

## Содержание

Предисловие.....	5
Введение.....	7
I. Электромагнитный момент и электромагнитное усилие электрических машин вращательного и поступательного движения.	
1. Общее выражение для момента и силы.....	14
2. Электромагнитный момент двигателей вращательного движения.....	16
3. Общие выражения для электромагнитного момента двигателей постоянного и переменного тока.....	21
4. Общие выражения для электромагнитных сил линейных двигателей постоянного и переменного тока.....	23
II. Силовые полупроводниковые устройства в цепях электрических машин.	
1. Выпрямители.....	27
1.1. Диоды и тиристоры.....	27
1.2 Однофазный двухполупериодный управляемый выпрямитель со средней точкой. Коммутационные процессы.....	32
1.2.1 Работа на активную нагрузку.....	32
1.2.2 Работа на активно-индуктивную нагрузку.....	33
1.3 Трёхфазный мостовой управляемый выпрямитель.....	38
1.4 Коэффициент мощности и коэффициент полезного действия выпрямителя.....	46
1.5 Реверсивные выпрямители.....	49
1.6 Принципы организации системы управления выпрямителями.....	50
1.7 Фильтры.....	53
2. Инверторы.....	55
2.1 Зависимый инвертор, ведомый сетью.....	55
2.1.1 Обратимость свойств выпрямителя и инвертора.....	55
2.1.2 Однофазный двухполупериодный инвертор со средней точкой.....	59
2.1.3 Трёхфазный мостовой инвертор.....	64
2.1.4 Коэффициент мощности и КПД инверторов.....	67
2.2 Независимые (автономные) инверторы.....	68
2.2.1 Полностью управляемые полупроводниковые приборы и их параметры.....	69
2.2.2 Принципиальные схемы силовых ключей.....	73
2.2.3 Однофазный инвертор. Параметры периодического режима.....	77
2.2.4 Пример расчета.....	84

2.2.5	Трёхфазный инвертор с $180^\circ$ -ой коммутацией.....	85
2.2.5 а)	Режим $180^\circ$ -ой коммутации.....	86
2.2.5 б)	Определение параметров периодического режима колебаний.....	91
2.2.6	Трёхфазный инвертор со $120^\circ$ -й коммутацией.....	97
2.2.6 а)	Режим $120^\circ$ -ой коммутации .....	98
2.2.6 б)	Определение параметров периодического режима.....	101
2.2.6 в)	Пример расчета.....	105
2.3.	Преобразователи частоты.....	108
2.3.1	Преобразователи со звеном постоянного тока.....	108
2.3.1 а)	Достоинства и недостатки преобразователя со звеном постоянного тока.....	109
2.3.1 б)	Способ улучшения гармонического состава выходного напряжения преобразователя.....	110
2.3.2	Непосредственные преобразователи частоты (циклоконвертеры)...	114
2.3.2 а)	Принцип работы преобразователя.....	114
2.3.2 б)	Способ улучшения формы выходного напряжения.....	116
2.3.2 в)	Трёхфазные схемы НПЧ.....	118
2.3.2 г)	Достоинства и недостатки непосредственных преобразователей частоты.....	119

## Предисловие

Современные сложные электромеханические системы представляют собой совокупность разного рода электромеханических преобразователей, силового и информационного типа, полупроводниковых устройств и приводимых в движение механизмов. Такую совокупность устройств называют электромехатронной системой. Составляющие, входящие в электромехатронную систему, зачастую оказывают друг на друга достаточно глубокое влияние, в силу чего изучение свойств и характеристик как всей системы, так и отдельных ее элементов следует вести с учетом этого обстоятельства, которое проявляется, например, в специфических коммутационных процессах, осуществляемых полупроводниковыми устройствами, входящими в состав системы. Как следствие токи, питающие электромеханические преобразователи утрачивают синусоидальную форму – для систем переменного тока или имеют неравномерный, пульсирующий характер – для систем постоянного тока. Неравномерность моментов и усилий, развиваемых электрическими двигателями, питаемыми или управляемыми с помощью полупроводниковых устройств иногда совершенно «безвредна» с точки зрения функционирования систем на относительно высоких скоростях, когда пульсации моментов и сил практически не влияют на неравномерность вращения. Здесь следует обращать внимание только на появление дополнительных потерь в электромеханических преобразователях, связанных с несинусоидальностью токов или их пульсирующим характером. Однако картина меняется, когда речь идет о глубоко регулируемых системах. При низких скоростях перемещения пульсации момента или усилия приводят к заметным пульсациям скоростей и неравномерности движения рабочего органа в целом. Все это резко снижает качество управления и качество всего «механического процесса» в широком понимании этого термина.

