вращения. Так данный тип транзисторов нашел применение в стиральных машинах и инверторных кондиционерах. Их также с успехом применяют в качестве высоковольтных ключей для электронного зажигания автомобилей. Эти транзисторы с улучшенной характери-

стикой переключения широко используются в импульсных блоках питания телекоммуникационных и серверных систем.

Главным достоинством тиристорных преобразователей частоты, как и в схеме с непосредственной связью, является способность работать с большими токами и напряжениями, выдерживая при этом продолжительную нагрузку и импульсные воздействия.

Они имеют более высокий КПД (до 98%) по отношению к преобразователям на IGBT транзисторах (95 – 98%).

Преобразователи частоты на тиристорах в настоящее время занимают доминирующее положение в высоковольтном приводе в диапазоне мощностей от сотен киловатт и до десятков мегаватт с выходным напряжением 3 - 10 кВ и выше. Однако их цена на один кВт выходной мощности самая большая в классе высоковольтных преобразователей.

До недавнего прошлого преобразователи частоты на GTO составляли основную долю и в низковольтном частотно регулируемом приводе. Но с появлением IGBT транзисторов произошел «естественный отбор» и сегодня преобразователи на их базе общепризнанные лидеры в области низковольтного частотно регулируемого привода.

Тиристор является полууправляемым прибором: для его включения достаточно подать короткий импульс на управляющий вывод, но для выключения необходимо либо приложить к нему обратное напряжение, либо снизить коммутируемый ток до нуля. Для этого в тиристорном преобразователе частоты требуется сложная и громоздкая система управления.

Биполярные транзисторы с изолированным затвором IGBT отличаются от тиристоров полной управляемостью, простой неэнергоёмкой системой управления, самой высокой рабочей частотой.

Вследствие этого преобразователи частоты на IGBT позволяют расширить диапазон управления скорости вращения двигателя, повысить быстродействие привода в целом.

Для асинхронного электропривода с векторным управлением преобразователи на IGBT позволяют работать на низких скоростях без датчика обратной связи.

Применение IGBT с более высокой частотой переключения в совокупности с микропроцессорной системой управления в преобразователях частоты снижает уровень высших гармоник, характерных для тиристорных преобразователей. Как следствие меньшие добавочные потери в обмотках и магнитопроводе электродвигателя, уменьшение нагрева электрической машины, снижение пульсаций момента и исключение так называемого «шагания» ротора в области ма-

лых частот. Снижаются потери в трансформаторах, конденсаторных батареях, увеличивается их срок службы изоляции проводов, уменьшаются количество ложных срабатываний устройств защиты и погрешности индукционных измерительных приборов.

Преобразователи на транзисторах IGBT по сравнению с тиристорными преобразователями при одинаковой выходной мощности отличаются меньшими габаритами, массой, повышенной надежностью в силу модульного исполнения электронных ключей, лучшего теплоотвода с поверхности модуля и меньшего количества конструктивных элементов. Они позволяют реализовать более полную защиту от бросков тока и от перенапряжения, что существенно снижает вероятность отказов и повреждений электропривода.

На настоящий момент низковольтные преобразователи на IGBT имеют более высокую цену на единицу выходной мощности, вследствие относительной сложности производства транзисторных модулей. Однако по соотношению цена/качество, исходя из перечисленных достоинств, они явно выигрывают у тиристорных преобразователей, кроме того, на протяжении последних лет наблюдается неуклонное снижение цен на IGBT модули.

Главным препятствием на пути их использования в высоковольтном приводе с прямым преобразованием частоты и при мощностях выше 1 – 2 МВт на настоящий момент являются технологические ограничения. Увеличение коммутируемого напряжения и рабочего тока приводит к увеличению размеров транзисторного модуля, а также требует более эффективного отвода тепла от кремниевого кристалла.

Новые технологии производства биполярных транзисторов направлены на преодоление этих ограничений, и перспективность применения IGBT очень высока также и в высоковольтном приводе. В настоящее время IGBT транзисторы применяются в высоковольтных преобразователях в виде последовательно соединенных нескольких единичных модулей.

