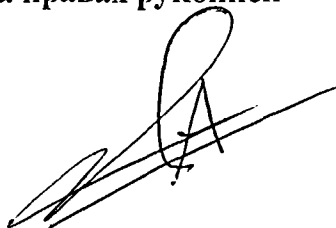


61:07-5/2667

**РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ НЕФТИ И ГАЗА
имени И. М. ГУБКИНА**

На правах рукописи



Лаеби Абдулзахра Джабар

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПЕРЕХОДНЫХ
ПРОЦЕССОВ В ПУСКОВЫХ УСТРОЙСТВАХ ПРИВОДОВ
ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

**специальность 05.09.03 - Электротехнические комплексы и
системы**

К. Т. Н.

**Научный руководитель
доктор технических наук,
профессор
Егоров А. В.**

Москва 2007 г.

Содержание

	<u>Стр.</u>
Введение	4
1. Обзор способов пуска электроприводов переменного тока.	
1.1. Назначение устройств плавного пуска и принципиальные схемы решения	12
1.2. Общие принципы построения современных преобразователей частоты	25
1.3. Основание технических характеристик устройств плавного пуска --	29
2. Моделирование асинхронных электроприводов с пусковыми устрой- ствами	
2.1. Математическая модель асинхронного электродвигателя перемен- ного тока для исследования устройств плавного и частотного пуска.	34
2. 2. Особенности характеристик асинхронных двигателей с короткоза- мкнутым ротором	41
2. 3. Моделирование систем частотного пуска	45
2. 4. Моделирование систем плавного пуска	52
2. 5. Аналитический метод расчета электромеханических характе- ристик асинхронных двигателей для различных пусковых -----	55
2. 6. Расчёт механических характеристик для частотного пуска асинхронного двигателя	63
3. Экспериментальные исследования систем плавного и частотного пуска	71
3. 1. Осциллографирование переходных процессов	
А) Разработка схемы для осциллографирования напряжения на статоре.	71
Б) Разработка схемы для осциллографирования тока статора. -----	72
В) Осциллографирования параметров скорости	72

3. 2. Перечень опытов	-----	74
1. Прямой пуск	-----	79
2. Софтстартерный пуск	-----	88
Выводы	-----	94
Список литературы	-----	96

Введение

Актуальность работы Ирак является второй в мире страной по запасам нефти. К настоящему времени в стране открыто более 100 месторождений нефти и газа с различными запасами. В разработке находятся около 20 месторождений с большим числом добывающих скважин. Основным способом разработки наиболее крупных нефтяных месторождений Ирака является заводнение (как естественный водонапорный режим, так и искусственный) с применением вертикальных скважин. Месторождения (Киркук, Джамбур, Эль-форт, Эль-нор и др.) на севере Ирака характеризуются наличием сложнопостроенными коллекторами, трещиноватостью пород, неоднородностью и анизотропией пласта. В процессе эксплуатации вертикальных скважин происходит образование конуса воды и газа. На юге Ирака эксплуатируется много нефтяных и газонефтяных месторождений. Одно из них газонефтяное месторождение «Румэйла», которое открыто в 1953г. До настоящего времени на нём пробурено 663 скважины. Предстоит построить еще около 50 скважин. Планируется пробурить большое количество скважин, в частности, на месторождениях “Западная Гурна” и “Нахар Умр”. На северо-востоке города «Имара» расположены месторождения «Бузурган», «Абу-Гараб» и «Алфка» нефть которого транспортируется в порт «Ал-Басра» и «Ал-Фао» с помощью центробежных насосов.

Перспективы развития нефтегазовой промышленности Ирака связаны с освоением новых месторождений углеводородного сырья, расположенных в сложных природно-климатических условиях. Это требует создания, новых оптимальных управляемых систем электропривода центробежных насосов.

В настоящее время все более широкое применение в различных отраслях промышленности находят разнообразные системы пуска двигателей переменного тока. Применение подобных устройств позволяет облегчить

условия пуска приводов, снизить термические и динамические нагрузки на различные элементы привода. При этом отсутствуют достаточно простые математические модели, позволяющие включить подобные устройства к единую расчетную схему расчета и анализа электромеханических переходных процессов в системах промышленного электроснабжения. В связи с широким развитием специализированных программных продуктов решение данной проблемы весьма актуально.

Электропривод представляет собой сложную динамическую систему, состояние которой в каждый момент времени определяется текущими значениями ее переменных и приложенных к системе внешних воздействий. В разомкнутой электромеханической системе имеются механические переменные (перемещение масс, скорости, ускорения, силы, моменты и т.п.) и электрические переменные (токи обмоток, потокосцепления, их производные и т.п.). Кроме того, в связи с нагревом двигателя к числу переменных состояния следует отнести температуры частей двигателя, их производные. Внешними воздействиями в электромеханической системе являются приложенные к обмоткам напряжения, а также внешние силы и моменты.

В связи с наличием элементов, обладающих механической, электромагнитной и тепловой инерциями, при изменениях внешних воздействий переход системы от одного состояния к другому протекает во времени, и этот процесс называется переходным. В зависимости от вида инерции в системе электропривода имеют место механические, электромагнитные и тепловые переходные процессы.

Переходным процессом электропривода называется протекающий во времени процесс перехода от одного установившегося режима работы (или отключенного состояния) к другому установившемуся состоянию.

Причиной возникновения переходных процессов могут быть:

- управляющие воздействия (включение - отключение электропривода, изменение задания на скорость привода и др.);
- возмущающие воздействия, главным из которых является изменение нагрузки на валу двигателя (изменение M_c).

Необходимость изучения, а затем и формирования переходных процессов, определяется тем, что многие электроприводы работают в интенсивных динамических режимах, в которых происходит резкое приложение нагрузки, необходимо быстрое изменение скорости и т.д. Таковы электроприводы металлорежущих станков, горных экскаваторов, прокатных станов и других машин. Для этих машин возникает задача сокращения длительности переходных процессов, т.е. повышение быстродействия электропривода. Большое значение имеет анализ переходных процессов для следящих электроприводов, которые работают, как правило, в переходных режимах, отрабатывая изменяющееся задание скорости.

Переходные процессы, вызванные изменениями момента двигателя или внешних нагрузок называются механическими переходными процессами.

В электромеханической системе момент двигателя в соответствии с механической характеристикой зависит от механической переменной - скорости двигателя. Электромеханическая связь объединяет механическую и электрическую части электропривода в единую систему, переходные процессы в которой, как следствие, называются электромеханическими переходными процессами.

Изменения внешних воздействий приводят к изменению количества энергии, выделяющейся в двигателе в виде теплоты, и к соответствующим изменениям его температуры. Процессы нагрева и охлаждения двигателя зависят от электрических и электромагнитных нагрузок его элементов. Соответственно такие переходные процессы называются электротепловыми или тепловыми переходными процессами.

Переход от одного состояния системы к другому может совершаться по различным траекториям, отличающимся длительностью перехода, максимальными нагрузками электрической и механической частей системы, потерями энергии, выделяющимися в двигателе за время перехода, потреблением энергии за то же время и другими показателями. Из множества возможных траекторий при управлении электроприводом необходимо стремиться выбирать такие, которые обеспечивают максимальное быстроедействие, минимум потерь энергии и динамических нагрузок, максимум полезной работы и оптимальные значения других показателей, характеризующих условия протекания процесса.

Характер переходных процессов, соответствующий таким траекториям, является оптимальным в самом общем смысле. Его определение является сложной задачей в связи с многообразием оптимизируемых показателей, их различной практической значимостью и противоречивостью требований к динамическим свойствам электропривода и законам изменения управляющих воздействия.

В работе выполнено исследование конструктивных особенностей типовых пусковых устройств, таких как устройства прямого пуска, устройства мягкого пуска, устройства частотного пуска и разработка на этой основе математических моделей названных устройств и программных модулей, ориентированных на их использование в специализированных программных продуктах. Выполнены экспериментальные исследования процессов пуска асинхронных электроприводов с целью подтверждения адекватности предложенных моделей, исследовано влияние пусковых устройств на показатели качества пуска асинхронных электроприводов.

Целью диссертационной работы Является разработка электромеханических моделей устройств пуска приводов переменного тока, анализ энергетических показателей пуска асинхронных электроприводов.

Основные задачи исследования

1. Анализ принципа работы и конструктивных особенностей систем плавного и частотного пуска приводов переменного тока.
2. Построение математических моделей пусковых устройств, разработка алгоритмов расчета электромеханических переходных процессов в электроприводах, оснащенных пусковыми устройствами.
3. Проведение натурных экспериментов, подтверждающих адекватность разработанных моделей.
4. Численное моделирование электромеханических переходных процессов с целью анализа энергетических показателей различных способов пуска асинхронных электроприводов.

Объекты исследования Объектами исследования являются устройства плавного и частотного пуска электроприводов переменного тока.

Методы исследования В качестве методов исследования использованы положения теории электрических цепей, теории электрических машин, теории электропривода, численные методы решения систем дифференциальных уравнений, методы программирования.

Научная новизна полученных результатов

В работе полученные следующие результаты, обладающие научной новизной:

1. Разработаны математические модели, позволяющие рассчитывать и анализировать электромеханические переходные процессы, возникающие при пуске электроприводов переменного тока при использовании устройств плавного и частотного пуска.

2. Получен ряд зависимостей, характеризующих затраты энергии на пуск асинхронных электроприводов при применении различных способов пуска.
3. Показана применимость выводов теории электропривода, касающихся энергетики пуска асинхронных электроприводов при пониженном напряжении, к задачам пуска таких приводов с использованием современных пусковых устройств.

Практическая значимость полученных результатов

1. Разработанные модели реализованы в виде модулей программного комплекса, предназначенного для расчета режимов работы и электромеханических переходных процессов в системах промышленного электроснабжения.
2. Показано повышение расхода электрической энергии на пуск асинхронных электроприводов при использовании существующих устройств пуска.

Положения, выносимые на защиту

1. Математические модели для систем плавного пуска электроприводов переменного тока и систем автоматического переключения статорных обмоток «звезда - треугольник».
2. Математические модели для систем частотного пуска электроприводов переменного тока при различных законах совместного регулирования частоты и амплитуды выходного напряжения, траекториях пуска.
3. Результаты вычислительных экспериментов по оценке энергетических показателей пуска асинхронных электроприводов с помощью различных пусковых устройств.

Публикации по диссертационной работе

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в одной статье (журнал «Промышленная энергетика»), в сборниках тезисов и материалов двух научно-технических конференций.

Апробация результатов исследований

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях и семинарах:

- Всероссийской научно-технической конференции «Информационные технологии в электроэнергетике нефтяной и газовой промышленности» - Москва, 2004 год;
- Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы состояния и развития нефтегазового комплекса России» - Москва, 2005 год;
- Научных семинарах кафедры Теоретической электротехники и электрификации нефтяной и газовой промышленности РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина - Москва, 2003 - 2005 годы.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка используемой литературы.

Основное содержание диссертационной работы изложено на (101) страницах машинописного текста, рисунками на (31) страницах. Список использованных источников содержит (78) наименований на (6) страницах.

В первой главе представлен анализ существующих теоретических и экспериментальных исследований процессов, происходящих в пусковых устройствах электроприводов переменного тока. Рассмотрены назначение устройств плавного пуска принципиальные и схемные решения, основные технические характеристики устройств плавного пуска, математические модели двигателей переменного тока для исследования устройства плавного пуска, и моделирование систем частотного пуска, плавного пуска.

Во второй главе представлены расчет динамики систем пусковых устройствах электроприводов переменного тока: прямой пуск, пуск переключением У/Д, софтстартерный пуск частотный пуск средствами численного моделирования и аналитический метод расчета

электромеханических характеристик асинхронных двигателей. С целью проверки адекватности полученных моделей были выполнены эксперименты по осциллографированию переходных процессов, возникающих при пуске асинхронного привода. Для осциллографирования использовался компьютерный осциллограф, и было разработано и собрано устройство согласования осциллографа и привода.

В третьей главе излагаются результаты вычислительных экспериментов, проведенных с целью изучения влияния пусковых устройств на энергетические и ряд других показатели пуска привода переменного тока. Все исследования выполнялись для приведенного выше примера асинхронного привода.

В заключении представлены основные положения и выводы диссертационной работы.

1. Обзор способов пуска электроприводов переменного тока

1.1. Назначение устройств плавного пуска, принципиальные и схемные решения

Обзор существующих систем пуска электроприводов

Пуск асинхронных двигателей. Проблемы, возникающие при пуске асинхронных двигателей, близки к проблемам пуска двигателей постоянного тока. Общим является факт протекания большого пускового тока, что опасно в отношении перегрева обмоток статора и ротора. При пуске также снижается напряжение сети, отрицательно влияющее на работу других потребителей.

Известны следующие способы пуска асинхронных двигателей. Для двигателей с фазным ротором применяется реостатный пуск. Для двигателей с короткозамкнутым ротором: прямой пуск от сети; пуск от пониженного напряжения при помощи реактора или автотрансформатора, включенного в цепь статора; плавный подъем частоты и напряжения [2, 3].

Пуск асинхронного двигателя с фазным ротором с помощью реостата в цепи ротора аналогичен реостатному пуску двигателя постоянного тока. При этом уменьшается пусковой ток и увеличивается пусковой момент (до определенного предела увеличения сопротивления в цепи ротора).

Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором проще по устройству и в обслуживании, а также дешевле и надежнее в работе, чем двигатели с фазным ротором. Поэтому везде, где это возможно, применяют короткозамкнутые двигатели [42].

Прямой пуск, при котором обмотка статора двигателя подключается на номинальное напряжение сети, широко применяется в нефтяной и газовой промышленности. Современные асинхронные короткозамкнутые двигатели по величине возникающих при пуске электродинамических усилий и по условиям нагрева допускают прямой пуск. Поэтому такой способ пуска всегда возможен, если сеть достаточно мощная и

пусковые токи не вызывают недопустимо больших потерь напряжения в сети (не более 20%). Пусковые свойства асинхронных короткозамкнутых двигателей можно характеризовать коэффициентом качества пуска, который представляет собой отношение кратности пускового момента к кратности пускового тока, т.е.

$$\gamma = (M_n / M_H) / (I_n / I_H) \quad (1.1)$$

Для двигателей обычного исполнения $\gamma = 0,15 \div 0,25$. Для увеличения γ асинхронные короткозамкнутые двигатели изготавливаются с глубоким и узким пазом или с двойной беличьей клеткой [7]. Для глубокопазных двигателей $\gamma = 0,27 \div 0,33$, а двигателей с двойной беличьей клеткой $\gamma = 0,36 \div 0,5$.

При прямом пуске асинхронного короткозамкнутого двигателя под нагрузкой его мощность должна составлять (20-30)% мощности трансформатора, если от него питается только силовая нагрузка, и (5-10)%, если от трансформатора получает питание осветительная нагрузка [11, 12].

Если прямой пуск от сети короткозамкнутого двигателя невозможен, то применяют один из способов пуска при пониженном напряжении (через реактор или автотрансформатор). В начале двигатель разгоняется при пониженном напряжении, а затем после достижения установившейся частоты вращения подается полное напряжение.

Схема пуска с включением в цепь статора реактора L показана на рис. 1. 1, а. Сначала включается выключатель $QF1$ при отключенном выключателе $QF2$. При достижении частоты вращения, близкой к n_H , включается выключатель $QF2$, шунтируя реактор и обеспечивая дальнейший пуск двигателя при полном напряжении сети.

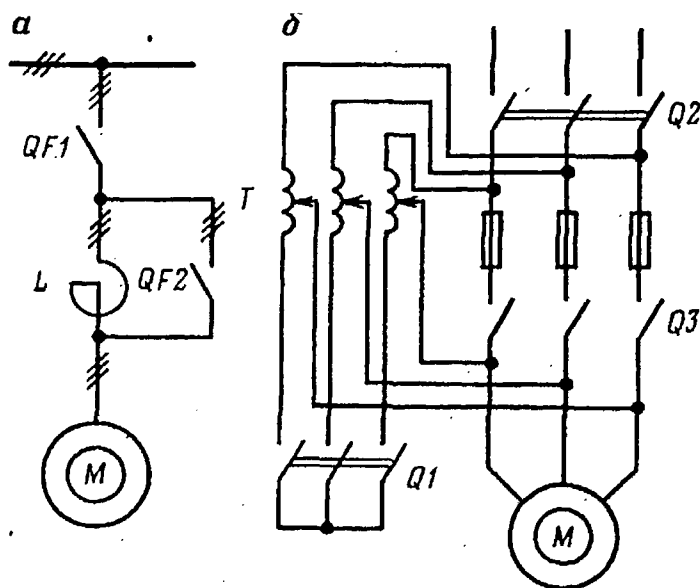


Рис. 1. 1. Схема пуска асинхронного двигателя при помощи ректоров (а) и при помощи автотрансформатора (б)

При пуске двигателя через понижающий автотрансформатор T (рис. 1. 1, б) вначале замыкается выключатель $Q1$, соединяющий обмотки автотрансформаторов в звезду, а затем включается выключатель $Q2$ и двигатель оказывается подключенным на пониженное напряжение U_1 . При этом пусковой ток двигателя на выходе автотрансформатора уменьшается в K раз, где K - коэффициент трансформации автотрансформатора [14, 15]. Что касается тока в питающей двигатель сети, т.е. тока на входе автотрансформатора, то он уменьшается в K^2 раз по сравнению с прямым пуском двигателя от сети, поскольку в понижающем автотрансформаторе первичный ток меньше вторичного в K раз. Поэтому уменьшение пускового тока при автотрансформаторном пуске составляет K^2 раз. Например, если кратность пускового тока асинхронного двигателя составляет $I_n/I_H=6$, а напряжение сети 380 В, то при автотрансформаторном пуске с понижением напряжения до 220 В кратность пускового тока в сети составит $I_n/I_H = 6/(380/220)^2 = 2$.