Принимаемые меры для нейтрализации особенностей влияния полупроводниковых систем позволяют, как правило, обеспечить степень равномерности моментов и сил электромеханических преобразователей, достаточную для решения большинства механических задач.

Применение синтеза полупроводниковых устройств и электромеханических преобразователей открыло совершенно новые недоступные ранее возможности для управления и регулирования скорости, момента и усилия электрических машин, в частности, электрических двигателей постоянного и переменного тока. На этой основе были созданы новые типы электрических машин, такие как бесколлекторные двигатели постоянного тока (вентильные двигатели), являющиеся аналогом двигателей постоянного тока с механическим коллектором или бесколлекторные реверсивные тахогенераторы постоянного тока. Были реализованы новые способы регулирования

синхронными и, в особенности, асинхронными двигателями, также как векторное регулирование и т.д.

Предлагается вниманию читателей пособие «Электромехатронные системы», предназначено, в основном, для студентов и аспирантов специальности «Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов». Пособие будет состоять из трех частей:

- I. Электромагнитные моменты и силы электрических машин вращательного и поступательного движения. Полупроводниковые устройства в цепях электрических машин.
- II. Постоянный ток. Коллекторные и бесколлекторные двигатели. Конструкции, схемы, характеристики, динамика разомкнутых систем.
- III. Переменный ток. Синхронные и асинхронные двигатели. Конструкции, схемы, характеристики, вопросы динамики.

Пособие ориентировано на читателей, знакомых с курсами «Полупроводниковая электроника» и «Электрические машины», тем не менее мы сочли необходимым в I-й части, дать понимание вопроса генерации электромагнитного момента и электромагнитного усилия электрических машин, изложенного с общих позиций электромеханики и позволяющее получить универсальные выражения, применимые к любым типам электромеханических преобразователей. Кроме того мы считаем необходимым в достаточно краткой форме рассмотреть основные силовые полупроводниковые устройства, применяемые в цепях электрических машин, объяснить принципы их функционирования, дать аналитическое представление их характеристик. Все это, с нашей точки зрения, окажется полезным для восприятия и понимания последующего материала, где рассматриваемые электромеханические преобразователи (главным образом электрические двигатели) работают, как правило, в синтезе с полупроводниковыми устройствами.

Автор благодарит студентов М.С.Васильева, В.С.Кириллова, В.Н.Лабутина, Д.А.Субботина кафедры «Электротехники и прецизионных электромеханических систем» ИТМО за помощь в оформлении и подготовке рукописи к печати.

## Введение

Многие современные механические системы используют в процессе своего функционирования различного рода двигатели, приводящие в движение рабочие органы машин и механизмов, входящих в состав этих систем. Чаще всего перемещение рабочих органов должно быть регулируемым. Регулирование может означать изменение скорости, изменение положения (позиционирование), изменение усилия в процессе перемещения или, в частности, в фиксированном положении. Эти виды регулирования могут осуществляться как в совокупности при управлении объектом, так и по-отдельности.

Наилучшим образом, хотя и не всегда, задачи управления и регулирования решаются с помощью электромеханических преобразователей энергии, в данном случае электрических двигателей, преобразующих электрическую энергию в механическую работу.

Преимущества использования данного типа двигателя перед другими (тепловой, гидравлический, пневматический) определяются следующими достоинствами:

1. Большой уровень коэффициента полезного действия (КПД)
2. Меньшая металлоемкость и меньшие габариты (во многих случаях)
3. Лучшая управляемость.
4. Экологическая чистота функционирования.
5. Полное или частичное отсутствие необходимости в обслуживании.
6. Малошумность.
7. Долговечность и высокая надежность.