3.4 Структура и принцип работы низковольтного преобразователя частоты на IGBT транзисторах

Типовая схема низковольтного преобразователя частоты представлена на рисунке 3.3. В нижней части рисунка изображены графики напряжений и токов на выходе каждого элемента преобразователя.

Переменное напряжение питающей сети ($U_{вх}$) с постоянной амплитудой и частотой ($U_{вх} = const, f_{вх} = const$) поступает на управляемый или неуправляемый выпрямитель (1).

Для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения ($U_{выпр}$) используется емкостный фильтр (2). Выпрямитель и емкостный фильтр образуют звено постоянного тока.

С выхода звена постоянное напряжение U_d поступает на вход автономного импульсного инвертора (3), выполненного на IGBT-транзисторах.

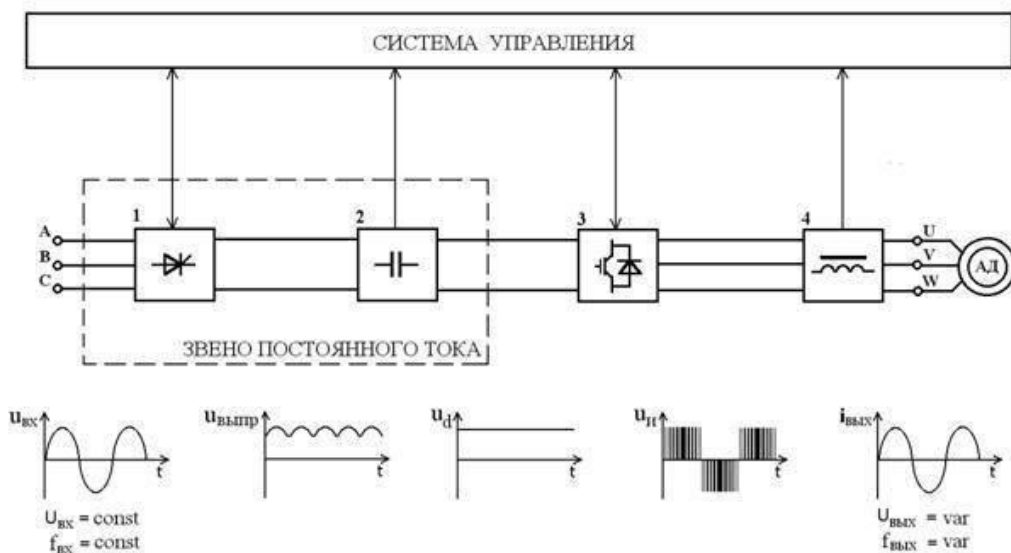


Рисунок 3.3 – Структурная схема преобразователя частоты на IGBT-транзисторах

В инверторе осуществляется преобразование постоянного напряжения U_d в трехфазное (или однофазное) импульсное напряжение U_u изменяемой амплитуды и частоты. По сигналам системы управления каждая обмотка электрического двигателя подсоединяется через соответствующие силовые транзисторы инвертора к положительному и отрицательному полюсам звена постоянного тока. Длительность подключения каждой обмотки в пределах периода следования импульсов модулируется по синусоидальному закону. Наибольшая ширина импульсов обеспечивается в середине полупериода, а к началу и концу полупериода уменьшается. Таким образом, система управления обеспечивает широтно-импульсную модуляцию (ШИМ) напряжения, прикладываемого к обмоткам двигателя. Амплитуда и частота напряжения определяются параметрами модулирующей синусоидальной функции.

При высокой несущей частоте ШИМ (2 ... 15 кГц) обмотки двигателя вследствие их высокой индуктивности работают как фильтр. Поэтому в них протекают практически синусоидальные токи.

В схемах преобразователей с управляемым выпрямителем (1) изменение амплитуды напряжения U_u может достигаться регулированием величины постоянного напряжения U_d , а изменение частоты – режимом работы инвертора.

При необходимости на выходе автономного инвертора устанавливается фильтр (4) для сглаживания пульсаций тока. В схемах преобразователей на IGBT в силу низкого уровня высших гармоник в выходном напряжении потребность в фильтре практически отсутствует.