После разгона двигателя выключатель $Q1$ размыкается и автотрансформатор превращается в реактор. При этом напряжение на зажимах

статора повышается, но все же остается меньше номинального [32, 33, 34]. Включением выключателя Q3 на двигатель подается полное напряжение сети. Таким образом, автотрансформаторный пуск производится тремя ступенями; на первой ступени к двигателю подводится напряжение $U_1 = (0,5 \div 0,6)U_H$, на второй $U_2 = (0,7 \div 0,8)U_H$ и, наконец, на третьей ступени - номинальное напряжение U_H [24, 28, 29].

С точки зрения уменьшения пускового тока автотрансформаторный способ пуска лучше реакторного, так как при реакторном пуске пусковой ток в питающей сети уменьшается в U_1/U_H раз, а при автотрансформаторном - в $(U_1/U_H)^2$ раз. Однако сложность пусковых операций и повышенная стоимость пусковой аппаратуры (понижающий автотрансформатор и переключающая аппаратура) ограничивают применение этого способа пуска асинхронных двигателей [35, 43, 58].

Пуск переключением «звезда—треугольник» (рис. 1. 2) может применяться в случаях, когда выведены все шесть концов обмотки статора и двигатель нормально работает с соединением обмотки статора в треугольник, например, когда двигатель на 380/220 В и с соединением обмоток Y/Δ работает от сети 220 В. В этом случае при пуске обмотка статора включается в звезду (нижнее положение переключателя П на рис. 1. 2), а при достижении нормальной скорости вращения переключается в треугольник (верхнее положение переключателя П на рис. 1. 2). При таком способе пуска по сравнению с прямым пуском при соединении обмотки в треугольник напряжение фаз обмоток уменьшается в $\sqrt{3}$ раза, пусковой момент уменьшается в $(\sqrt{3})^2=3$ раза, пусковой ток в фазах обмотки уменьшается в $\sqrt{3}$ раза, а в сети в 3 раза. Таким образом, рассматриваемый способ пуска равноценен автотрансформаторному редко [5].

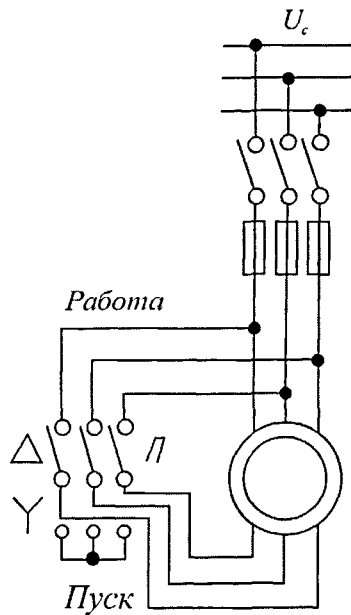


Рис1.2. Схема пуска асинхронного двигателя при пуске спереклчением «звезда—треугольник»

Пуск двигателя с фазным ротором с помощью пускового реостата

Исходя из изложенного, для пуска асинхронного двигателя с фазным ротором нужно принять меры для увеличения пускового момента и снижения пусковых токов. С этой целью в цепь ротора включают добавочное активное сопротивление. Из формул :

$$M_k = \frac{3U_1^2}{2\omega_0(r_1 + \sqrt{r_1^2 + x_k^2})} ; \quad (1.2)$$

$$s_k = \pm \frac{r_2}{\sqrt{r_1^2 + x_k^2}} \quad (1.3)$$

введение добавочного активного сопротивления не изменяет максимального момента двигателя, а лишь изменяет величину критического скольжения.

$$s = \frac{r_2' + R'_{доб}}{x_k} \quad (1.4)$$

Введение добавочного активного сопротивления увеличивает полное

сопротивление роторной цепи, в результате чего уменьшается пусковой ток и увеличивается $\cos \varphi_2$ роторной цепи, вследствие чего увеличивается активная составляющая тока ротора и, следовательно, пусковой момент двигателя [14].

Обычно в роторную цепь двигателя с фазным ротором вводят секционированное сопротивление, ступени которого замыкаются пусковыми контакторами. Расчет реостатных пусковых характеристик можно производить по формуле ;

$$M = \frac{2 M_k}{s_k / s + s / s_k}. \quad (1.5)$$

используя значение s_k , соответствующее величине $R_{доб}$ для каждой ступени пускового сопротивления [47]. Схема включения дополнительных сопротивлений и механические характеристики двигателя (на рис1. 3). Как следует из рисунка, механические характеристики имеют общую точку идеального холостого хода, равную скорости вращения электромагнитного поля статора ω_0 , а жесткость рабочей части характеристик уменьшается по мере возрастания суммарного активного сопротивления роторной цепи ($\Gamma_2 + R_{доб}$).

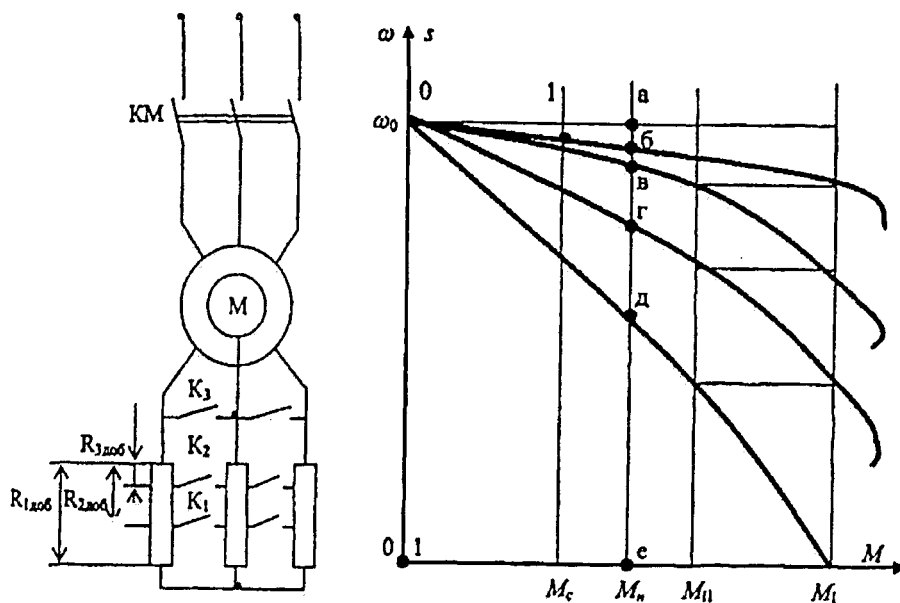


Рис.1. 3. Схема включения пусковых сопротивлений (а) и реостатные механические характеристики асинхронного двигателя с фазным ротором (б)

При пуске двигателя сначала вводится полное добавочное сопротивление $R_{1доб}$ – По достижении скорости, при которой момент двигателя M_{11} становится близким к моменту сопротивления, часть пускового сопротивления закорачивается контактором K_1 , и двигатель переходит на характеристику, соответствующую величине добавочного сопротивления $R_{2доб}$. По мере разгона двигателя контактором K_2 закорачивается вторая ступень пускового сопротивления. После замыкания контактов контактора K_3 двигатель переходит на естественную характеристику и будет работать со скоростью, соответствующей точке 1.

Величины добавочных сопротивлений легко определить графически. Проведем линию номинального момента двигателя и отметим точки пересечения этой линии с механическими характеристиками. Тогда отрезки, заключенные между точками, будут пропорциональны величинам сопротивления ступеней.

Полное добавочное сопротивление $R_{1доб} = R_{2н} \cdot \frac{б.д}{а.е}$

Первая ступень сопротивления $R_{1доб} - R_{2доб} = R_{2н} \cdot \frac{з.д}{а.е}$

Вторая ступень сопротивления $R_{2доб} - R_{3доб} = R_{2н} \cdot \frac{в.д}{а.е}$

Третья ступень сопротивления $R_{3доб} = R_{2н} \cdot \frac{б.в}{а.е}$

Отрезок *аб* пропорционален сопротивлению обмотки фазы

ротора $r_2 = R_{2н} \cdot \frac{а.д}{а.е}$

В приведенных соотношениях $R_{2н}$ - номинальное сопротивление ротора, которое определяется по формуле:

$$R_{2н} = \frac{E_{2н.лин}}{\sqrt{3} \cdot I_{2н}},$$

где: $E_{2н.лин}$ - линейная э.д.с. ротора при $S=1$;

$I_{2н}$ - номинальный ток ротора [45].

Изменение напряжения питания асинхронного двигателя

Величина потока асинхронного двигателя пропорциональна напряжению питания U_1 , величина ЭДС ротора, а, следовательно, и ток ротора I_2 также пропорциональны напряжению статора [58]. Поэтому момент асинхронного двигателя, в том числе критический момент, пропорциональны квадрату напряжения U_1 (см.1.7, 1.8).

Активная составляющая тока ротора будет:

$$I_{2a} = \frac{U_1 \frac{r_2}{s}}{x_k^2 + \left(r_1 + \frac{r_2}{s} \right)^2} \quad (1.6)$$

$$M = \frac{3U_1^2 \cdot \frac{r_2'}{s}}{\omega_0 \left[r_k' + \left(r_1 + \frac{r_2'}{s} \right)^2 \right]} \quad (1.7)$$

$$M_k = \frac{3U_1^2}{2\omega_0 (r_1 + \sqrt{r_1^2 + x_k^2})} \quad (1.8)$$

Это обстоятельство определяет недопустимость значительного снижения напряжения питания при пуске и работе асинхронного двигателя. Так, при снижении питающего напряжения на 30% его максимальный момент уменьшится примерно в два раза и при значительном статическом моменте двигатель может «опрокинуться», т.е. остановиться, и оказаться под пусковым током. Этот режим является для двигателя аварийным. Такая же ситуация может сложиться, если напряжение питания снижено при пуске двигателя под нагрузкой [26, 27]. Указанные случаи имеют место в электрических сетях ограниченной мощности, что обуславливает большую аварийность асинхронных короткозамкнутых двигателей. Во избежание этого должны предусматриваться необходимые защитные средства, предотвращающие длительное нахождение асинхронного двигателя под пусковым током [8, 21].

В то же время преднамеренное снижение (регулирование) напряжения, подаваемого на статорные обмотки, иногда используются для регулирования скорости асинхронного двигателя и для обеспечения плавности пуска.

Регулирование скорости асинхронного двигателя путем изменения питающего напряжения сопряжено с возможностью перегрева его ротора и может производиться лишь при определенных условиях [36]:

- при малом диапазоне снижения скорости относительно номинальной;
- при сниженном относительно номинального моменте сопротивления на валу двигателя;
- использовании двигателя с повышенным скольжением.

Рассмотрим механические характеристики асинхронного короткозамкнутого двигателя с повышенным скольжением при регулировании напряжения статора (рис.1. 4). При снижении напряжения U_1 критическое скольжение двигателя и скорость идеального холостого хода ω_0 остаются постоянными, а максимальный момент M_k двигателя уменьшается примерно пропорционально квадрату снижения напряжения, соответственно снижается жесткость рабочей части механической характеристики двигателя. Регулирование скорости возможно в диапазоне $\omega_0 \div \omega_0(1-s)$ [49, 59].

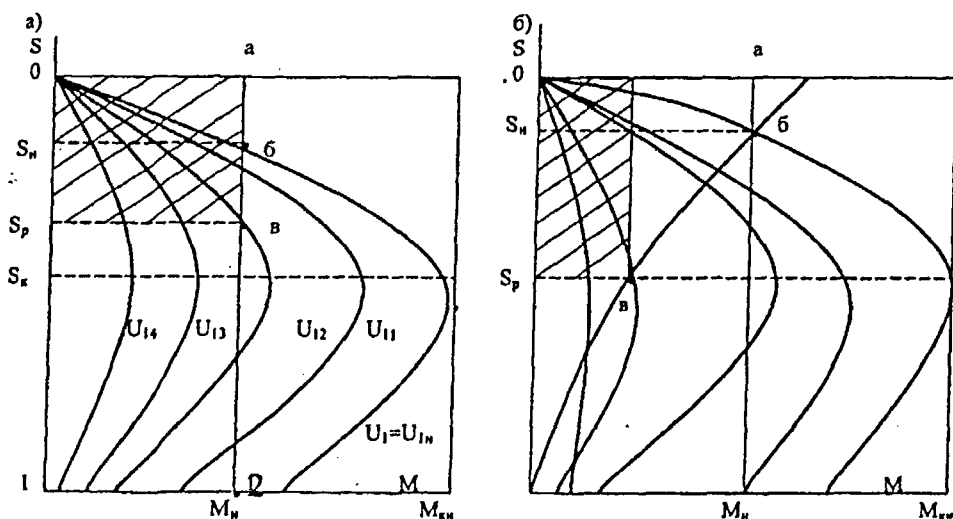


Рис.1. 4 Механические характеристики асинхронного двигателя при регулировании напряжения питания
 а) при постоянном моменте
 б) при вентилятором моменте нагрузки

Предположим, что момент сопротивления на валу двигателя остается постоянным и равным номинальному $M_C = M_H$. При снижении напряжения до величины U_{12} двигатель будет работать со скоростью, равной $\omega_0(1 - s)$ со скольжением s_p . Как следует из энергетической диаграммы асинхронного двигателя, мощность скольжения P_s , выделяемая в виде потерь в роторе двигателя будет равна $P_s = M_H \cdot \omega_0 \cdot s_p$ и пропорциональна заштрихованной площади прямоугольника $Oavs_p$. Электромагнитная мощность $P_{ЭМ} = M_C \cdot \omega_0$

пропорциональна площади O_{avs_p} , полезная мощность на валу двигателя $M_{MEH} = M_c \cdot \omega = M_c \cdot \omega_0 (1 - s)$ будет пропорциональна площади $s_p \omega_0 l$.

Номинальная мощность скольжения, на рассеяние которой рассчитана конструкция двигателя, пропорциональна площади O_{abs_H} . Сравним эту площадь с заштрихованной (O_{avs_p}), которая отражает потери в роторе двигателя при работе в точке «в». Она примерно в 3 раза превосходит номинальные потери в роторе. Естественно, что при длительной работе в указанном режиме ротор двигателя будет перегреваться, и двигатель выйдет из строя. Для того, чтобы можно было применить данный способ регулирования нужно установленную мощность двигателя зависить в 3 раза или применить специальную конструкцию интенсивного теплоотвода.

Поэтому регулирование скорости изменением напряжения питания возможно в том случае, если момент сопротивления M_c при снижении скорости существенно меньше номинального. Такой способ регулирования применяется иногда для привода насосов и вентиляторов, у которых момент сопротивления на валу резко снижается при уменьшении скорости. Этот случай рассмотрен на рис.1. 4, б. Поскольку со снижением скорости M_c уменьшается примерно в квадрате от величины снижения скорости, то мощность скольжения P_s со снижением скорости существенно снижается. Если нагрузка на валу двигателя носит вентиляторный характер, то максимальная величина мощности скольжения составляет 15% от мощности на валу при номинальной скорости. Поэтому для привода вентиляторов и насосов достаточно увеличение установленной мощности двигателя с повышенным скольжением в 1,5-2 раза [11, 12, 67, 69].

Снижение напряжения на статоре асинхронного двигателя иногда используется для уменьшения пусковых токов двигателя. Это возможно, если момент сопротивления на валу двигателя при пуске не превышает

(0,3-0,4) M_H (насосы, вентиляторы или другие рабочие машины, пуск которых производится вхолостую).

В этом случае посредством тиристорного регулятора напряжения напряжение, подводимое к обмотке статора, снижается, а затем по мере разгона двигателя увеличивается до номинального значения. Этим обеспечивается «плавный пуск» двигателя с уменьшенными пусковыми токами и сниженными динамическими нагрузками на рабочую машину [5].

Диаграмма изменения напряжения во времени на зажимах статора двигателя, реализуемая софтстартерами концерна АВВ, компании Schneider Electric и рядом других фирм, изображена на рис. 1. 5.

Приведем параметры пусковой диаграммы софтстартеров концерна АВВ. Первоначальная уставка пускового начального напряжения U_{n1} может варьироваться в пределах 10—60 % от номинального напряжения, что обеспечивает необходимый уровень пускового момента АД. Если при пуске АД требуется создать необходимый момент трогания, то возможно кратковременное в течение времени $t = 0,5$ с приложение к статору импульса напряжения с амплитудой до 90% от номинального напряжения. Продолжительность пуска t_n может варьироваться в пределах от 0,5 до 60 с, а продолжительность торможения t_o — от 0 до 240 с. Пусковой ток АД может устанавливаться в пределах (2—5) I_{Hb} , а диапазон изменения конечного напряжения $U_K = (30—100 \%)$ от U_H .

В случае снижения нагрузки на валу АД софтстартер автоматически снижает напряжение на зажимах статора до значения 0,6 U_H что обеспечивает экономию электроэнергии без ущерба для работоспособности привода. Однако это снижение возможно не ранее чем через 60 с после завершения разгона двигателя.