Многие из этих преимуществ могут быть реализованы в полной мере, если двигатели будут работать в совокупности, или в синтезе, с электрическими устройствами, которые способны регулировать поток энергии, поступающий от источника питания в двигатель, преобразовывать один вид электроэнергии в другой, изменять характеристики электроэнергии.

Современные устройства, осуществляющие процессы, необходимые для управления электрическими двигателями, создаются на основе разного рода полупроводниковых преобразователей. Как электрические двигатели, так и полупроводниковые преобразователи оказывают достаточно глубокое взаимное влияние и в этом смысле должны рассматриваться как единое целое или как синтез электрической машины и полупроводниковой системы. Такой подход почти всегда необходим в процессе проектирования или при выборе регулируемого двигателя, предназначенного для работы с тем или иным полупроводниковым преобразователем. В отдельных случаях, когда мощность двигателя мала,

преобразовательное устройство конструктивно может быть встроено в корпус двигателя или «пристроено» к нему. К такой конструкции часто присоединяется встроенный редуктор, встроенные измеритель скорости (тахогенератор) и встроенный датчик пути (датчик позиционирования). В результате образуется электромеханический агрегат, способный решать все задачи управления рабочим органом того или иного механизма.

Такая совокупность отдельных элементов, либо полностью объединенных в одном агрегате, либо просто образующих единую систему, может называться электромехатронной системой. Электромехатронная система, как правило, способна решать следующие задачи:

1. Создание электромагнитного момента или электромагнитного усилия.
2. Плавное регулирование скорости, момента или усилия.
3. Регулирование положения вала, рабочего органа (позиционирование)
4. Ступенчатое снижение скорости двигателя при увеличении момента (редуктор).
5. Получение информации о скорости вала.
6. Получение информации об угле поворота вала.
7. Получение информации о токе в обмотке или моменте, развиваемом двигателем.

Рассмотрим типичные структурные схемы некоторых электромехатронных систем или электрических приводов на их основе, содержащих полупроводниковые преобразовательные устройства, электродвигатели, датчики обратных связей и системы управления.

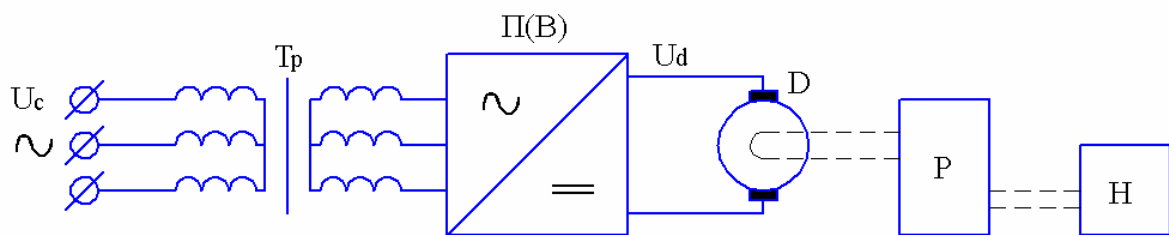


рис. 1.1 а)

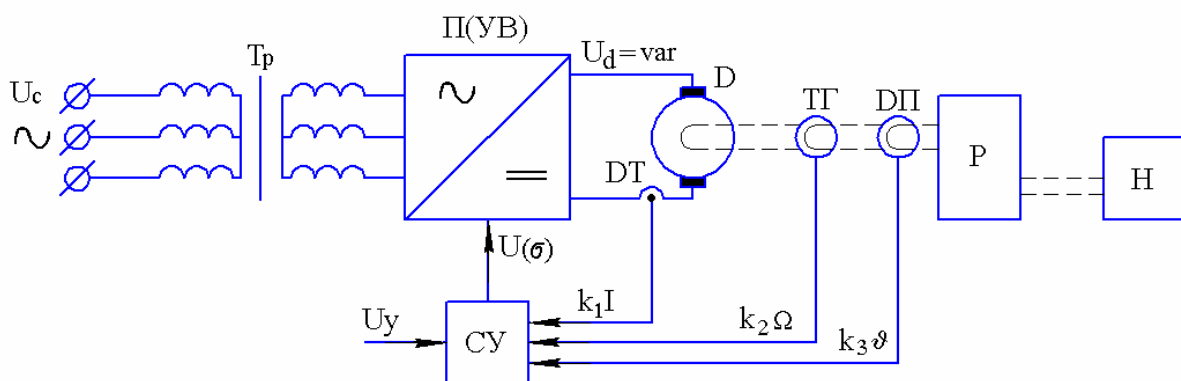


рис. 1.1 б)