Таким образом, на выходе преобразователя частоты формируется трехфазное (или однофазное) переменное напряжение изменяемой частоты и амплитуды ($U_{вых} = var, f_{вых} = var$).

4 Аппаратура лабораторной установки

Структурная схема лабораторной установки представлена на рисунке 4.1.

Установка включает:

ТРМ212 – измеритель-регулятор микропроцессорный;

I/R – нормирующий преобразователь температуры KFD2-UT2-Ex1;

ПЧВ – преобразователь частоты векторный;

АД – асинхронный двигатель;

ЭП – эмулятор печи;

ТСП 100П - термосопротивление платиновое , градуировка 100П;

SF1, SF2 – выключатель автоматический.

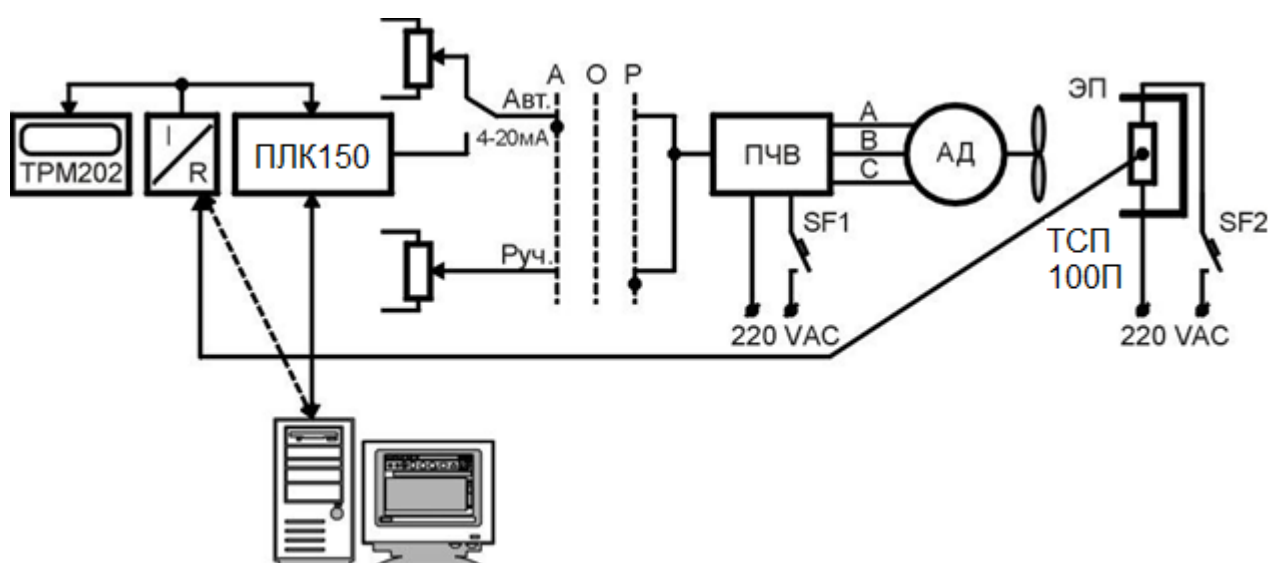


Рисунок 4.1 - Структурная схема лабораторного стенда

ПЛК 150, приведённый на структурной схеме, в данной лабораторной работе не используется.

В таблице 4.1 приведены характеристики элементов лабораторной установки.

Таблица 4.1 - Краткие технические характеристики элементов и приборов

№ п/п	Обозначение	Прибор и его характеристики	Тип	Кол-во
1	ТРМ212	Измеритель-регулятор микропроцессорный двухканальный	ТРМ202-Н-РР	1
2	I/R	1-канальный нормирующий программируемый преобразователь сигналов термодатчиков в унифицированный сигнал 0/4...20мА: <ul style="list-style-type: none"> - напряжение питания =24В; - поддержка большинства известных типов термодатчиков. 	KFD2-UT2-Ex1 Pepperl+Fuchs International.	1
3	ПЧВ	Преобразователь частоты векторный со съёмной локальной панелью оператора (ЛПО)	ПЧВ 102-1К5-А	1
4	АД	Асинхронный двигатель: <ul style="list-style-type: none"> - количество фаз – 3; - мощность – 180 W; - 2730 об/мин; - $\cos \varphi = 0,78$; - КПД = 68%; - способ соединения обмоток - звезда. 	АИР 56 А2	
5	ЭП	Эмулятор печи	ЭП-10	1
6	ТСП 100П	Термопреобразователь сопротивления платиновый 100П	ТСП 100П	1