Регулирование напряжения на выходе софтстартера осуществляется с помощью тиристорных модулей, которыми управляет микропроцессор.

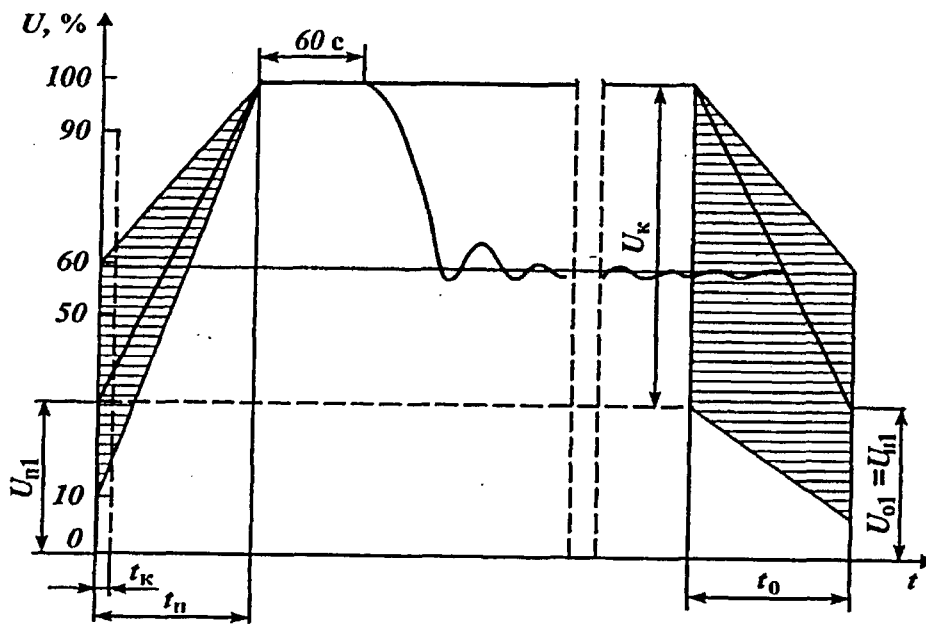


Рис. 1. 5. График напряжения на зажимах двигателя, получаемый с помощью софтстартера

Механические характеристики электродвигателя для различных способов пуска изображены на рис. 1. 6.

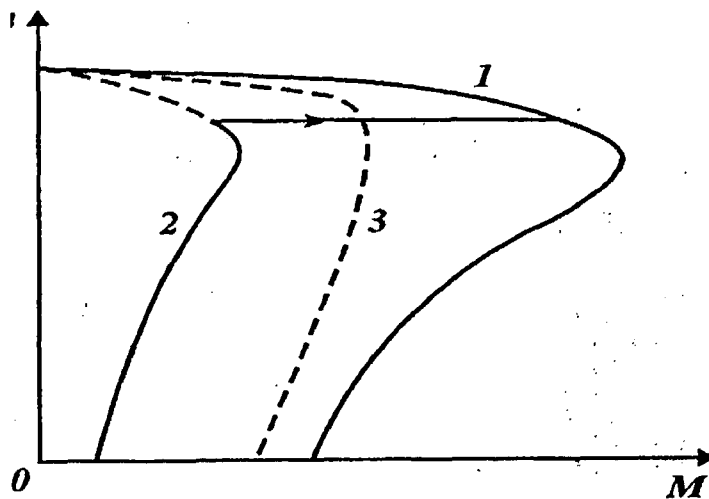


Рис.1. 6. Механические характеристики электродвигателя при различных способах пуска:

- 1- прямой пуск при полном напряжении сети;
- 2- переключение со звезды на треугольник;
- 3- от софтстартера

Концерн АВВ выпускает софтстартеры трех типов: PS А для пуска электродвигателей мощностью 4—30 кВт; PS D для электродвигателей

мощностью 37 — 450 кВт; PS DH для электродвигателей с тяжелыми условиями пуска (например, для механизмов с большим моментом инерции и для частых пусков). Они поставляются со встроенными реле перегрузки, имеющими зависимость от тока временную характеристику срабатывания.

Софтстартер осуществляет защиту электродвигателя от перегрузки и заклинивания ротора, короткого замыкания, обрыва фазы и несимметрии напряжений.

Согласование софтстартера с двигателем осуществляется по напряжению и току. Номинальный ток двигателя должен составлять от 70 до 100% максимально допустимого тока софтстартера.

1. 2. Общие принципы построения современных преобразователей частоты

Преобразователем частоты (ПЧ) называют полупроводниковый преобразователь, осуществляющий преобразование энергии переменного тока одной частоты в энергию переменного тока другой частоты.

подавляющее большинство наиболее распространенных схем можно разделить на два класса [1, 5, 72] :

- 1. ПЧ с непосредственной связью.**
- 2. ПЧ с промежуточным звеном постоянного тока.**

ПЧ различных фирм отличаются типами применяемых силовых полупроводниковых приборов, исполнением, видами защит и др., следует отметить общие принципы построения современных частотно-регулируемых электроприводов. Отметим некоторые из них:

1. Силовая часть:

Преобразователь частоты состоит из выпрямителя, фильтра постоянного напряжения и IGBT или, GTO - инвертора с модулем торможения в звене постоянного напряжения. Для снижения уровня радиопомех (кондуктивных, распространяющихся по проводам) на входе ПЧ может включаться блок

входного фильтра, для ограничения перенапряжений на зажимах приводного двигателя и защиты изоляции его обмоток от пробоя и ускоренного старения на зажимы двигателя включается блок выходного фильтра [10, 15].

2. Система управления:

Микропроцессорная, формирует сигналы управления инвертором согласно алгоритму, позволяющему максимально использовать напряжение источника с минимальными искажениями формы выходного напряжения, обеспечивая при этом [43, 44] :

- автоматическое определение параметров подключенного двигателя;
- самотестирование двигателя и технологических датчиков ;
- индикацию состояния двигателя дискретными сигналами ;
- цифровую индикацию на встроенном жидкокристаллическом дисплее ;
- текущих значений переменных электропривода (заданного и или фактического значения скорости, заданного и/или фактического значения параметра, например, давления, тока статора двигателя, напряжения сети, потребляемой мощности; параметров регулятора (способа ввода задания, начального направления вращения, времени разгона и торможения, максимального и минимального значений выходной частоты, пропорционального, интегрального дифференциального коэффициентов ПИД- регулятора и др.; значений уставок защиты (максимально-токовой, время- токовой и температурной двигателя, параметров частотно-токового ограничения, температурной преобразователя);
- просмотр и изменение параметров двигателя и регулятора со встроенного пульта управления при вводе пароля доступа к режиму программирования.

Для приема управляющих и задающих сигналов электропривод может содержать:

- аналоговые входы в стандарте 0... 10 В (0...5В), 0...+ 10В (0...+5 В);

- аналоговые входы с гальванической развязкой в стандарте 4...20мА;
- дискретные входы с гальванической развязкой.

Для управления внешними устройствами электропривод может содержать релейные и аналоговые выходы. Назначения цифровых входов и выходов могут быть перепрограммированы. Предусматривается также возможность увеличения числа входов/выходов с помощью дополнительных встраиваемых субмодулей расширения.

3. Система защит электропривода:

может включать защиты от:

- токов недопустимой перегрузки и короткого замыкания;
- замыкания на «землю»;
- обрыва фазы;
- перенапряжений на силовых элементах схемы;
- недопустимых отклонений и исчезновения напряжения питающей сети;
- недопустимого перегрева силовых элементов схемы;
- неисправностей и сбоев системы управления;
- недопустимых отклонений технологического параметра и др.

Кроме того могут быть предусмотрены режимы ограничения максимальной и минимальной мощности электропривода, минимальной рабочей частоты и других параметров [54, 55, 74].

4. Система сигнализации: электропривода сообщает о:

- наличии напряжения питающей сети;
- включенном/отключенном состоянии;
- аварийном отключении и др.

Дополнительная информация о состоянии электропривода выводится на дисплей пульта управления в виде текстовых сообщений или кодов.

Для получения высокого качества управления электроприводом в статических и динамических режимах в широком диапазоне регулирования скорости, в том числе в области нулевых скоростей, необходимо иметь возможность быстрого непосредственного управления моментом электродвигателя [78].

Современные средства микропроцессорной техники позволяют формировать сложные законы управления асинхронным двигателем, близкие по качеству регулирования момента, скорости и других величин к электроприводам с двигателями постоянного тока. Это становится возможным, если отдельно воздействовать на две составляющие статорного тока асинхронного двигателя: намагничивающую, определяющую значение магнитного потока двигателя, и ортогональную ей составляющую тока, определяющую момент двигателя, такое векторное представление составляющих тока для каждой фазы двигателя получило название векторного управления [76, 77].

Иными словами, в асинхронном двигателе необходимо обеспечить управление как амплитудой, так и фазой тока статора, то есть оперировать векторными величинами, чем и обусловлен термин векторное управление.

Синонимами данного термина, отражающими некоторое различие используемых методов измерения параметров и управления их фазой, являются: «управление полем», «ориентация поля», «прямое управление моментом», «регуляторы угла».

Основным узлом векторного управления является преобразователь сигналов задания магнитного потока и момента в сигналы задания токов для фаз двигателя. В системах микропроцессорного управления асинхронным двигателем эта задача решается программными средствами.

По соображениям универсальности и массового выпуска подавляющее число фирм производят частотно-регулируемые электроприводы с возможностью реализации для них векторного управления, применение

которого целесообразно для электроприводов, работающих в динамических режимах.

1. 2. Основание технические характеристики устройств плавного пуска

Фирма **Siemens** осуществляет выпуск софтстартеров **SIMOSTART MV** для пуска электродвигателей на напряжение 6 и 6,6 кВ. Намечается выпуск софтстартеров на напряжения 11 кВ и 13,8 кВ. Софтстартеры обеспечивают:

- ограничение пускового момента и тока двигателя;
- устранение гидравлического удара, а также механических ударов в передаточном механизме при пуске и останове турбомашин;
- нормальный пуск электродвигателя от автономного источника энергоснабжения соизмеряемой мощности, а также в слабых электрических сетях [5].

Элементной базой софтстартеров служат традиционные тиристоры, управление которыми осуществляется с помощью 32-х битового сигнального процессора. Возможно управление электродвигателем как по разомкнутому, так и по замкнутым контурам управления. В последнем случае используется сигнал обратной связи от датчика частоты вращения двигателя. Интерфейсы обмена данными в системе управления — **PROFIBUS, MODBUS**.

Имеется возможность с помощью программных средств реализовать импульс пускового напряжения с уровнем $0,8 U_{н}$ и регулируемой продолжительностью от 0,1 до 2 с.

Длительность нарастания (спадания) линейно изменяющегося во времени напряжения может регулироваться в диапазоне 1—30 с.

Установочными параметрами софтстартера являются: номинальный ток двигателя, начальное напряжение при пуске, пусковой ток, время разгона и

останова электропривода, продолжительность толчкового импульса пускового напряжения [77].

В софтстартере предусмотрены защит от:

перегрузки по току и моменту электродвигателя;

короткого замыкания в силовой цепи;

превышения температуры;

нарушения заземления;

превышения допустимой частоты пусков (более 4 пусков в час);

уменьшения напряжения ниже допустимого значения;

превышения напряжения сверх допустимого значения;

обрыва фазы;

несимметрии фазных напряжений и др.

В процессе функционирования на панели управления софтстартером отображается следующая информация:

продолжительность пуска (останова) электропривода;

недогрузка (перегрузка) по току;

напряжение сети и на зажимах электродвигателя;

фазные токи;

ток утечки;

коэффициент мощности электропривода;

температура нагрева софтстартера.

Кроме того, на экране ЖКИ могут быть отображены следующие расчетные параметры: продолжительность пуска (останова), несимметрия фазных токов, относительная величина тока нагрузки в долях от номинального значения тока софтстартера и др.

Помимо указанных величин в процессе эксплуатации накапливаются данные об израсходованном моторесурсе, числе завершенных пусков и остановов, продолжительность пуска и останова последнего цикла, максимальной пусковой ток последнего пуска, причины последнего сбоя пуска и др [5].

По данным фирмы Siemens капитальные затраты при внедрении софтстартера в 4—5 раз ниже чем на частотно-регулируемый электропривод одинаковой мощности. При этом софтстартер выполняет большинство функций частотно-регулируемого электропривода.

Технические характеристики софтстартеров **SIMOSTART MV** на напряжение 6 и 6,6 кВ приведены в табл. 1. 1.

Таблица 1.1

Технические характеристики софтстартера на напряжение 6 и 6,6 кВ фирмы Siemens

Ток, А	Мощность двигателя, управляемого От софтстартера, кВт		Масса софтстартера, кг
	6 кВ	6,6 кВ	
70	590	650	690
140	1200	1300	690
250	2200	2400	695
300	2700	3000	720
400	3600	4000	750
600	4500	5000	800

Корпорацией Триол разработан ряд тиристорных пускателей серии **Триол АП11** для мягкого пуска асинхронных электродвигателей на напряжение 0,4 кВ. мощностью от 45 до 315 кВт.

Пускатель представляет собой тиристорный регулятор трехфазного напряжения с микропроцессорной системой управления. В каждую фазу пускателя включены два встречнопараллельно соединенных тиристора и датчик тока. Реверсивное исполнение пускателя содержит пять пар встречнопараллельных тиристорov с перекрестным соединением фаз.

Тиристорные модули с изолированными (беспотенциальными) корпусами устанавливаются на групповом охладителе из алюминиевого сплава. Охлаждение моделей – воздушное принудительное от встроенного вентилятора.

Для установки и отображения параметров и режимов работы пускатель оснащен пультом управления с клавиатурой и дисплеем.

Программируемыми параметрами АП11 являются: начальное напряжение пуска, кратность пускового тока двигателя, время разгона, уставки токовой защиты. Пускатель обеспечивает:

Ограничение пусковых токов двигателя на заданном уровне в диапазоне (0,8- 2) номинального значения;

Значительное снижение механических ударов в передаточном механизме и оборудовании;

Задание требуемого ускорения при разгоне электропривода;

Непосредственное подключение после разгона АД к сети в обход софтстартера;

Реверс электродвигателя;

Устранение недопустимых посадок напряжения в сети при пуске двигателя.

Наиболее целесообразная область применения пускателей – пуск рабочих машин с вентиляторной характеристикой, не требующих технологического регулирования скорости [5, 78].

2. Моделирование асинхронных электроприводов с пусковыми устройствами

2. 1. Математическая модель асинхронного электродвигателя, переменного тока для исследования устройств плавного и частотного пуска.

Выражение для электромагнитного момента. Электромагнитный момент, развиваемый электромагнитными силами на роторе асинхронной машины, определяется равенством [14, 46]

$$M = P_{MX} / \Omega \quad (2. 1)$$

где P_{MX} — механическая мощность на роторе, определяемая выражением

$$P_{MX} = m_1 I_2'^2 r_2 \frac{1-s}{s} = m_2 I_2^2 r_2 \frac{1-s}{s} \quad (2. 2)$$

Ω - Механическая угловая скорость вращения ротора

Механическая угловая скорость вращения магнитного поля основной гармоники или на основании выражения

$$\Omega_1 = 2\pi f_1 / p = \omega_1 / p \quad (2. 3)$$

Так как скорость вращения ротора $n = (1-s)n_1$, то механическая угловая скорость вращения ротора

$$\Omega = 2\pi n = 2\pi(1-s)n_1 = (1-s)\Omega_1 = \frac{(1-s)\omega_1}{p} \quad (2. 4)$$

На основании равенств (2. 1), (2. 2) и (2. 4)

$$M = \frac{pm_1}{\omega} I_2'^2 \frac{r_2'}{s} \quad (2. 5)$$

Величину M можно определить также по электромагнитной мощности $P_{эм}$ и Ω_1 как $P_{эм} / \Omega_1$. Подставив сюда $P_{эм}$ из $P_{эм} = m_1 I_2'^2 \frac{r_2'}{s} = m_2 I_2''^2 \frac{r_2'}{s}$ и Ω_1 из уравнения (2.3), получим результат, совпадающий с (2.5)

Выразим M через приложенное фазное напряжение U_1 , параметры машины и скольжение [11, 12]. Для этого выразим через эти величины I_2' и подставим в (2.5).