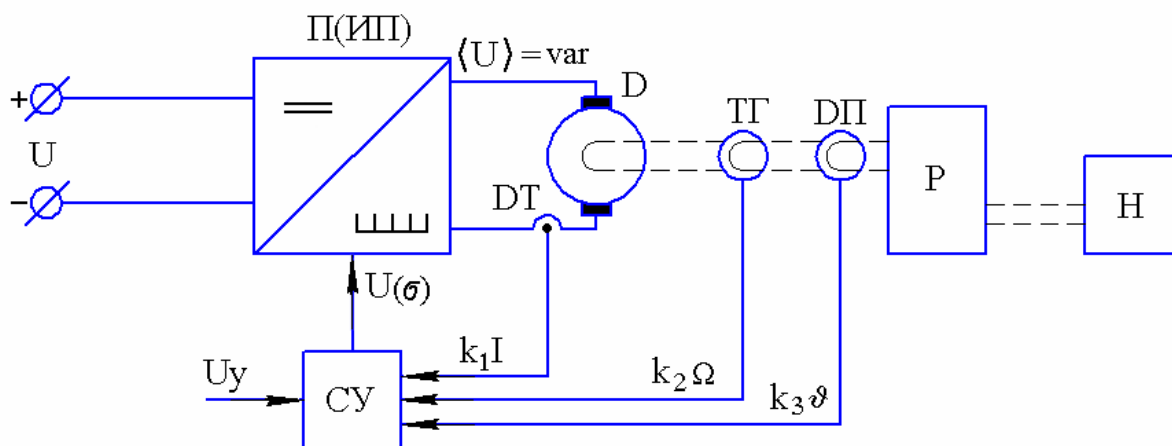


рис. 1.1 в)

На рис 1.1 показаны структурные схемы, содержащие машины постоянного тока (двигатели)  $D$ , питаемые от различных полупроводниковых преобразователей  $\Pi$ . Рис а) относится к случаю нерегулируемого привода. Здесь сетевой трансформатор  $T_r$ , служащий для согласования напряжения сети и напряжения двигателя, питает неуправляемый выпрямитель  $B$ , на полупроводниковых диодах. Выпрямленное напряжение  $U_d$  не изменяется. Представленная система может иметь редуктор  $P$ , соединенный с нагрузкой  $H$ .

Данная структурная схема приведена как пример нерегулируемого привода, однако содержащего в своем составе преобразователь  $\Pi$  (выпрямитель), преобразующий переменный ток сети в постоянный ток двигателя  $D$ .

Структурная схема на рис 1.1 б) является примером регулируемого привода постоянного тока. Здесь преобразователь  $\Pi$  является управляемым выпрямителем (УВ), построенном на полупроводниковых приборах – тиристорах. Под действием управляющей функции  $U(\sigma)$  выпрямленное напряжение  $U_d$ , подаваемое на зажимы двигателя  $D$ , может изменяться.

Подробнее механизм управления тиристорным выпрямителем УВ мы рассмотрим в дальнейшем. Для формирования управляющей функции, обеспечивающей режим управления выпрямителем и, соответственно, двигателем, система должна содержать датчики обратных связей, дающие информацию о координатах, скоростях и других параметрах, характеризующих протекание процесса управления. На структурной схеме показаны наиболее часто применяемые датчики: датчик тока (ДТ), дающий информацию о токе двигателя; тахогенератор (ТГ), вырабатывающий сигнал либо пропорциональный действительной скорости  $\Omega$ , либо сигнал характеризующий эту скорость (импульсный или частотный датчик); датчик положения, или датчик позиционирования ДП, сигнал которого

$K_3 \vartheta$  характеризует угол поворота вала  $\vartheta = \int_0^t \Omega dt$ , где  $t$  – текущее время. В

некоторых случаях датчик скорости ТГ и датчик позиционирования ДП размещают не на валу двигателя, а на валу редуктора Р или валу нагрузочного механизма (нагрузки) Н.