5 Задание и методические указания по выполнению работы

- 1 Изучите настоящие методические указания к выполнению лабораторной работы.
- 2 Ознакомьтесь с электрической схемой установки.
- 3 Изучите расположение элементов системы на стенде.
- 4 Ознакомьтесь с техническими характеристиками приборов и органами управления, расположенными на стенде
- 5 Изучите расположение элементов на монтажном поле и их принадлежность. Монтажное поле представлено в правой нижней части стенда и в Приложении 1 настоящих Методических указаний.
- 6 Зафиксируйте эмулятор печи в положении в соответствии с вариантом задания (таблица 5.1).
- 7 Включите стенд автоматическим выключателем SF1.
- 8 Опробуйте работу ПЧВ:
 - убедитесь, что на ПЧВ подано напряжение, и он находится в состоянии «СТОП»;
 - на съёмной панели оператора ручку регулятора частоты выходного напряжения выверните в крайнее левое положение, не прилагая усилий;
 - переведите ПЧВ в режим «Ручной»;

Внимание!

Выполнение последующих действий связано с работой асинхронного двигателя. Для безопасной работы освободите пространство вокруг двигателя от посторонних предметов, не связанных с лабораторной установкой. При работе на двигатель подаётся переменное трёхфазное напряжение 380 В.

- медленно вращая ручку регулятора частоты вправо, убедитесь в том, что на индикаторе ЛПО увеличивается значение частоты, и одновременно увеличивается скорость вращения двигателя;
- верните регулятор частоты в исходное состояние;
- переведите ПЧВ в режим «СТОП».

9 Отключите стенд.

- 10 Подключите гибкими проводниками датчик температуры ТСП 100П к преобразователю KFD2-UT2-Ex1.
- 11 Токовый выход преобразователя KFD2-UT2-Ex1 подключите на первый канал измерителя – регулятора ТРМ212. Обратите внимание на то, что для подключения выхода необходимо подать напряжение питания 24 VDC на преобразователь. Если коммутация выполнена верно, то на

цифровом табло измерителя ТРМ212 должно появиться значение температуры, соответствующее комнатной.

ВНИМАНИЕ

После выполнения коммутаций пригласите преподавателя. Не включайте стенд без проверки схемы преподавателем

12 Включите автоматическим выключателем SF2 эмулятор печи. Убедитесь, что на эмулятор печи подано напряжение (горит светодиод) и на табло измерителя ТРМ212 начинает медленно изменяться температура нагревателя. Максимальная температура нагревателя с естественной конвекцией достигает 190 °С. Диапазон измерения температуры измерителя ТРМ212 равен 0 ...300 °С.

13 Переведите ПЧВ в ручной режим. Задавая несколько значений частоты двигателя в диапазоне от 0 до 50 Гц, снимите характеристику

$$t = \varphi(f),$$

где t – температура нагревателя (°С);

f – частота вращения двигателя (Гц).

Характеристику снимите в сторону возрастания температуры. Сделайте выводы о свойствах объекта. При снятии характеристики учитывайте, что объект обладает большой тепловой инерцией. Считайте, что переходный процесс в точке снятия температуры закончился, если изменение температуры меньше чем 0,1 °С/мин.

14 Используя полученные результаты, настройте ПЧВ на температуру нагревателя в соответствии с вариантом (таблица 5.1).

15 После завершения эксперимента отключите нагреватель эмулятора печи (выключить SF2).