Полагая ввиду малости аргумента γ_1 коэффициент C_1 равным его модулю, на основании выражения $I_2' = C_1 I_2''$ и схемы замещения рис. 2.1. имеем

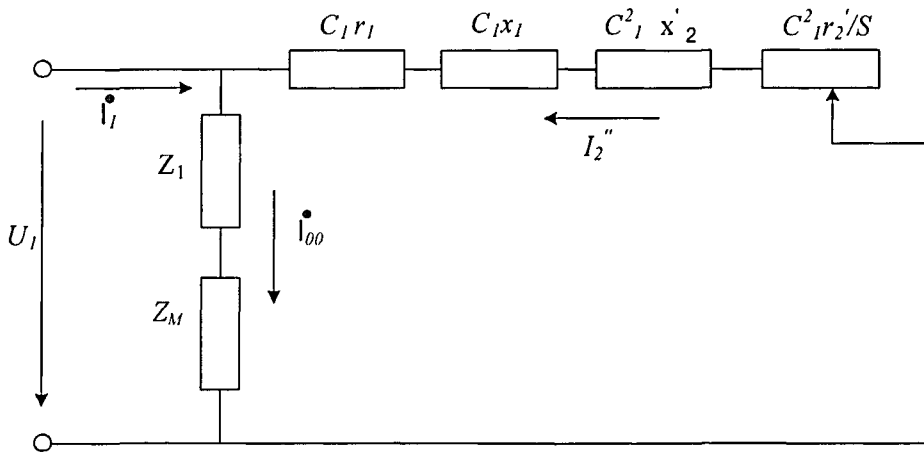


Рис. 2.1. Г-образная схема замещения асинхронной машины

$$I_2' = C_1 I_2'' = \frac{C_1 U_1}{\sqrt{(c_1 r_1 + c_1^2 \frac{r_2'}{s})^2 + (c_1 x_1 + c_1^2 x_2')^2}}$$

или

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{(r_1 + c_1 \frac{r_2'}{s})^2 + (x_1 + c_1 x_2')^2}} \quad (2.6)$$

Таким образом, из основании равенств (2.5) и (2.6)

$$M = \frac{pm_1 U_1^2 \frac{r_2'}{s}}{\omega_1 \left[\left(r_1 + c_1 \frac{r_2'}{s} \right)^2 + (x_1 + c_1 x_2')^2 \right]} \quad (2.7)$$

При увеличении скольжения от $S=0$ до $S=S_m$ момент M растет вместе с увеличением S , а при дальнейшем увеличении скольжения момент M уменьшается, несмотря на увеличение I_2' (рис. 2. 2). Такой ход кривой $M = f(s)$ объясняется тем, что с увеличением S ток I_2' становится по своему характеру все более индуктивным. Поэтому активная составляющая I_2' которая определяет величину M , при увеличении S сначала растет вместе с I_2' , а затем начинает уменьшаться, несмотря на увеличение I_2' . Следует также учитывать, что с увеличением I_1 падение напряжения в первичной цепи увеличивается а соответственно этому эдс (E_1) и поток Φ , во взаимодействии с которым создается момент, несколько уменьшаются [14, 28].

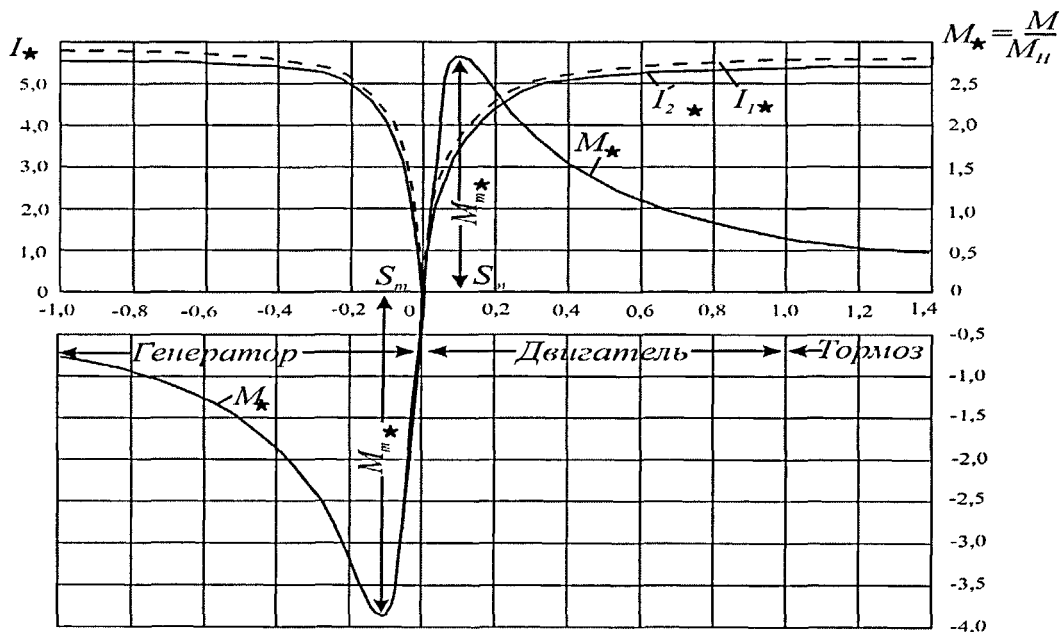


Рис. 2. 2. Кривые электромагнитного момента и токов асинхронной машины

Необходимо отметить, что на статор электрической машины действует такой же вращающий момент, как и на ротор, но направленный в

противоположную сторону. Момент, действующий на статор, воспринимается деталями и узлами, крепящими машину к фундаменту.

Выражение для электромагнитного момента (2. 7) верно в общем случае, т. е. также тогда, когда параметры r_1, x_1, r_2', x_2' не постоянны и зависят от величин токов и скольжения. В этом случае при каждом значении a в выражение (2. 7) нужно подставлять соответствующие значения указанных параметров. Ограничимся здесь рассмотрением машины с постоянными параметрами и исследуем зависимость $M=f(s)$ по формуле (2. 7) при $U_1 = \text{const}$ и $f_2 = \text{const}$ на максимум и минимум [42, 43]. Вместо x удобнее рассматривать переменную величину

$$y = \frac{1}{s} \quad (2. 8)$$

и тогда соотношение (2. 7) можно представить в виде

$$M = \frac{Ay}{B + Cy + Dy^2} \quad (2. 9)$$

где

$$A = \frac{pm_1 U_1^2 r_2'}{\omega_1}; \quad B = r_1^2 + (x_1 + c_1 x_2')^2; \quad C = 2c_1 r_1 r_2'; \quad D = c_1^2 r_2'^2 \quad (2. 10)$$

Взяв от (2. 9) производную по y и приравняв ее нулю, получим уравнение для определения значений $y = y_m$, при которых M имеет экстремумы:

$$\left[\frac{dM}{dy} \right]_{y=y_m} = \frac{A(B - Dy_m')}{(B + Cy_m + Dy_m')^2} = 0 \quad (2- 11)$$

Уравнение (2. 11) удовлетворяется в случае, когда его числитель равен нулю. Тогда

$$y = \pm \sqrt{\frac{B}{D}} \quad \text{или} \quad s = \pm \sqrt{\frac{D}{B}} \quad (2. 12)$$

что с учетом равенств (2. 10) дает

$$S_m = \pm \frac{c_1 r_2'}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + c_1 x_2')^2}} \quad (2. 13)$$

Скольжение S_m называется критическим.

Максимальные значения момента получим при подстановке $y = y_m$ из (2. 13) в (2. 10);

$$M_m = \pm \frac{A}{\pm C + 2\sqrt{BD}} \quad (2. 14)$$

или при подстановке значений А, В, С, D из (2- 10) в (2- 14):

$$M_m = \pm \frac{pm_1 U_1^2}{2\omega_1 c_1 \left[\pm r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + c_1 x_2')^2} \right]} \quad (2. 15)$$

В этих соотношениях знаки плюс относятся к двигательному, а знаки минус – к генераторному режиму работы [14, 46].

Для нормальных асинхронных машин члены с r_1 в выражениях (2. 13) и (2. 15). Мала по сравнению с остальными. Полагая поэтому $r_1 = 0$, имеем

$$S_m \approx \pm \frac{c_1 r_2'}{x_{\sigma 1} + c_1 x_{\sigma 2}'} \quad (2. 16)$$

$$M_m \approx \pm \frac{pm_1 U_1^2}{2\omega_1 c_1 (x_1 + c_1 x_2')} \quad (2. 17)$$

Полученные соотношения позволяют сделать вывод, что величина максимального момента, во-первых, не зависит, согласно выражениям (2. 15) и (2. 17), от величины активного сопротивления вторичной цепи, во-вторых, пропорциональна квадрату напряжения, в-третьих, с большой точностью обратно пропорциональна индуктивным сопротивлениям рассеяния и, в-четвертых, в генераторном режиме несколько больше, чем в двигательном. Так как $U_1 \sim f\Phi$, то из выражения (2. 17) можно сделать также вывод, что максимальный момент пропорционален квадрату магнитного потока машины.

Весьма важно подчеркнуть, что, хотя момент M_m не зависит от вторичного активного сопротивления, величина скольжения S_m при котором наблюдается этот момент, согласно выражениям (2. 13) и (2. 16), пропорциональна этому сопротивлению [14, 53].

У асинхронных двигателей нормального исполнения кратность максимального момента при номинальном напряжении

$$K_m = \frac{M_m}{M_H} = 1.7 \div 3.0$$

и $S_m = 0,06 — 0,15$. Более высокие K_m имеют двигатели с малым числом полюсов.

Применим соотношение (2. 5) для номинального режима работы (индекс «н») и для режима с максимальным моментом (индекс m).

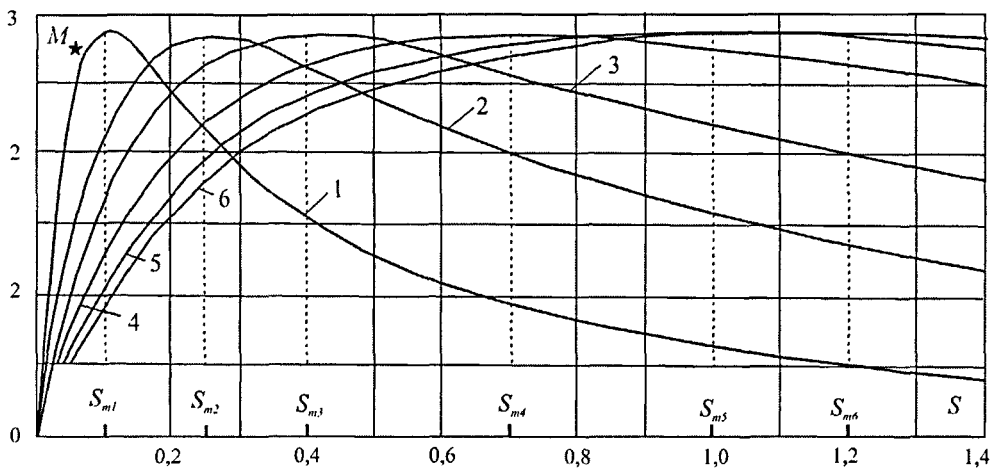


Рис2. 3. Кривые электромагнитного момента асинхронной машины при различных значениях активного сопротивления вторичной цепи

Тогда найдем отношение тока I'_{2m} при $S = S_m$ к току $I'_{2H} = I'_{2m}$ при $S = S_m$;

$$\frac{I'_{2m}}{I'_{2H}} = \sqrt{\frac{S_m M_m}{S_H M_H}} \quad (2. 18)$$

Обычно у асинхронных двигателей это отношение находится в пределах

2,5 -3,5.

В качестве иллюстрации к изложенному на рис. 2. 3 представлены кривые $M = f(s)$ для разных значений r_2' , в двигательном режиме работы той же асинхронной машины мощностью 15 кВт, как и на рис. 2. 3. Отметим, что величина r_2' включает в себя как активное сопротивление самой вторичной обмотки, так и сопротивление реостата, который может быть включен во вторичную цепь машины с фазным ротором. Кривая 1 на рис. 2. 3. соответствует нормальному значению r_2' вторичной обмотки, а остальные кривые повышенным значениям r_2' или случаю включения реостата во вторичную цепь [51].

Начальный пусковой электромагнитный момент:

M_n соответствует значению электромагнитного момента в начальный момент пуска двигателя, т. е. при $s=1$. Согласно выражению (2. 7), [42]

$$M_n = \frac{pm_1 U_1^2 r_2'}{\omega_1 [(r_1 + c_1 r_2')^2 + (x_1 + c_1 x_2')^2]} \quad (2. 19)$$

Пусковой момент при данных значениях параметров машины также пропорционален квадрату приложенного напряжения.

Из выражения (2. 19) и рис.2. 3 следует, что с увеличением r_2' момент M_n растет до тех пор, пока при $s_m = 1$ не будет $M_n = M_m$ -При этом, согласно равенству (2. 13),

$$r_2' = \frac{1}{c_1} \sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2')^2}. \quad (2. 20)$$

При дальнейшем увеличении r_2' момент M_n будет снова уменьшаться. В то же время пусковое значение тока [61]

$$[I_2']_{s=1} = I_{2n}$$

при увеличении r_2' согласно выражению (2. 6), непрерывно уменьшается, Увеличение M_n несмотря на уменьшение I_2' при увеличении r_2' до значения, определяемого равенством (2. 20), объясняется тем, что при этом уменьшается угол сдвига φ_2 между током I_2' и эд.с E_2 .

Рассмотрим работу асинхронного двигателя с обмотки которого замкнуты накоротко.

2.2. Особенности характеристик асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором

Как было показано выше, формирование пусковых характеристик двигателей с фазным ротором производится путем введения в цепь ротора дополнительного активного сопротивления и уменьшения величины этого сопротивления по мере разгона двигателя (уменьшения скольжения).

В короткозамкнутых асинхронных двигателях введение дополнительного сопротивления в цепь ротора невозможно. Однако тот же результат может быть получен, если воспользоваться эффектом вытеснения тока на поверхность проводника [58, 64]. Сущность этого явления состоит в следующем. Согласно закону Фарадея при протекании по проводнику переменного тока в нем индуцируется Э.Д.С. самоиндукции, направленная против тока

$$e_L = -\frac{d\phi}{dt} = -L \frac{d(I_m \sin \omega t)}{dt} = -L\omega I_m \cos \omega t$$

$$\text{или } e_L = -2\pi f L I_m \cos \omega t \quad (2. 21)$$

Величина этой ЭДС зависит от величины тока I_m , его частоты и индуктивности, определяемой характеристикой среды, окружающей проводник. Если проводник находится в воздухе, то магнитная проницаемость среды очень мала, следовательно, мала индуктивность L . В этом случае при частоте 50Гц ($\omega=314$ 1/с) влияние эдс самоиндукции незначительно. Другое дело, когда

проводник помещен в тело магнитопровода. Тогда индуктивность многократно увеличивается и ЭДС самоиндукции, направленная против тока, играет роль индуктивного сопротивления, препятствующего протеканию тока.

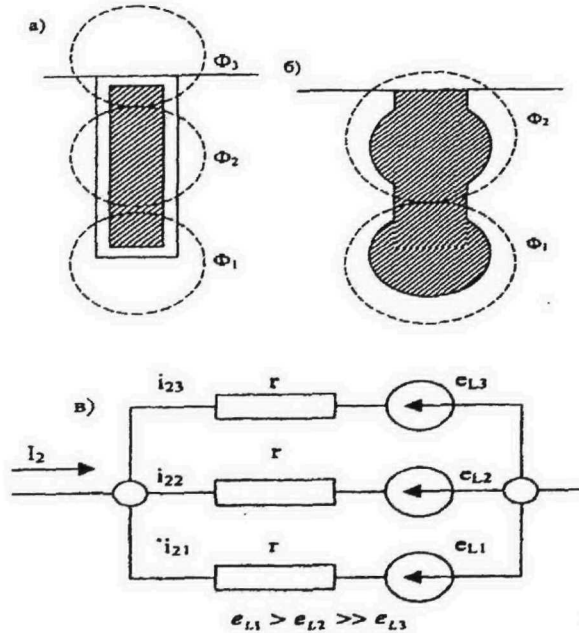


Рис.2. 4. Конструкция ротора асинхронного к.з.двигателя с глубоким пазом (а), с двойной клеткой (б) и эффект вытеснения тока (в)

Рассмотрим проявление действия эдс самоиндукции для случая проводника (стержня обмотки ротора), помещенного в глубокий паз магнитопровода ротора двигателя (рис. 2. 4, а). Условно разделим сечение стержня на три части, которые соединены параллельно. Ток, протекающий по нижней части стержня образует поток Φ_1 , магнитные силовые линии которого замыкаются по магнитопроводу [65, 66]. В этой части проводника возникает эдс самоиндукции e_L большой величины, направленная против тока i_{21} .

Ток i_{23} , протекающий по верхней части стержня роторной обмотки также образует поток Φ_3 , но, так как силовые линии этого потока наполовину своей длины замыкаются по воздуху, то величина потока Φ_3 будет гораздо меньше, чем потока Φ_1 . Отсюда и эдс e_{L3} будет во много раз меньше, чем e_{L1} .

Указанное распределение эдс самоиндукции по высоте стержня характерно для того режима, когда частота тока ротора велика - близка к 50Гц. В этом случае, поскольку все три части стержня ротора соединены параллельно (рис. 2. 4, в), то ток ротора I_2 пойдет по верхней части стержня. Это явление называют вытеснением тока на поверхность паза. При этом эффективное сечение стержня, по которому идет ток, будет в несколько раз меньше, чем общее сечение стержня обмотки ротора [14, 67]. Таким образом, увеличивается активное сопротивление ротора r_2 . Отметим, что поскольку эдс самоиндукции зависит от частоты тока (т.е. от скольжения), то и сопротивления r_2 и x_2 являются функциями скольжения [14, 46].