Сигналы датчика тока  $k_1 I$  ( $I$  – ток двигателя), тахогенератора  $k_2 \Omega$  ( $\Omega$  – угловая скорость двигателя), датчика позиционирования  $k_3 \vartheta$  ( $\vartheta$  – угол поворота вала) поступают на блок системы управления СУ. Туда же поступает сигнал управления или сигнал задания  $U_y$ , с которым обычно сравнивается основная регулируемая координата, например угол  $\vartheta$  (или рассчитанное через угол  $\vartheta$  линейное перемещение  $x$  рабочего органа нагрузки Н). Система управления на основании управляющего сигнала  $U_y$  и перечисленных сигналов обратных связей формирует некоторый сигнал  $\sigma$ , обеспечивающий генерирование функции управления  $U(\sigma)$ , воздействующей на преобразователь П (УВ).

Во многих случаях не все из указанных датчиков должны быть использованы в системе, показанной на рис. 1 б). Например, если речь идет только о регулировании скорости  $\Omega$  или о ее поддержании на постоянном уровне, то нет необходимости в датчике позиционирования ДП и т.д.

На рис. 1.1 в) изображена структурная схема регулируемого привода постоянного тока, питаемого от источника постоянного напряжения  $U$ . В качестве силового полупроводникового преобразователя П, обеспечивающего регулирование скорости и управление двигателем Д, используется импульсный преобразователь (ИЭ), выполненный чаще всего на мощных транзисторах. Импульсный преобразователь преобразует постоянное напряжение источника  $U_n$  в последовательность импульсов, частота и длительность которых под действием управляющей функции  $U(\sigma)$  могут изменяться. Наиболее часто применяется алгоритм управления, при котором частота (период) импульсов, а также их амплитуда сохраняются неизменными, а меняется длительность импульса внутри каждого периода. Назначение остальных элементов и сигналов, показанных на схеме сохраняется тем же, что и для предыдущего случая, показанного на рис. 1.б).

Теперь обратимся к некоторым структурным схемам, характерным для приводов с преобразователями и электрическими двигателями переменного тока.

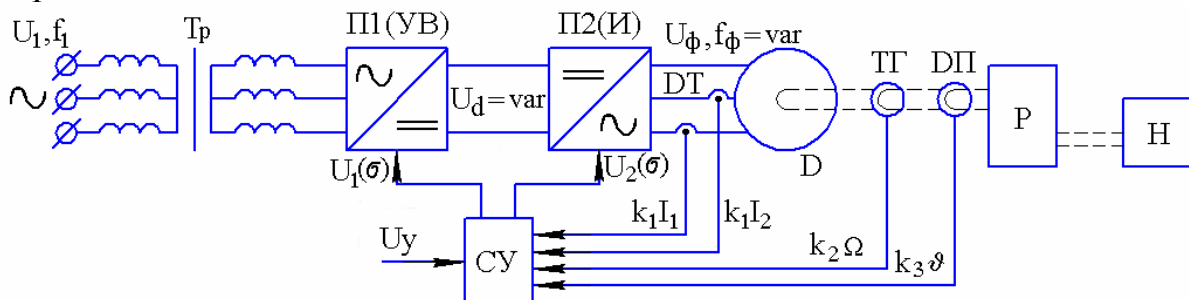


рис. 1.2 а)