16 Соберите схему токовой петли, представленной на рисунке 5.1, для случая когда клеммы А и В замкнуты. Проверьте и зафиксируйте минимальный и максимальный диапазон изменения тока. Для проведения эксперимента необходимо подключить внешний миллиамперметр (находится у преподавателя).

17 Включите частотный преобразователь в токовую петлю. Переведите ПЧВ в режим «Авто». Изменяя значение тока от минимального (4 мА) до максимального (20 мА) и наоборот, отследите изменение частоты вращения двигателя.

18 Снимите характеристику

$$f = \varphi(i),$$

где f – частота вращения двигателя (Гц);

i – ток задатчика (мА).

Объясните причины изменения диапазона задания тока. По полученным данным рассчитайте входное сопротивление ПЧВ по каналу 4...20 мА.

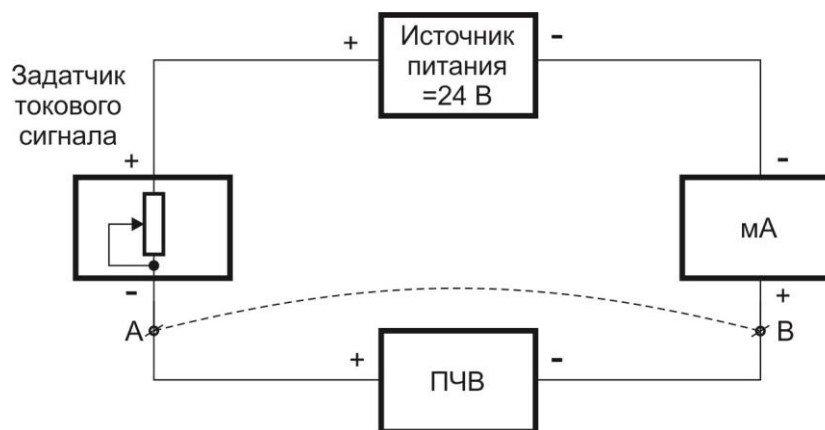


Рисунок 5.1 – Структура токовой петли

- 19 На монтажном поле соберите схему в которой источником токового сигнала 4...20 мА будет преобразователь KFD2-UT2-Ex1, с подключенным к его входу термосопротивлением ТСП 100П, а потребителями по схеме токовая петля первый канал измерителя ТРМ212 и частотный преобразователь ПЧВ.
- 20 Рассчитайте устойчивое состояние полученного контура.
- 21 Включите нагрев эмулятора печи (автоматический выключатель SF2) и дождитесь наступления равновесия. Сравните и поясните результаты. Результат продемонстрируйте преподавателю
- 22 После завершения работы удалите все проводники с монтажного поля установки.

Таблица 5.1 – Варианты заданий

Вариант	Температура, °С	Положение ЭП
1	125	1
2	130	2
3	140	3
4	120	1
5	110	2

6 Содержание отчёта

Отчёт выполняется один на подгруппу.

Отчёт должен быть оформлен в соответствии с установленными правилами и содержать следующее.

- 1 Титульный лист с указанием номера и названия работы, фамилии студентов, выполнивших работу, дату выполнения.
- 2 Цель работы.
- 3 Электрические схемы разработанных и реализованных вариантов управления исполнительными механизмами.
- 4 Результаты экспериментов в виде графиков и таблиц (если необходимо).
- 5 Необходимые расчёты и выводы по работе.
- 6 Ответы на контрольные вопросы.