Поэтому в расчетах необходимо зависимости $r'_{2s} = r'_{2s}(s)$ и $x'_{2s} = x'_{2s}(s)$. При этом используются зависимости

$$r'_{2s} = r'_{2s} + k_r r'_{2co}; \quad (2. 22)$$

$$x'_{2s} = x'_{2s} + k_x x'_{2co}, \quad (2. 23)$$

где r'_{2s} и x'_{2s} - соответственно активное индуктивное сопротивление частей обмотки ротора, находящихся в воздухе; r'_{2co} и x'_{2co} - соответственно активное индуктивное сопротивление частей обмотки ротора, находящихся в стали, при скольжении s , соответствующем режиму холостого хода; k_r и k_x - коэффициенты, определяемые по следующим выражениям:

$$k_r = \epsilon [\operatorname{sh}(2 \epsilon) + \sin(2 \epsilon)] / [\operatorname{ch}(2 \epsilon) - \cos(2 \epsilon)];$$

$$k_x = 3 [\operatorname{sh}(2 \epsilon) - \sin(2 \epsilon)] / 2 \epsilon [\operatorname{ch}(2 \epsilon) - \cos(2 \epsilon)],$$

где $\epsilon = h\sqrt{s}$ (h - высота стержня в пазу ротора).

Сопротивления r'_{2s} , x'_{2s} , r'_{2co} и x'_{2co} определяются по формулам

$$r'_{2s} = a r_{2o}; \quad x'_{2s} = a x_{2o}; \quad r'_{2co} = (1 - a) r_{2o}; \quad x'_{2co} = (1 - a) x_{2o},$$

где a - доля обмотки в воздухе (0,05 - 0,2); r_{2o} , x_{2o} - сопротивления обмотки ротора при s , соответствующем режиму холостого хода [14, 41, 70].

При пуске, когда скольжение велико, сопротивление r_2 увеличивается (в цепь ротора как бы вводится добавочное сопротивление). По мере разгона

двигателя скольжение двигателя уменьшается, эффект вытеснения тока ослабевает, ток начинает распространяться вниз по сечению проводника, сопротивление r_2 уменьшается. При достижении рабочей скорости частота тока ротора настолько мала, что явление вытеснения тока уже не сказывается, ток протекает по всему сечению проводника, и сопротивление r_2 минимально. Благодаря такому автоматическому изменению сопротивления r_2 , пуск асинхронных короткозамкнутых двигателей протекает благоприятно: пусковой ток составляет 5,0-7,0 номинального, а пусковой момент 1,1-1,3 номинального [76].

Варьировать параметрами пусковой характеристики асинхронного двигателя можно меняя форму паза, а также сопротивление материала стержней (состав сплава). Наряду с глубокими пазами применяются двойные пазы, образующие двойную «беличью клетку» (рис.2.4, б); используются пазы грушевидной формы и другие [48].

На рис.2.5 представлены типовые механические характеристики для некоторых серий асинхронных короткозамкнутых двигателей. Различают:

- а) двигатели нормального исполнения;
- б) двигатели с повышенным скольжением;
- в) двигатели с повышенным пусковым моментом;
- г) двигатели краново-металлургических серий.

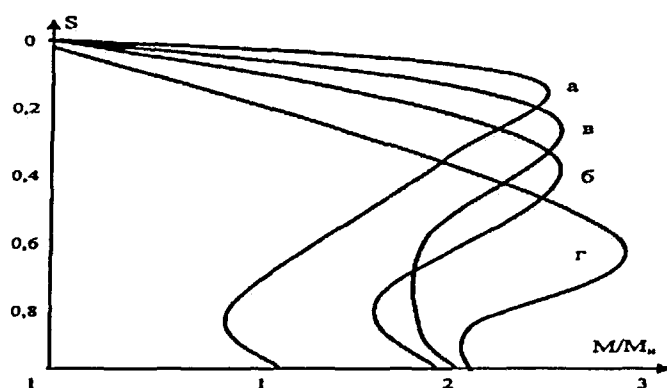


Рис.2. 5. Примерные механические характеристики асинхронных короткозамкнутых двигателей

Короткозамкнутые двигатели нормального исполнения используются для привода широкого класса рабочих машин и механизмов, прежде всего для приводов, работающих в длительном режиме [69]. Для этого исполнения характерно высокое значение. Для этого исполнения характерно высокое значение КПД и минимальная величина номинального скольжения. Механическая характеристика в области больших скольжений имеет обычно небольшой провал, характеризуемый величиной минимального момента M_{min} .

Двигатели с повышенным скольжением имеют более мягкую механическую характеристику и используются в следующих случаях: когда два или более двигателя работают на общий вал, для механизмов (например, кривошипно-шатунных) с циклически изменяющейся нагрузкой, когда для преодоления сопротивления движению целесообразно использовать кинетическую энергию, запасаемую в движущихся частях электропривода и для механизмов, работающих в повторно-кратковременном режиме.

2.3. Моделирование систем частотного пуска

При частотном управлении электромагнитный момент асинхронного двигателя зависит от частоты и напряжении переменного тока, питающего статор электрической машины. Наличие двух независимых каналов управления (уровнем напряжения и частотой) дает возможность реализовать в системе преобразователь частоты — асинхронный двигатель (ПЧ — АД) различные законы управления. Академиком М.П. Костенко установлено, что при сохранении постоянной перегрузочной способности двигателя $\lambda = M_k / M_n$ (где M_k , M_n - соответственно критический (максимальный) и номинальный моменты электродвигателя) регулирование параметров двигателя и сети должно осуществляться по закону [5, 43].

$$\left(\frac{\phi_1}{\phi_2}\right)^2 = \frac{M_1}{M_2} \cdot \frac{U_1}{U_2} \approx \frac{f_1 \phi_1}{f_2 \phi_2}, \quad (2.24)$$

где M_1 , M_2 — значения электромагнитного момента, соответствующие величинам магнитного потока Φ_1 , и Φ_2 ; U_1 , U_2 значения напряжений на статоре; f_1 , f_2 - значения частоты переменного тока, питающего статор двигателя.

Если индексы величин знаменателей в формулах (2. 24) отнести к номинальным значениям (напряжению и частоте тока сети), то можно записать

$$\frac{U_1}{U_H} = \frac{f_1}{f_H} \sqrt{\frac{M_1}{M_H}} \quad (2.25)$$

где U_1 , f_1 напряжение частота на выходе преобразователя частоты.

Обозначив $U_1/U_H = \gamma$; $f_1/f_2 = \alpha$; $M_1/M_H = \mu$, окончательно получим

$$\gamma = \alpha \sqrt{\mu} \quad (2.26)$$

Управляя двигателем в соответствии с выражением (2. 26) при ненасыщенной магнитной системе электрической машины, можно сохранить практически неизменным коэффициент мощности, скольжение, перегрузочную способность независимо от изменения частоты вращения [14].

Виды нагрузки определяют различные формы взаимосвязанного статического управления напряжением и частотой. При постоянном моменте нагрузки

$$\gamma = a \text{ или } U/f = \text{const.} \quad (2.27)$$

При постоянной мощности $P = cMf = \text{const}$, здесь c - конструктивная постоянная двигателя, будем иметь

$$\gamma = \sqrt{\frac{M_1 f_1^2}{M_H f_H^2}} = \sqrt{\frac{Pf_1}{Pf_2}} = \sqrt{a}$$

Часто нагрузка зависит от скорости

$$M_1 = M_H \left(\frac{w_1}{w_h} \right)^n = M_H \left(\frac{f_1}{f_2} \right)^n \text{ или } \mu = \alpha^n \quad (2.28)$$

При вентиляторной нагрузке ($n = 2$) будем иметь

$$\gamma = f_1^2 / f_H^2 = \alpha^2$$

При анализе электромеханических характеристик асинхронных двигателей, работающих при постоянной номинальной частоте питающего напряжения, сопротивлением r_1 обычно пренебрегают. Если же двигатель работает с переменной частотой напряжения, то при снижении частоты сопротивление r_1 становится соизмеримым с реактивными сопротивлениями машины, и учет сопротивления r_1 является необходимым [39, 56, 46].

Мощность скольжения, выделяемая в цепи ротора, определяется формулой (2.29) и расходуется на нагрев обмоток ротора.

$$p_s = M\omega_0 s_j = 3I_2'^2 r_2', \text{ откуда}$$

$$M = \frac{3I_2'^2 r_2'}{\omega_0 s_j} \quad (2.29)$$

Из схемы замещения определим значение I_2'

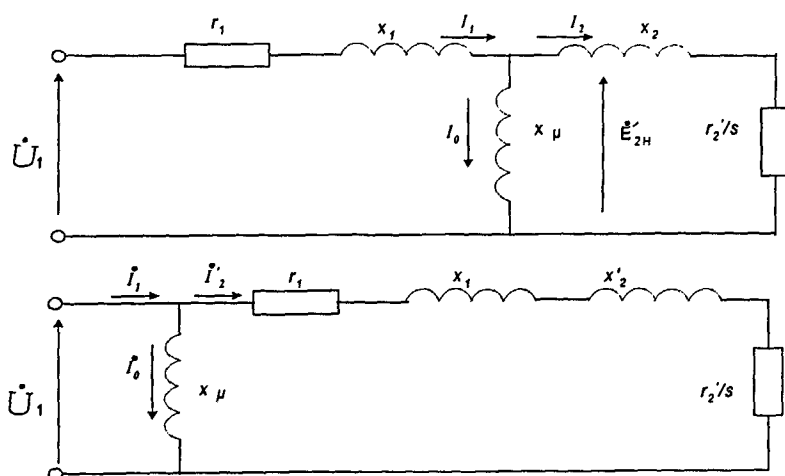


Рис.2. 6. Схемы замещения асинхронного двигателя (АД)

$$I_2' = \frac{U_{1j} x_{\mu H} f_{1*}}{\sqrt{\left[\frac{r_1 r_2'}{s_j} - x_{1H} x_{2H} f_{1*}^2 - x_{\mu H} x_{kH} f_{1*}^2 \right]^2 + \left[r_1 (x_{2H} + x_{\mu H}) f_{1*} + \frac{r_2'}{s_j} (x_{1H} x_{\mu H}) f_{1*}^2 \right]^2}} \quad (2.30)$$

Если учесть, что отношения $\frac{x_{1H}}{x_{\mu H}}$ и $\frac{x'_{2H}}{x_{\mu H}}$ гораздо меньше единицы и ими можно пренебречь, то выражение (2.30) можно упростить:

$$I_2' = \frac{U_{1j}}{\sqrt{x_{kH}^2 f_{1*}^2 + \left[r_1 + \frac{r_2'}{s_j} \right]^2 + \left[\frac{r_1 r_2'}{s_j x_{\mu H} f_{1*}} \right]^2}} \quad (2.31)$$

Подставив (2.31) в (2.29) получим формулу для механических характеристик при переменных значениях величины и частоты напряжения питания

$$M = \frac{3U_{1j}^2 r_2'}{\omega_{0j} s_j \left[x_{kH}^2 f_{1*}^2 + \left(r_1 + \frac{r_2'}{s_j} \right)^2 + \left(\frac{r_1 r_2'}{s_j x_{\mu H} f_{1*}} \right)^2 \right]} \quad (2.32)$$

Заметим, что если положить $\frac{r_1}{x_{\mu H}} = 0$ и $f_{1*} = 1$, то формула (2.32) станет идентичной формуле для механических характеристик нерегулируемого по частоте асинхронного двигателя.

Положив $\frac{dM}{ds_j} = 0$, найдем значения критического момента и критического скольжения

$$M_k = \frac{3U_{1j}^2}{2\omega_{0j} \left[r_1 \pm \sqrt{(r_1^2 + x_{kH}^2 f_{1*}^2) \left(1 + \frac{r_1^2}{x_{\mu H}^2 f_{1*}^2} \right)} \right]} \quad (2.33)$$

$$s_{kj} = \pm r_1' \sqrt{\frac{1 + \left(\frac{r_1}{x_{\mu H} f_{1*}} \right)^2}{r_1'^2 + x_{kH}^2 f_{1*}^2}} \quad (2.34)$$

Знак (+) соответствует двигательному режиму, знак (-) режиму рекуперативного торможения. Анализируя выражение (2.33), можно установить, что, если пренебрегать величиной активного сопротивления статора ($r_1=0$), то, для того чтобы при частотном регулировании (уменьшении частоты вниз от номинальной) сохранять критический момент постоянным, нужно величину напряжения изменять пропорционально изменению частоты.

$$\frac{U_{1*}}{f_{1*}} = const, \quad (2.35)$$

где $U_{1*} = \frac{U_{1j}}{U_{1H}}$

Механические характеристики привода, сохраняющего теоретически постоянство перегрузочной способности двигателя при указанных видах нагрузки, изображены на рис. 2. 7. Однако, как видно из графиков, изображенных пунктирными линиями, сохранить постоянство перегрузки двигателя не удастся. Это связано с тем, что с уменьшением частоты растет влияние падения напряжения в активном сопротивлении статорной цепи, которое при выводе основных законов управления не учитывалось.

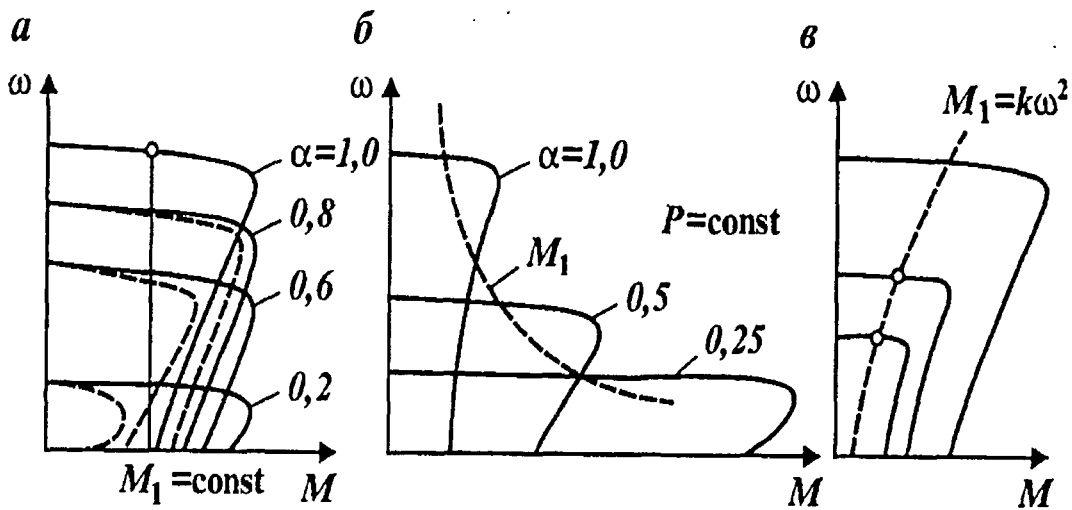


Рис. 2. 7. Механические характеристики привода, управляемого по системе преобразователь частоты - асинхронный двигатель:
 а — при постоянном моменте;
 б — при постоянной мощности;
 в — при вентиляторной нагрузке

В разомкнутых системах ПЧ — АД не удастся достичь большого диапазона регулирования скорости, поскольку в значительной степени проявляется статизм (влияние изменения момента нагрузки на механическую характеристику привода). Например, уже при диапазоне регулирования 6:1 статизм может достигать около 30 %. В частотно-управляемых замкнутых системах диапазон регулирования скорости расширяется до 50:1 и более, а в асинхронных приводах с векторным принципом управления до 1000:1 и более.

Для того, чтобы реализовать принцип частотного управления, необходимо в соответствии с выражением (2. 25) взаимосвязано управлять напряжением на статоре асинхронной машины при изменении частоты [5].

Для синхронных двигателей привода турбомашин целесообразно следующее пропорциональное соотношение между частотой и напряжением:

$$\frac{U_1}{U_H} = \frac{f_1}{f_H} \text{ или } \frac{U_1}{f_1} = \frac{U_H}{f_H} = const .$$

частотно-регулируемый электропривод с синхронными двигателями как правило выполняется с ПЧ, имеющими автономный инвертор тока (АИТ).

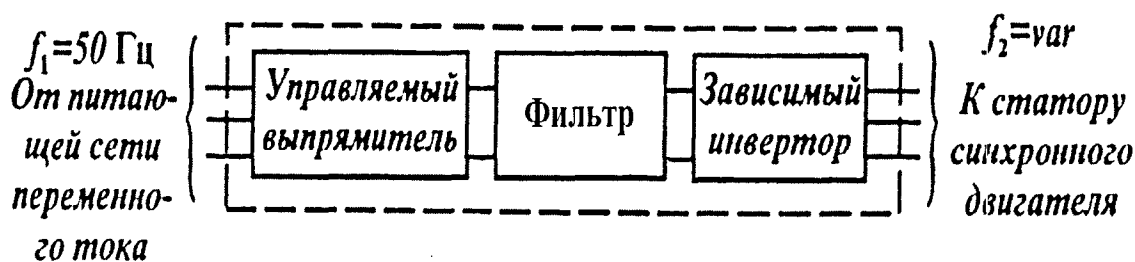


Рис. 2. 8. Тиристорный преобразователь частоты

Для моделирования процессов частотного пуска АД необходимо учесть зависимость параметров схемы замещения от частоты тока ротора. В качестве модели асинхронного двигателя принята Т-образная схема замещения, дополненная ветвью учета магнитных потерь в роторе предложенная и разработанная ассистентом кафедры А. А. Трифионовым. Изображены на рис.2.9.