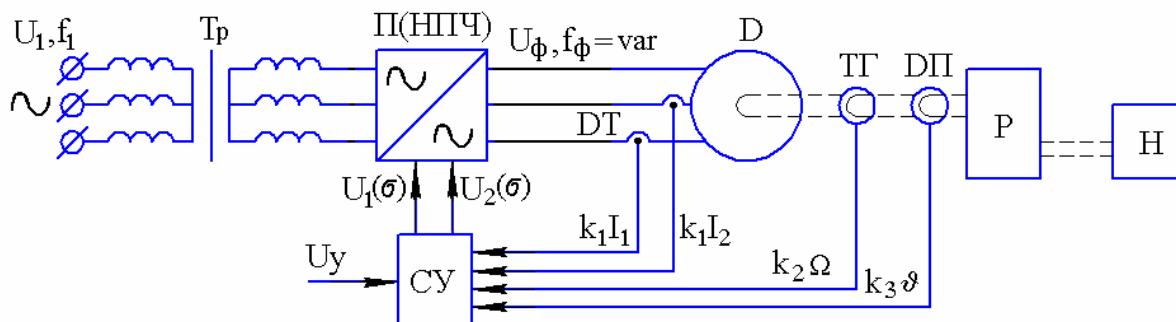


рис. 1.2 б)

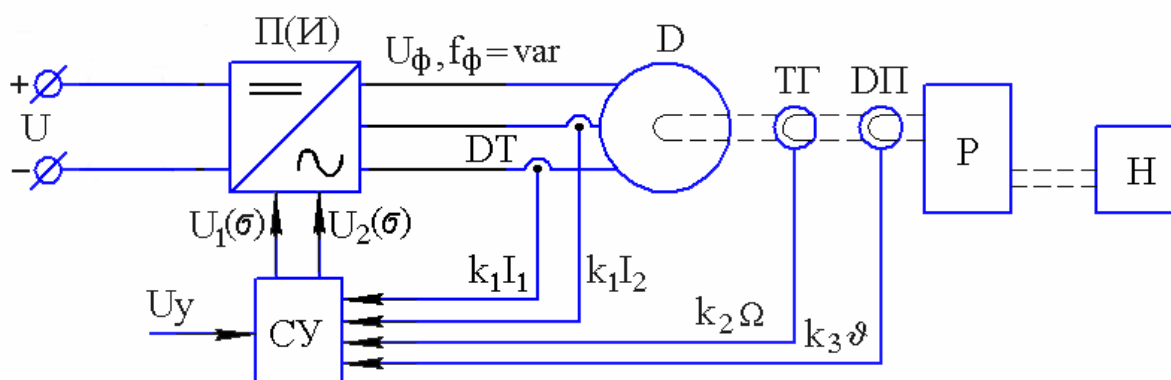


рис. 1.2 в)

На рис. 1.2 а) показана схема преобразователя частоты и напряжения, предназначенного для питания трехфазного двигателя переменного тока Д. Система содержит два преобразователя  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$ . Первый из них выпрямляет переменное напряжение частоты сети  $f_1$  и регулирует уровень выпрямленного напряжения  $U_d$ . Второй -  $\Pi_2$  преобразует (инвертирует) постоянное напряжение  $U_d$  в переменное напряжение  $U_\phi$ , частота которого  $f_\phi$  может регулироваться. Преобразователь  $\Pi_2$  называется инвертором. На фазы обмотки двигателя Д, таким образом, поступает напряжение,  $U_\phi$ , величина которого и частота  $f_\phi$  могут измеряться в соответствии с необходимой закономерностью, вырабатываемой системой управления СУ. Одновременное изменение амплитуды фазного напряжения  $U_\phi$  и его частоты  $f_\phi$  необходимо для управления скоростью асинхронных двигателей.

Система, показанная на рис 1.2 а), называется системой со звеном постоянного тока. В ней осуществляется двойное преобразование энергии:

- 1.) Напряжение переменного тока сети  $U$ , частоты  $f_1$  преобразуется в постоянное напряжение  $U_d$ .
- 2.) Постоянное напряжение  $U_d$  преобразуется в переменное напряжение  $U_\phi$  с частотой  $f_\phi \neq f_1$ .

В общем случае, который и представляет для нас интерес, напряжение  $U_d$  и частота  $f_\phi$  могут регулироваться.

Назначение датчиков и сигналов обратной связи было пояснено при анализе схем на рис.1.