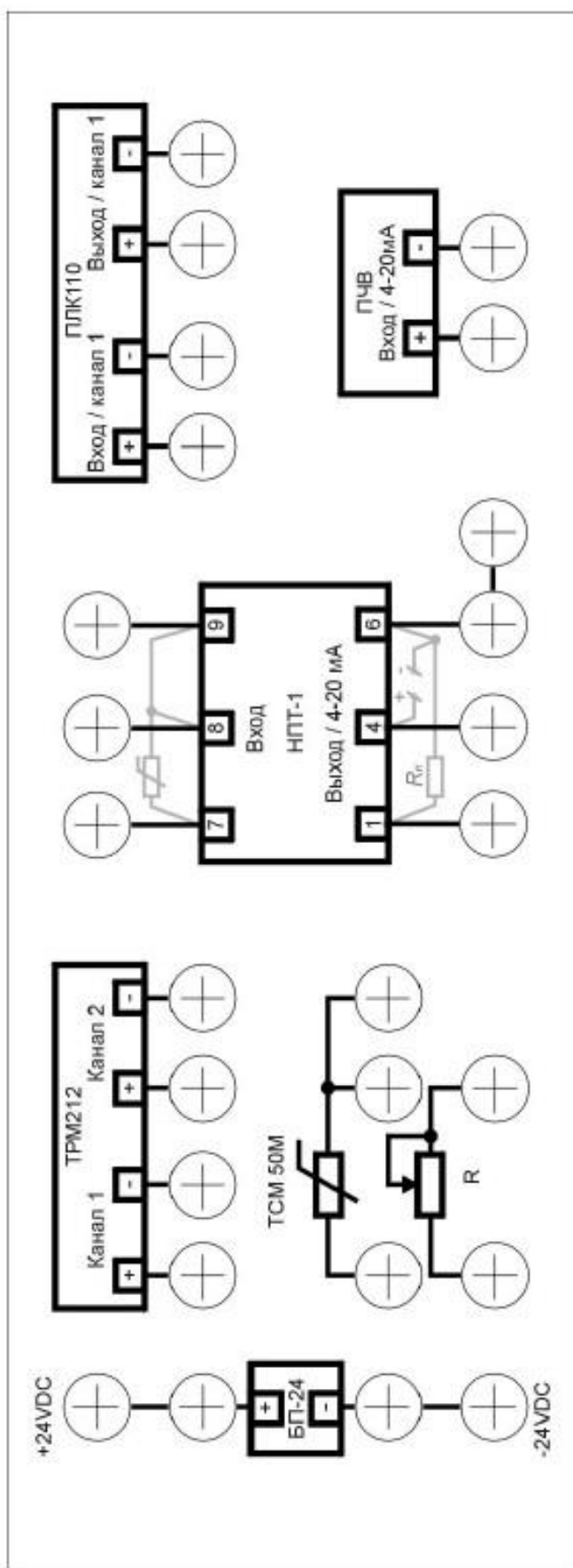
7 Контрольные вопросы

- 1 Поясните, что означает «двигательный» и «генераторный» режимы в электрических машинах?
- 2 Что означает термин «обратимость электрических машин»?
- 3 Что такое скольжение двигателя?
- 4 Сколько пар полюсов имеет статор используемого в лабораторной установке асинхронного двигателя?
- 5 Чему равно скольжение двигателя, используемого в лабораторной установке?
- 6 В чём заключается сущность скалярного и векторного управления частотой электропривода?
- 7 Что обозначает сокращение 100П, 50М, используемое в датчиках температуры?
- 8 Что означают термины «активный источник сигнала» и «пассивный источник сигнала»?
- 9 Сколько активных источников может быть в токовой петле?
- 10 Сколько пассивных приёмников может быть в токовой петле?

8 Литература

- 1 Брускин Д. Э. и др. Электрические машины и электромашинны. Учебное пособие для приборостроительных специальностей вузов. М.: Высшая школа, 1971, 432 с. с ил.
- 2 Фарзани Н. Г., Илясов Л. В., Азим-заде А. Ю. Технологические измерения и приборы: Учебник для студентов вузов по специальности «Автоматизация технологических процессов и производств». – М.: Высшая школа, 1989. – 456 с.: ил.

Монтажное поле станда



Для замечаний

Управление трёхфазным электроприводом.

Изучение методов и средств управления

Методические указания к выполнению лабораторной работы




Составитель Курганов Василий Васильевич

Подписано к печати «___» _____ 2021 г.

Формат 60x84-16. Бумага «Классика»

Печать RISO. Усл. печ. л. 1.16. Уч. – изд. л. 1.05.

Заказ № _____ . Тираж 20 экз.

	<p>Томский политехнический университет Система менеджмента качества Томского политехнического университета сертифицирована NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту ISO 9001:2000</p>	
<p>ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ . 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.</p>		