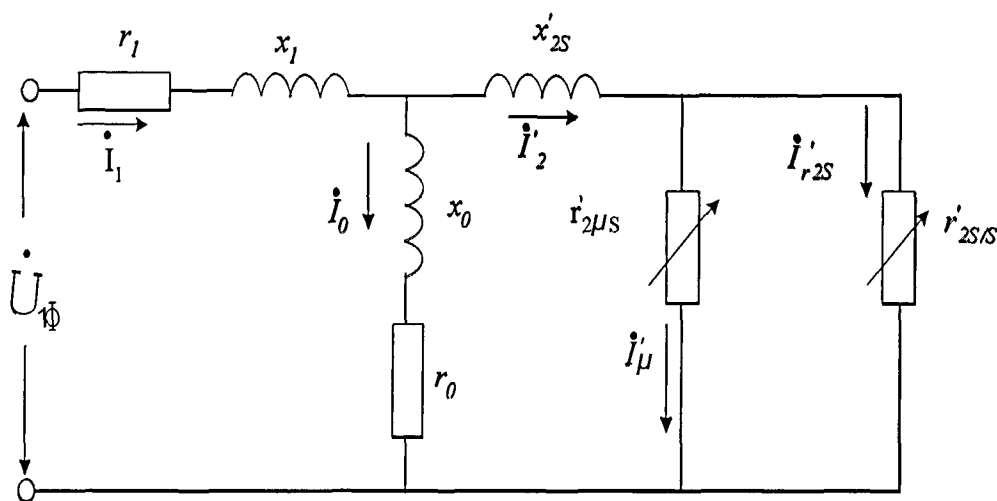


Рис. 2. 9. Т-образная схема замещения асинхронного двигателя с учетом магнитных потерь в роторе

При использовании модули прямоугольного раза используются формулы для моделирование в них следует ввести некоторые дополнение. обозначим $g = f_1 / f_{\text{ном}}$, тогда величина ε должна определяться

$$\varepsilon = h \sqrt{S \cdot g}$$

Параметра схемы замещения могут быть записаны следующим образом :

$$\begin{aligned} r'_1 &= r'_1{}^{(50)} = \text{const.} ; & r'_{2s} &= r'_{20}{}^{(50)} \cdot \alpha + r'_{20}{}^{(50)} \cdot (1 - \alpha) \cdot K_r \\ x_1 &= x_1{}^{(50)} \cdot g ; & x_2' &= x_2'{}^{(50)} \cdot \alpha \cdot g + x_2'{}^{(50)} \cdot (1 - \alpha) \cdot g \cdot K_x \\ x_0 &= x_0{}^{(50)} \cdot g ; & r_0 &= r_0{}^{(50)} = \text{const.} \end{aligned}$$

$$r'_{2\mu y} = \frac{r'_{2\mu 1}}{\alpha s + (1 - \alpha) s^2}$$

$$R = \frac{r'_{2\mu s} \cdot \frac{r'_{2s}}{\varepsilon}}{r'_{2\mu s} + \frac{r'_{2s}}{\varepsilon}} \quad (2. 36)$$

Верхним индексом (50) обозначены параметры схемы замещения при номинальном значении частоты падающей сети. Дальнейшее моделирование производится также как для системы плавного пуска.

2.4. Моделирование систем плавного пуска

Рассматриваются следующие способы пуска: прямой пуск, пуск переключением звезда-треугольник, плавный пуск (система softstart). Предусмотрена возможность задания параметров питающей сети эквивалентными значениями ЭДС (E) и полного сопротивления (Z_s) [44]. Для всех случаев использована электромеханическая модель асинхронного двигателя. Таким образом, переходный процесс описывается одним дифференциальным уравнением:

$$J \, d\omega/dt = M_d(\omega) - M_c(\omega) \quad (2. 37)$$

Механическая характеристика рабочего механизма - зависимость $M_c(\omega)$ описывается полиномом целой степени:

$$M_c(\omega) = M_0 - (M_{ном} - M_0) \cdot (\omega/\omega_0)^Y \quad (2. 38)$$

Предусматривается возможность расчета пуска при разгрузке привода до значения $M_{пуск} > M_0$.

В качестве модели асинхронного двигателя принята T-образная схема замещения, дополненная ветвью учета магнитных потерь в роторе [56]. В схеме замещения учитывается переменность параметров роторной цепи, обусловленная явлением вытеснения тока в стержнях роторной обмотки.

Уравнение (2. 37) решается численно модифицированным методом Эйлера. Для облегчения выбора шага интегрирования выводится значение электромеханической постоянной времени. Шаг интегрирования целесообразно принимать на три порядка меньше этой постоянной.

Единственным переменным параметром, определяющим кажущееся сопротивление Z_d асинхронного двигателя является скольжение s . Организационно процедура определения $Z_d(s)$ оформлена подпрограммой-функцией. Выходными параметрами данной подпрограммы также являются приведенное активное сопротивление роторной цепи и комплексная доля тока, ответвляющегося в это сопротивление. Данных параметров достаточно для расчета текущего значения момента асинхронного двигателя при известном токе статора. Для расчета тока статора используется приведенное значение кажущегося сопротивления Z_{Ad} асинхронного двигателя. Данная величина определяется следующим образом:

- для прямого пуска $Z_{Ad} = Z_d(s)$;
- для пуска переключением звезда-треугольник $Z_{Ad} = Z_d(s) / \sqrt{3}$;
- для плавного пуска $= Z_d(s) \cdot K_U$

где K_U определяется отношением напряжений на входе и выходе системы плавного пуска ($K_U = U_{ВХ} / U_{ВЫХ}$).

Ток статора определяется как:

$$I_1 = E / (Z_{\Sigma} + Z_{Ад}) . \quad (2.39)$$

Выходными параметрами программы являются значения тока статора, напряжения на статоре, скольжения асинхронного двигателя, мощностей потребляемой из сети (активной и реактивной) и механической, потерь мощности, динамического момента в функции времени. Дополнительно выводятся затраты энергии на пуск, выработанная при пуске механическая энергия, накопленный тепловой импульс.

При пуске переключением обмоток двигателя после установления угловой скорости производится переключение. Во всех случаях разгруженного пуска прием полной нагрузки производится после окончательной стабилизации угловой скорости. Расчет завершается после стабилизации угловой скорости при полной нагрузке, либо по истечению заданного времени счета. Диагностируется незавершенный и неуспешный пуск. Реализована также диагностика завышенного значения шага интегрирования.

Программа реализована на языке FORTRAN в средеDOS. Выходной протокол имеет текстовый формат.

2. 5. Аналитический метод расчета рабочих электромеханических характеристик асинхронных двигателей для различные пусковые

Рассчитать механические характеристики электродвигателя: Типа 4А355М4у3, $P_{II} = 315$ кВт; $n_{II} = 1485$ об/мин; $\eta_{II} = 0.945$; $\cos \varphi = 0.92$; $M_{max}/M_{II} = 2.0$; $M_{пуск}/M_{II} = 1.2$; $I_{пуск}/I_{II} = 7$; $U_{II} = 380$; ток статора = 549 А ; $f = 50$ Гц

Решение; Для решения эта задания мы используем програм Расчет параметров Т-образной схемы замещения АД.

Марка двигателя:4А355М4У3

P_{nom} [кВт]:315

n_{nom} [об/мин]:1485

$I_{I nom}$ [А]:549

КПД $_{nom}$:0.945

$\cos(\varphi)_{nom}$:0.92

$i_{пуск}$ [о.е.]:7

$m_{пуск}$ [о.е.]:1.2

$m_{критический}$ [о.е.]:2

$U_{I nom}$ [В]:380

Текущее значение параметра подбора: 0.0006546495

Параметры схемы замещения:

r_1 : 0.0171345145 ; r_0 : 0.1151021396 ; r_{20} : 0.0039319909 ; r_{2m1} : 0.0817534872

x_1 : 0.0096915498 ; x_0 : 2.3861795238 ; x_{20} : 0.0824486684

h : 3.0093012703 ; α : 0.0049851820 ; a : 0.1983389032

Значения контрольных точек:

M_n : 2022.2516336329 (0.9983428519 о. е.)

I_n : 552.5641909800 (1.0064921511 о. е.)

$\cos n$: 0.9325016787 (1.0135887812 о. е.)

$K_{рdn}$: 0.9272859581 (0.9812549821 о. е.)

M_p : 2434.3498067111 (1.0014891686 о. е.)

I_p : 3823.0863150358 (0.9948181928 о. е.),

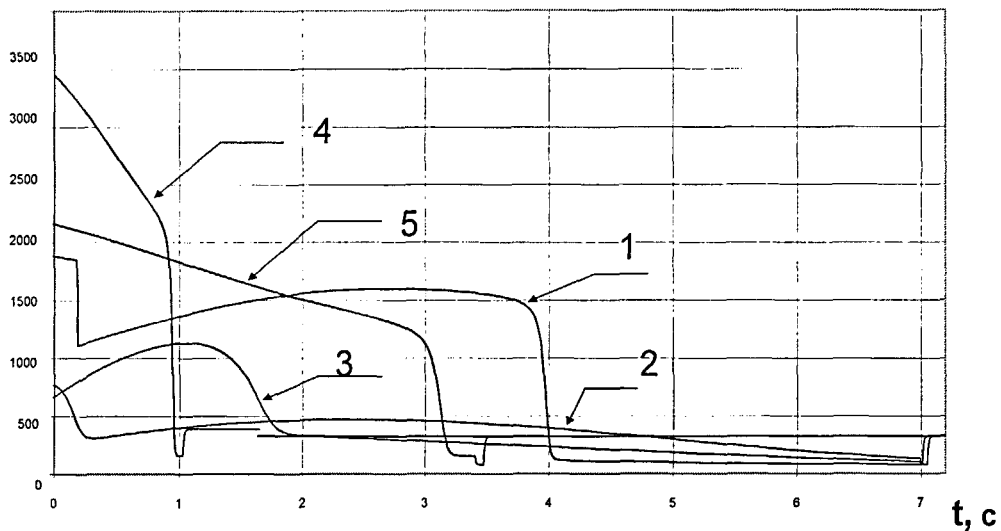
С помощью разработанного программного модуля исследовано влияние установок пусковых устройств характеристики тока , напряжении, и скорости ($i(t)$, $n(t)$). Для проведения вычислительного эксперимента принимались следующие условия:

- полная загрузка двигателя составляет 75 % номинальной, момент сопротивления носит вентиляторный характер;
- момент трогания задавался равным 12 % номинального момента;
- пуск осуществляется при разгруженном рабочем механизме,
- коэффициент загрузки для пускового режима составляет 0,25 номинального;
- система плавного пуска работает с пусковым импульсом напряжения, равным по амплитуде 50 % номинального значения и имеющим длительность 0,2 с;
- начальные значения напряжения задавались равными 30 %

номинального значения для системы плавного пуска и 10 % номинального значения для систем частотного пуска.

Рассчитать механические характеристики электродвигателя при вентилятором характере нагрузки приведен на рис.(2. 10, а, б) (электромеханическая постоянная времени привода составляет 0,94 с). Расчеты прямого пуска и пуска с автоматическим переключением статорных обмоток дали следующие значения времени разгона привода: 1,12 с и 3,54 с соответственно. В любом случае за время окончания разгона принимался момент затухания переходного процесса после приема приводом полной нагрузки.

I, A а)



n, o.e. б)

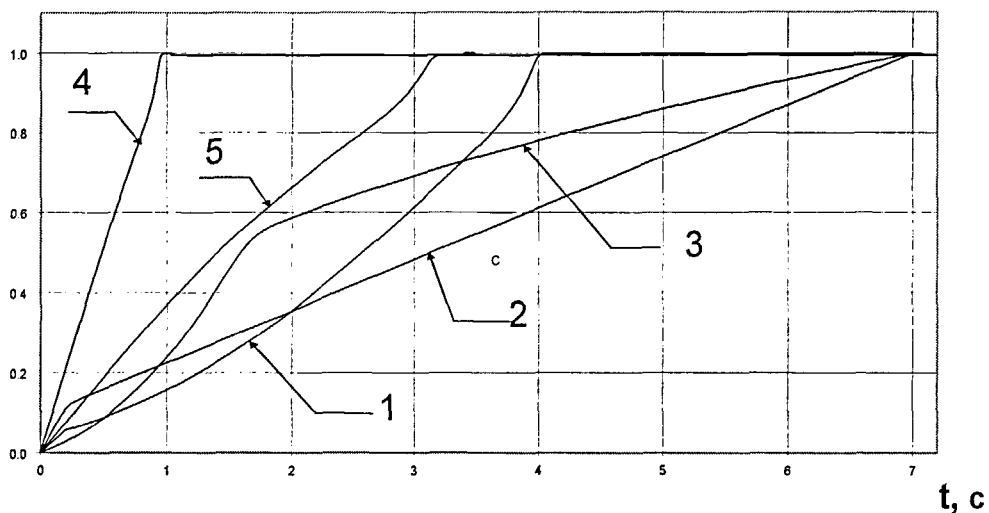


Рис.2. 10. Кривые разгона асинхронного электропривода для различных способов пуска : а) ток статора, А.; б) угловая скорость, отн.ед.

1- пуск с устройством плавного пуска;

2- разгон привода с устройством частотного пуска при законе регулирования $\frac{U}{f} = const .;$

3- разгон привода с устройством частотного пуска при законе регулирования $\frac{U}{f^2} = const .;$

4- прямой пуск;

5- пуск с устройством автоматического переключения обмотки

2. 6. Расчет Механических Характеристики для частотного пуска АД

Выходные данные программы для расчета параметров схемы замещения асинхронного двигателя: :4A10084У3 , $P_H = 3$ кВт; $n_H = 1435$ об/мин; $\eta_H = 0.82$; $\cos \varphi = 0.83$; $M_{\max} / M_H = 2.0$; $M_{\text{пуск}} / M_H = 2,4$; $I_{\text{пуск}} / I_H = 6$; $U_H = 380$; ток статора = 6,7 А ; $f = 50$ Гц

Решение

Для решения эта задания мы используем программ Расчет параметров Т-образной схемы замещения АД.

$P_{\text{ном}}[\text{кВт}]: 3$

$n_{\text{ном}}[\text{об/мин}]: 1435$

$I_{\text{ном}}[\text{А}]: 6.7$

$\text{КПД}_{\text{ном}}: 0.82$

$\text{Cos}(\varphi)_{\text{ном}}: 0.83$

$i_{\text{пусковой}}[\text{о.е.}]: 6$

$m_{\text{пусковой}}[\text{о.е.}]: 2$

$m_{\text{критический}}[\text{о.е.}]: 2.4$

$U_{1\text{ном}}[\text{В}]: 380$

Текущее значение параметра подбора: 0.0000811595

Параметры схемы замещения:

$r_1: 1.3745985819$; $r_0: 3.4146915743$; $r_{20}: 1.6144060557$; $r_2: 5.5317448762$

$x_1: 1.6466509518$; $x_0: 68.3126996664$; $x_{20}: 4.1921960912$

$h: 4.8047854892$; $A_{1p\gamma a}: 0.0624408627$; $a: 0.2283048739$

Значения контрольных точек:

$M_n: 19.8358032739$ (0.9935942207 о. е.) ;

$I_n: 6.6739632379$ (0.9961139161 о. е.)

$\text{Cos}_n: 0.8307632716$ (1.0009196044 о. е.)

$\text{Kpd}_n: 0.8168174166$ (0.9961188007 о. е.)

$M_p: 39.8660110491$ (0.9984631738 о. е.)

$I_p: 40.2347526855$ (1.0008644947 о. е.)

$\text{MK}: 48.0302601783$ (1.0024505578 о. е.)

1.1 Механическая характеристика двигателя при частоте $f = 50$ Гц ; $S=1$

$$g = (f_1 / f_H) = 50/50 = 1; \quad g \text{ - относительная частота}$$

$$U_1 = U_H / \sqrt{3} * (f_1 / f_H) = 380 / \sqrt{3} * 1 = 219,3931 \text{ В};$$

Параметры схемы замещения

$$\epsilon = h \sqrt{s * g} = 4.805 \cdot \sqrt{1.1} = 4,805$$

$$\kappa_r = \epsilon [\operatorname{sh}(2 \epsilon) + \sin(2 \epsilon)] / [\operatorname{ch}(2 \epsilon) - \cos(2 \epsilon)] \\ = 4,805 \cdot (\operatorname{sh}(9,61) + \sin(9,61)) / (\operatorname{ch}(9,61) - \cos(9,61)) = 4,806$$

$$\kappa_x = 3 [\operatorname{sh}(2 \epsilon) - \sin(2 \epsilon)] / 2 \epsilon [\operatorname{ch}(2 \epsilon) - \cos(2 \epsilon)] \\ = 3 \cdot (\operatorname{sh}(9,61) - \sin(9,61)) / 9,61 \cdot (\operatorname{ch}(9,61) - \cos(9,61)) = 0,312$$

$$r'_1 = r'_1^{(50)} = \text{const.}; \quad r'_1 = 1,375 \text{ Ом}$$

$$r'_2 = r'_{20} \cdot \alpha + r'_{20} \cdot (1 - \alpha) \cdot \kappa_r$$

$$r'_2 = 1,615 \cdot 0,063 + 1,615 \cdot (1 - 0,063) \cdot 4,806 = 7,375 \text{ Ом}$$

$$x_1 = x_1^{(50)} \cdot g = 1,647 \cdot 1 = 1,647 \text{ Ом}$$

$$x'_2 = x_{20} \cdot \alpha \cdot g + x_{20} \cdot (1 - \alpha) \cdot g \cdot \kappa_x \\ = 4,192 \cdot 0,063 \cdot 1 + 4,192 \cdot (1 - 0,063) \cdot 1 \cdot 0,312 = 1,49 \text{ Ом}$$

$$x_0 = x_0^{(50)} \cdot g = 68,313 \cdot 1 = 68,313 \text{ Ом}$$

$$C_1 = 1 + (x_1 / x_0) = 1 + (1,647 / 68,313) = 1,024 \text{ Ом}$$

Синхронная угловая частота при $f = 40$ Гц

$$\omega_{0j} = 2\pi f = 2\pi * 50 = 314 \text{ рад / с}$$

Электромагнитный момент двигателя:

$$M = \frac{p m_1 U_1^2 \frac{r'_2}{s}}{\omega_1 \left[\left(r_1 + c_1 \frac{r'_2}{s} \right)^2 + (x_{\sigma 1} + c_1 x'_{\sigma 2})^2 \right]} \\ = \frac{2,3(219,3931)^2 \cdot 7,375}{314 \cdot ((1,375 + (1,024 \cdot 7,375))^2 + (1,647 + (1,024 \cdot 1,49))^2)} = 75,572 \text{ Н.М}$$

$$M_m = \pm \frac{p m_1 U_1^2}{2 \omega_1 c_1 \left[\pm r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + c_1 x'_2)^2} \right]}$$

$$M_m = \pm \frac{2,3 \cdot (219,3931)^2}{2 \cdot 314 \cdot 1,024 \left[\pm 1,375 + \sqrt{(1,375)^2 + (1,647 + (1,024 \cdot 1,49))^2} \right]} = 92,926 \text{ Н.М}$$

$$S_m = \pm \frac{c_1 r_{20}}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + c_1 x_{20})^2}}$$

$$S_m = \pm \frac{1,024 \cdot 1,615}{\sqrt{(1,375)^2 + (1,647 + (1,024 \cdot (68,313)))^2}} = 0,271$$

Результаты расчета при различных частотах ($f = 40, 30, 20, 10$) Гц ; $S=1$ сводят в таблицу (см. табл. 2.1), а затем строят рабочие характеристики двигателя (см. Рис. 2. 11- 2. 13.)