Рассмотрим теперь схему рис. 1.2 б), в которой в отличие от схемы рис. 1.2 а) не происходит двойного преобразования энергии, связанного с выпрямлением ( $\Pi_1$ ) и инвертированием ( $\Pi_2$ ) тока, а с помощью преобразователя  $\Pi$  происходит непосредственное преобразование частоты сети  $f_1$  в частоту питания фаз двигателя  $f_\phi$ . При этом оказывается возможным с помощью управляющих функций  $U(\sigma_1)$  и  $U(\sigma_2)$  изменять как частоту  $f_\phi$  так и напряжение  $U_\phi$ , подаваемое на двигатель  $D$ . Подробнее принцип работы такого преобразователя, который называется непосредственным преобразователем частоты (НПЧ), или циклоинвертором, мы проанализируем позднее.

Преимущество схемы б) по сравнению со схемой а) состоит в большей компактности установки\* (один шкаф НПЧ по сравнению с двумя шкафами преобразователей  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$ ) и несколько большем КПД вследствие однократного преобразования энергии.

Недостаток же состоит в том, что выходная частота НПЧ  $f_\phi$  рис. б) может быть обеспечена не более 0,4 частоты сети  $f_1$ . Помимо этого система управления НПЧ оказывается более сложной, чем для системы со звеном постоянного тока. Таким образом, система рис. 1.2 б) применяются далеко не всегда и, главным образом, для очень тихоходных приводов со скоростью менее 50-100 об/мин.

Надо отметить, что в отличие от схем рис.1 в системах для трехфазных двигателей переменного ток применяется два датчика тока ДТ, измеряющие ток в двух фазах двигателя. Эта информация оказывается достаточной для знания тока во всех трех фазах, поскольку для систем с изолированной нейтралью (соединение фаз звездой)  $i_1 + i_2 + i_3 = 0$  и знание, с помощью датчиков токов  $i_1$  и  $i_2$  означает, что  $i_3 = -(i_1 + i_2)$ .

На схеме рис 1.2 в) имеется только сеть постоянного тока с напряжением  $U$ . Для питания и регулирования двигателя переменного тока  $D$  необходим преобразователь  $\Pi(I)$  – инвертор,

такой же как преобразователь  $\Pi_1(I)$  в схеме со звеном постоянного тока рис 1.2 а). Система управления СУ на рис. 2.в) выполняет, воздействуя на инвертер  $\Pi(I)$ , регулирование амплитуды фазного напряжения  $U_\phi$  и частоты  $f_\phi$ . Датчики обратных связей и их сигналы имеют то же назначение, что и для всех предыдущих схем.

Надо отметить, что во всех представленных на рис. 1.1 и 1.2 схемах не всегда является обязательным применение редуктора  $P$ , т.к. зачастую

---

\* количество силовых тиристоров, тем не менее, для НПЧ оказывается равным 18, а для преобразователей  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$  - 12

более эффективные результаты по КПД, массогабаритным показателям, стоимости и надежности обеспечивает безредукторный привод. Кроме того, в системах может отсутствовать сетевой трансформатор Тр.

Для рассмотренных схем (кроме простейшей схемы рис. 1.1 а)) характерным является присутствие следующих компонентов:

- Электрический двигатель (Д)
- Полупроводниковое преобразовательное устройство с системой управления (П, СУ)
- Нагрузка (Н) того или иного типа, называемая иногда рабочим механизмом (РМ).

Главным из этих компонентов является электрический двигатель, обеспечивающий управляемое движение рабочего механизма и выполнение поставленных перед всей системой задач. Далее основное внимание будет уделено изучению характеристик и возможностей регулирования электрических двигателей различных типов, которые могли бы войти в одну из структурных схем, показанных на рис. 1.1 и 1.2.

Современные конструкции электрических машин и, в частности, электродвигателей по принципу движения можно разделить на электрические машины вращательного движения и электрические машины линейного движения. Первые, несомненно, имеют преобладающее значение с точки зрения широты применения, производства и разнообразия конструкций и типов. Вторые, несмотря на ограниченность сегодняшнего использования, имеют некоторую тенденцию к расширению диапазона применения, особенно в таких областях как линейные транспортные системы, инструмент, насосное и компрессорное оборудование.

Далее основное внимание мы уделим электрическим двигателям вращательного движения и лишь в отдельных местах приведем сведения, характерные для двигателей линейного движения.