таблица. 2.1

$f_1(\text{Гц})$	$M_n \text{ (Н.М)}$	$M_{\text{max}}(\text{Н.М})$	S_{max}
50	75,572	92,926	0,271
40	66,286	82,277	0,286
30	55,466	69,019	0,303
20	42,348	51,944	0,322
10	25,408	29,523	0,343

2.1 Механические характеристика при частоте $f = 50$ Гц ; $S = 0,01$

$$g = (f_1 / f_H) = 50/50 = 1 \quad ; \quad g \text{ - относительная частота}$$

$$U_1 = U_H / \sqrt{3} * (f_1 / f_H) = 380 \sqrt{3} * 1 = 219,3931 \text{ В} ;$$

Параметры схемы замещения

$$\varepsilon = h \sqrt{s * g} = 4,805 \cdot \sqrt{0,01 \cdot 1} = 0,4805$$

$$k_r = \varepsilon [\operatorname{sh}(2 \varepsilon) + \sin(2 \varepsilon)] / [\operatorname{ch}(2 \varepsilon) - \cos(2 \varepsilon)] \\ = 0,4805 \cdot (\operatorname{sh}(0,961) + \sin(0,961)) / (\operatorname{ch}(0,961) - \cos(0,961)) = 1,092$$

$$k_x = 3 [\operatorname{sh}(2 \varepsilon) - \sin(2 \varepsilon)] / 2 \varepsilon [\operatorname{ch}(2 \varepsilon) - \cos(2 \varepsilon)] \\ = 3 \cdot (\operatorname{sh}(0,961) - \sin(0,961)) / 0,961 \cdot (\operatorname{ch}(0,961) - \cos(0,961)) = 6,88$$

$$r_1' = r_1'^{(50)} = \operatorname{const.} ; \quad r_1' = 1,375 \text{ Ом}$$

$$r_2' = r_2'^{(50)} \cdot \alpha + r_2'^{(50)} \cdot (1 - \alpha) \cdot K_r$$

$$r_2' = 1,615 \cdot 0,063 + 1,615 \cdot (1 - 0,063) \cdot 1,092 = 1,754 \text{ Ом}$$

$$x_1' = x_1'^{(50)} \cdot g = 1,647 \cdot 1 = 1,647 \text{ Ом}$$

$$x_2' = x_2'^{(50)} \cdot \alpha \cdot g + x_2'^{(50)} \cdot (1 - \alpha) \cdot g \cdot K_x \\ = 4,192 \cdot 0,063 \cdot 1 + 4,192 \cdot (1 - 0,063) \cdot 1 \cdot 6,88 = 27,288 \text{ Ом}$$

$$x_0 = x_0'^{(50)} \cdot g = 68,313 \cdot 1 = 68,313 \text{ Ом}$$

$$C_1 = 1 + (x_1' / x_0) = 1 + (1,647 / 68,313) = 1,024 \text{ Ом}$$

Номинальная угловая скорость:

$$\omega_H = 2\pi \cdot n_H = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314 \text{ рад/с.}$$

Номинальный момент:

$$M = \frac{p m_1 U_1^2 \frac{r_2'}{s}}{\omega_1 \left[\left(r_1 + c_1 \frac{r_2'}{s} \right)^2 + (x_1 + c_1 x_2')^2 \right]} \\ = \frac{2 \cdot 3 \cdot (219,3931)^2 \cdot (1,754 / 0,01)}{314 \cdot ((1,375 + (1,024 \cdot 1,754 / 0,01))^2 + (1,647 + (1,024 \cdot 27,288))^2)} = 4,843 \text{ Н.М}$$

Критический момент двигателя:

$$M_m = \pm \frac{p m_1 U_1^2}{2 \omega_1 c_1 \left[\pm r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + c_1 x_2')^2} \right]} \\ M_m = \pm \frac{2 \cdot 3 \cdot (219,3931)^2}{2 \cdot 3 \cdot 14 \cdot 1,024 \left[\pm 1,375 + \sqrt{(1,375)^2 + (1,647 + (1,024 \cdot 27,288))^2} \right]} = 14,488 \text{ Н.М}$$

$$S_m = \pm \frac{c_1 r_2'}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + c_1 x_2')^2}}$$

$$S_m = \pm \frac{1,024 \cdot 1,615}{\sqrt{(1,375)^2 + (1,647 + (1,024 \cdot (4,192)))^2}} = 0,023$$

Результаты расчета при различных частотах ($f = 40, 30, 20, 10$) Гц ; $S=0,01$ сводят в таблицу (см. табл. 2.3), а затем строят рабочие характеристики двигателя (см. Рис. 2. 14 – 2. 16)

таблица. 2.2

$f_1(\text{Гц})$	$M_n(\text{Н.М})$	$M_{\max}(\text{Н.М})$	S_{\max}
50	4,812	14,488	0,271
40	3,88	11,889	0,286
30	2,959	9,15	0,303
20	1,999	6,27	0,322
10	1,015	3,229	0,343

2. 7. Аналитический метод расчета механических характеристик частотного пуска АД 3кВт

Анализируя компоненты следующего уравнения:

$$M = \frac{p m_1 U_1^2 \frac{r_2'}{s}}{\omega_1 \left[\left(r_1 + c_1 \frac{r_2'}{s} \right)^2 + (x_1 + c_1 x_2')^2 \right]}$$

важно отметить, что электромагнитный момент асинхронного двигателя обратно пропорционален частоте сети: $M=1/f$. Это в значительной степени отражается на эксплуатационных свойствах двигателя, кроме того, небольшое снижение частоты сети вызывает заметное уменьшение вращающего момента асинхронного двигателя. Электромагнитный момент асинхронного двигателя прямо пропорционален квадрату напряжения сети: $M=U_1^2$.

Рассмотрим работу асинхронного двигателя, а именно механическую характеристику $M = f(f^*)$:

А). Рассмотрим уравнение пускового момента асинхронного двигателя при $S=1$:

$$M = \frac{p m_1 U_1^2 r_2'}{\omega_1 \left[\left(r_1 + c_1 r_2' \right)^2 + (x_1 + c_1 x_2')^2 \right]}$$

При уменьшении частоты сети, согласно номинальному ($f_1=0.8f_H$) ($f_1=40\text{Гц}$), электромагнитный момент двигателя уменьшается на 5.6 %: $M'=0.944M$, где M — момент при номинальной частоте сети, а M' — момент при понижении частоты.

При появлении этого момента начинает вращаться ротор двигателя. При такой частоте ($f_1=40\text{Гц}$) электромагнитный момент уменьшается в соответствии с характеристикой $M = f(f^*)$.

Необходимо упомянуть, что если $S=1$ (пусковой режим двигателя), то параметры схемы замещения асинхронного двигателя заметно изменяют свои значения. Данная ситуация объясняется следующими факторами:

$$g = f_1 f_n, \quad \varepsilon = h\sqrt{s \cdot g}, \quad S=1,$$

$\varepsilon = h\sqrt{g}$ уменьшается и приводит к уменьшению величины (K_r и K_x) – коэффициентов, определяемых по следующим уравнениям:

$$K_r = \varepsilon [\operatorname{sh}(2 \varepsilon) + \sin(2 \varepsilon)] / [\operatorname{ch}(2 \varepsilon) - \cos(2 \varepsilon)];$$

$$K_x = 3 [\operatorname{sh}(2 \varepsilon) - \sin(2 \varepsilon)] / 2 \varepsilon [\operatorname{ch}(2 \varepsilon) - \cos(2 \varepsilon)]$$

Уменьшаются величины (r'_2 , x_1 , x'_2 , и x_0), а величины r_0 и r'_1 не изменяются:

$$x'_2 = x_{20}^{(50)} \cdot \alpha \cdot g + x_{20}^{(50)} (1 - \alpha) \cdot g \cdot K_x; \quad x_0 = x_0^{(50)} \cdot g; \quad r_0 = r_0^{(50)} = \text{const.}$$

$$r'_1 = r_1^{(50)} = \text{const.}; \quad r'_2 = r_{20}^{(50)} \cdot \alpha + r_{20}^{(50)} \cdot (1 - \alpha) \cdot K_r; \quad x_1 = x_1^{(50)} \cdot g$$

Снижение частоты приводит к уменьшению напряжения согласно следующему уравнению:

$$U_1 = g U_H, \quad \text{где } g = f_1 f_n.$$

Изменение параметров уравнения электромагнитного момента асинхронного двигателя приводит к уменьшению электромагнитного момента, а асинхронный двигатель продолжает вращение. При продолжении снижения частоты до 10 Гц электромагнитный момент уменьшается, а асинхронный двигатель продолжает вращение (см. рис. 2. 11).

Для изучения влияния изменения частоты на критический момент рассмотрим уравнение:

$$M_m = \pm \frac{p m_1 U_1^2}{2 \omega_1 c_1 \left[\pm r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + c_1 x'_2)^2} \right]}.$$

Из этого уравнения следует, что:

1. Снижение частоты с 50 до 40 Гц приводит к уменьшению напряжения.
2. Снижение частоты, приводит к уменьшению параметров схемы замещения асинхронного двигателя (x_1 , x'_2).

3. При изменении параметров уравнения (M_m) величина критического момента снижается. А при продолжении снижения частоты до 10 Гц, приводит к дальнейшему уменьшению критического момента (см. рис.2. 12).

Для изучения влияния изменения частоты на критическое скольжение рассмотрим уравнение:

$$S_m = \pm \frac{c_1 r_{20}}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + c_1 x_{20})^2}}$$

Из этого уравнения следует, что:

1. Снижение частоты, приводит к уменьшению параметров схемы замещения асинхронного двигателя (x_1, x_{20}).
2. Изменение параметров уравнения приводит к увеличению величины критического скольжения. А при продолжении снижения частоты до 10 Гц критический момент увеличивается (см. рис. 2. 13).

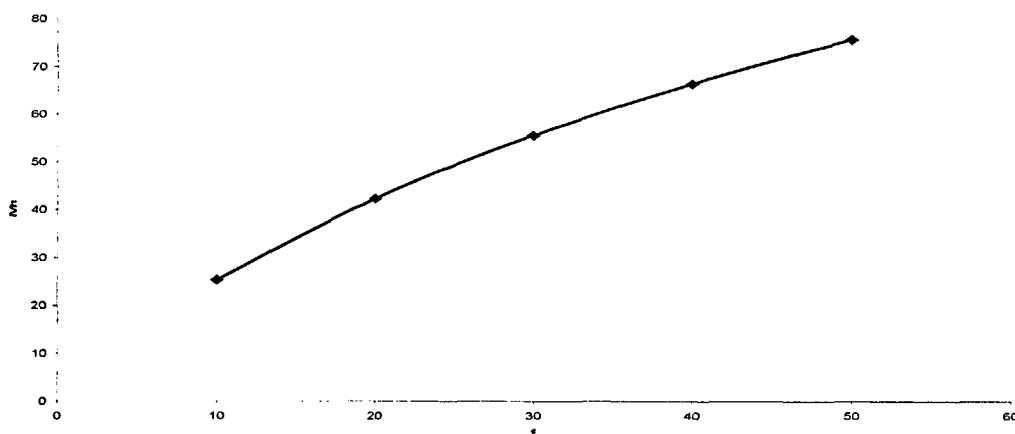


Рис. 2. 11. Значения электромагнитного момента асинхронного двигателя с разными значениями частоты при $S=1$.

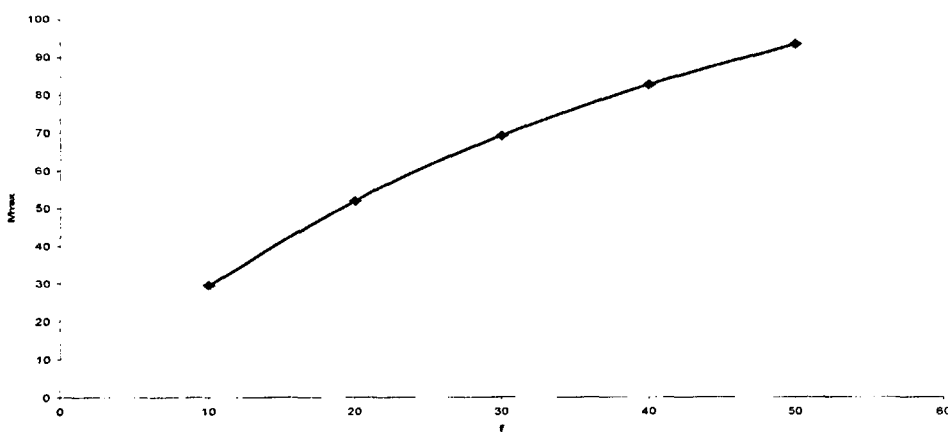


Рис. 2. 12 . Значения максимального момента асинхронного двигателя с разными значениями частоты при S= 1

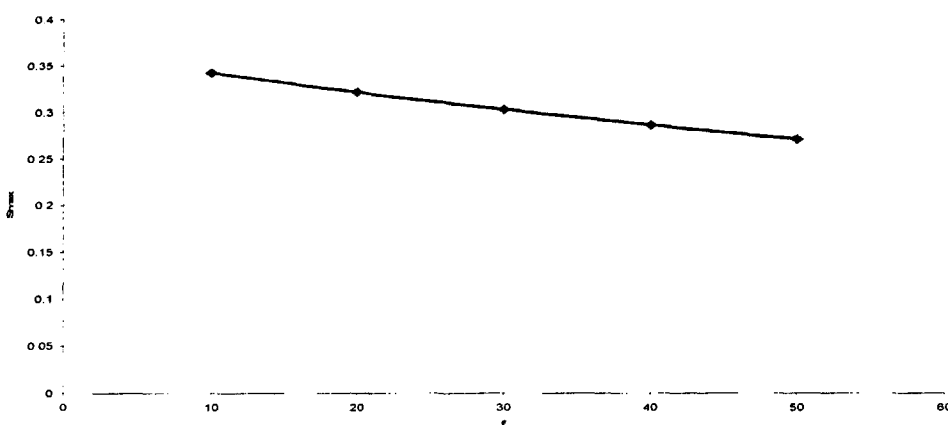


Рис. 2. 13 Значения критической скольжения асинхронного двигателя с разными значениями частоты при S= 1

Б). Рассмотрим уравнение пускового момента асинхронного двигателя при S= 0.01:

$$M = \frac{pm_1 U_1^2 \frac{r_2'}{s}}{\omega_1 \left[\left(r_1 + c_1 \frac{r_2'}{s} \right)^2 + (x_1 + c_1 x_2')^2 \right]}$$

При уменьшении частоты сети, согласно номинальному ($f_1=40$ Гц), напряжение уменьшается согласно следующему уравнению:

$$U_1 = g U_H, \text{ где } g = f_1 f_H.$$

Следует отметить, что параметры схемы замещения асинхронного двигателя заметно изменяют свои значения. Данная ситуация объясняется следующими факторами: $g = f_1 f_n$; $\varepsilon = h\sqrt{s \cdot g}$ уменьшается и приводит к уменьшению величины (κ_r) и увеличению величины (κ_x) – коэффициентов, определяемых по следующим уравнениям:

$$\kappa_r = \varepsilon [\operatorname{sh}(2 \varepsilon) + \sin(2 \varepsilon)] / [\operatorname{ch}(2 \varepsilon) - \cos(2 \varepsilon)];$$

$$\kappa_x = \varepsilon [\operatorname{sh}(2 \varepsilon) - \sin(2 \varepsilon)] / 2 \varepsilon [\operatorname{ch}(2 \varepsilon) - \cos(2 \varepsilon)]$$

Величины (r'_2 , x_1 , x'_2 , и x_0) уменьшаются, а величины r_0 и r'_1 не изменяются:

$$x'_2 = x_{20}^{(50)} \cdot \alpha \cdot g + x_{20}^{(50)} (1 - \alpha) \cdot g \cdot \kappa_x ; x_0 = x_0^{(50)} \cdot g ; r_0 = r_0^{(50)} = \text{const.}$$

$$r'_1 = r_1^{(50)} = \text{const.} ; r'_2 = r_{20}^{(50)} \cdot \alpha + r_{20}^{(50)} \cdot (1 - \alpha) \cdot \kappa_r ; x_1 = x_1^{(50)} \cdot g$$

Важно сказать, что изменение параметров уравнения электромагнитного момента асинхронного двигателя способствует уменьшению электромагнитного момента и продолжению вращения асинхронного двигателя. При продолжении снижения частоты до 10 Гц электромагнитный момент уменьшается и его величина становится меньше, чем при $S = 1$, а асинхронный двигатель продолжает вращение (см. рис. 2. 14).

Рассмотрим влияние изменения частоты на критический момент посредством уравнения:

$$M_m = \pm \frac{p m_1 U_1^2}{2 \omega_1 c_1 \left[\pm r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + c_1 x'_2)^2} \right]};$$

заметим, что при снижении частоты с 50 Гц до 40 Гц напряжение уменьшается. Снижение частоты, согласно данным параметрам схемы замещения асинхронного двигателя, приводит к уменьшению величин (x_1 , x'_2). В силу изменения параметров уравнения величина критического момента снижается, а при снижении частоты до 10 Гц критический момент уменьшается и его величина становится меньше, чем при $s = 1$ (см. рис. 2. 15)

Для изучения влияния изменения частоты на критическое скольжение рассмотрим уравнение:

$$S_m = \pm \frac{c_1 r_{20}}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + c_1 x_{20})^2}}.$$

Из этого уравнения следует, что:

1. Снижение частоты, согласно данным параметрам схемы замещения асинхронного двигателя приводит к уменьшению (x_1).
2. Изменение параметров уравнения приводит к увеличению величины критического скольжения. А при продолжении снижения частоты до 10 Гц критический момент увеличивается (см. рис. 2. 16).

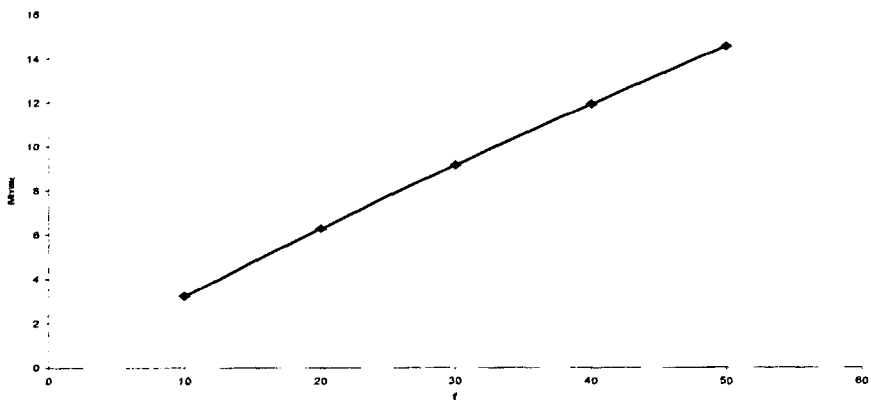


Рис. 2. 14 . Значения максимального момента асинхронного двигателя с разными значениями частоты при $S=0.01$.

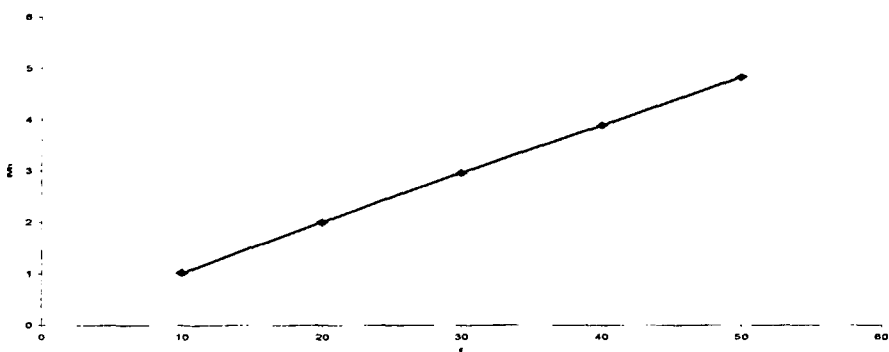


Рис. 2. 15. Значения электромагнитного момента асинхронного двигателя с разными значениями частоты при $S=0.01$

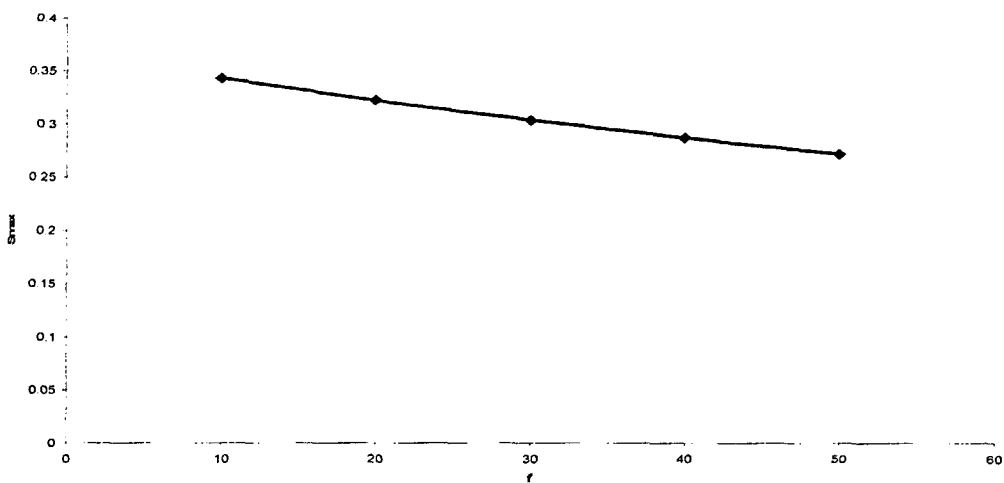


Рис. 2. 16. Значения критического скольжения асинхронного двигателя с разными значениями частоты при $S=0,01$

Сравнения номинального момента при $S=1$ с номинальным моментом при $S=0,01$, максимального момента при $S=1$ с максимальным моментом при $S=0,01$ и критического скольжения при $S=1$ с критическим скольжением при $S=0,01$ посредством использования разных параметров частоты отражается в следующих рисунках (рис. 2. 17,а, б, в).

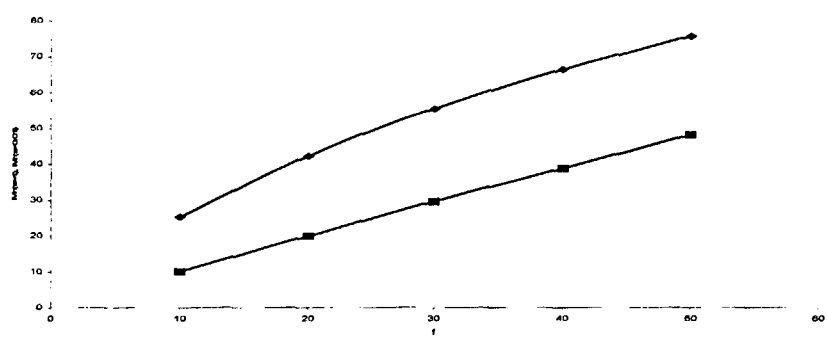


Рис. 2. 17. а. Значения электромагнитного момента асинхронного двигателя с разными значениями частоты ($S= 1$) и ($S= 0.01$).

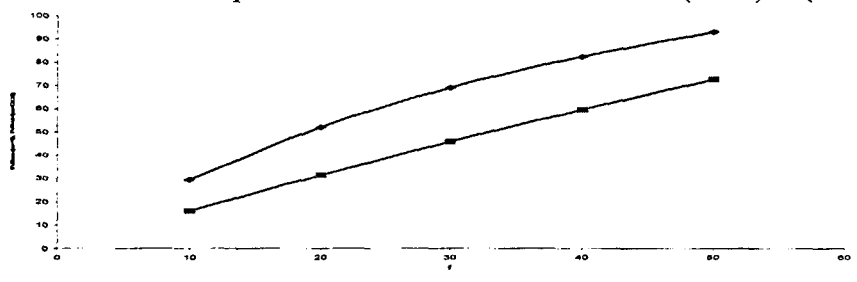


Рис. 2. 17. б. Значения максимального момента асинхронного двигателя с разными значениями частоты ($S= 1$) и ($S= 0.01$).

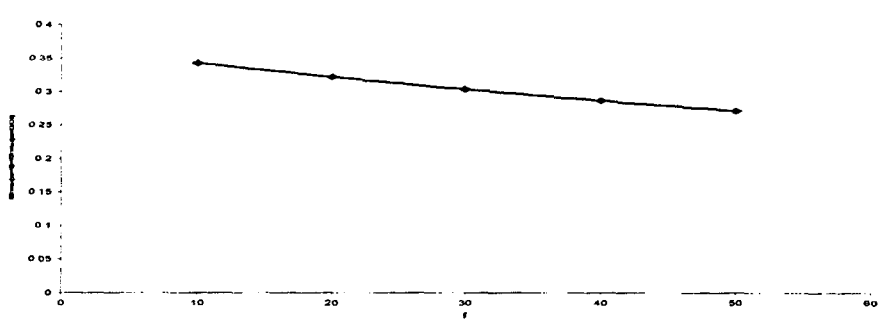


Рис. 2. 17, в. Значения критической скольжения асинхронного двигателя с разными значениями частоты ($S= 1$) и ($S= 0,01$).

3. Экспериментальные исследования систем плавного и частотного пуска

3. 1. Осциллографирование переходных процессов

Для осциллографирования переходных процессов асинхронного двигателя необходимо преобразовать измеряемые величины (напряжение, ток ротора, скорость) в электрическом токе, не превышающем максимальный рабочий ток гальванометра, а затем подать на измерительную часть осциллографа.

А) Разработка схемы для осциллографирования напряжения на статоре

Для преобразования измеряемой величины (напряжения) в качестве сигнала, допустимого для гальванометра, была разработана следующая схема (рис. 3. 1). Выводы трансформатора подключаются к клеммам 1 и 2 (рис. 3. 1, а), в этом месте наименьшие помехи. Вторичная обмотка трансформатора заземляется. Сигнал выпрямляется через мостовой выпрямитель и состоит из трансформатора и четырех диодов, подключенных к вторичной обмотке трансформатора по мостовой схеме. К одной из диагоналей моста подсоединяется вторичная обмотка трансформатора, а к другой нагрузке. Каждая пара диодов VD_1 , VD_3 и VD_2 , VD_4 работает поочередно.

С целью сглаживания и уменьшения пульсаций выпрямленного напряжения использован C_1 емкостной фильтр. Сигнал выпрямляется и фильтруется для получения огибающей измеряемой величины на осциллограмме.

В связи с этим резистор R_1 служит для ограничения максимально-допустимого тока и регулировки выходного сигнала. Данная измерительная цепь работает в двух режимах:

1. Осциллографирование выпрямленного напряжения при питании двигателя от сети.
2. Осциллографирование переменного напряжения при питании двигателя от ТПЧ.

Б) Разработка схемы для осциллографирования тока статора

Трансформатор тока последовательно будет подключен в измерительную цепь 2, 3 (рис. 3. 1, б), а вторичная обмотка шунтируется R_2 , и также заземляется. В этом случае снимаемое напряжение с шунта изменяется пропорционально току ротора двигателя. Далее путем ограничивающего сопротивления R_2 максимальный ток подается на гальванометр и R_3 используется для регулировки размаха светового луча гальванометра.

В) Осциллографирование параметров скорости

При осциллографировании параметров скорости асинхронной машины используется схема (рис. 3. 1, в).

Сигнал, снимаемый с тахогенератора, сглаживается многозвенным фильтром (так как имеют место коллекторные пульсации напряжения), состоящим из П-образных емкостных фильтров, которые включаются последовательно. R_5 , в своей роли ограничивает максимальный ток и регулировку выходного сигнала.

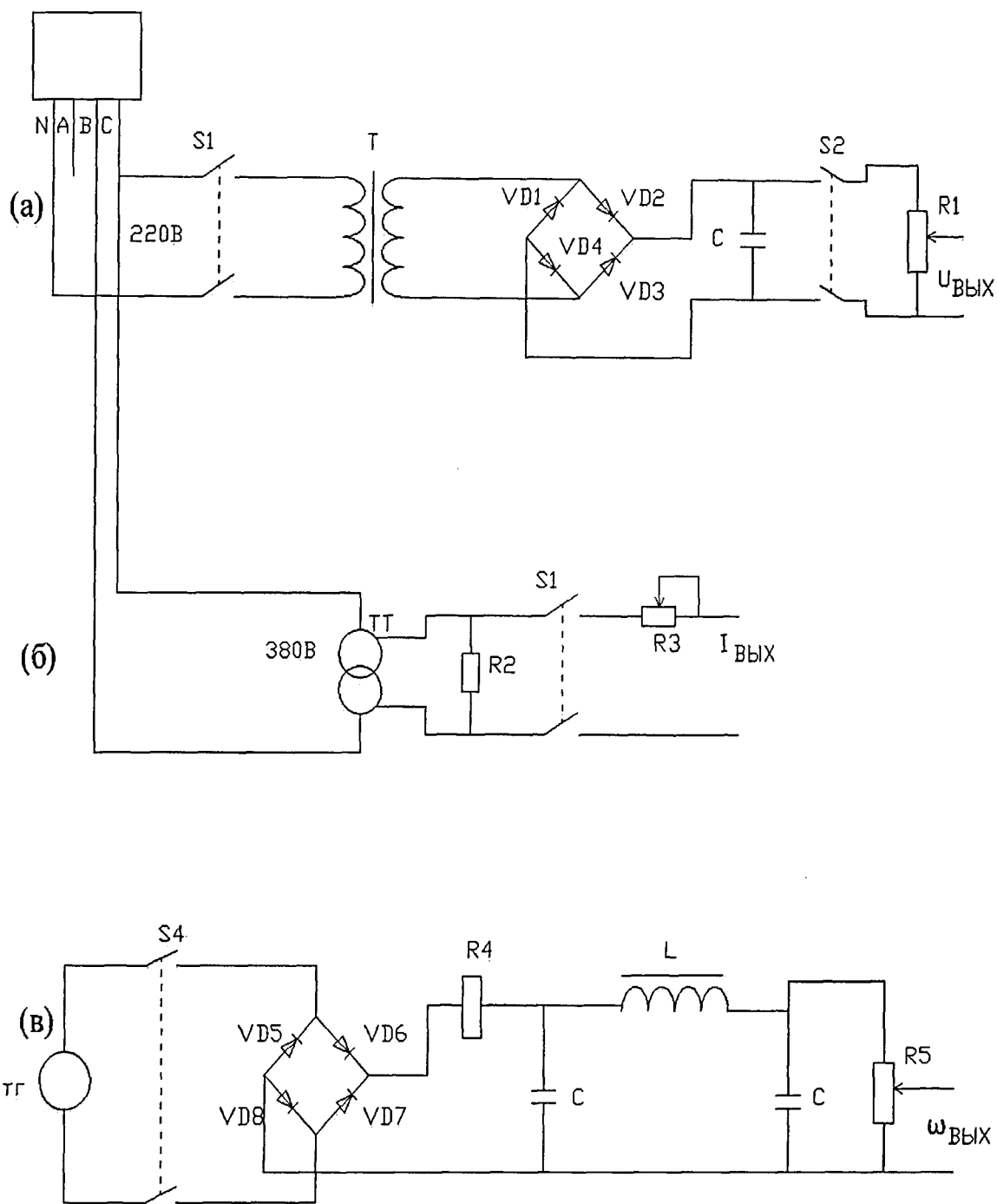


Рис.3. 1. Принципиальная схема согласования:

а) по напряжению; б) по току; в) по скорости.

3. 2. Перечень опытов:

1. прямой пуск;
2. софтстартерный пуск.

1. Прямой пуск

Наиболее простым способом пуска двигателя с короткозамкнутым ротором является включение обмотки и его статора непосредственно в сеть, на номинальное напряжение обмотки статора. Такой пуск называется прямым.

Анализ результатов вычислительного эксперимента для пускового тока (рис. 3. 2, а) показывает, что в начальном моменте скольжение составляет 1, это соответствует формуле:

$$S = (n_0 - n) / n_0,$$

а с увеличением скорости ω скольжение уменьшается, вследствие чего увеличиваются r'_2 и x'_2 по формуле:

$$r'_2 = r'_{20} \cdot \alpha + r'_{20} \cdot (1 - \alpha) \cdot K_r$$

$$x'_2 = x'_{20} \cdot \alpha \cdot g + x'_{20} \cdot (1 - \alpha) \cdot g \cdot K_x$$

в силу этого уменьшается ток ротора, как описано в следующей формуле;

$$I'_2 = \frac{U_\phi}{\sqrt{(r_1 + \frac{r'_2}{s})^2 + (x_1 + x'_2)^2}}$$

При этом пусковой ток двигателя $I'_n = (4 - 7) I_n$. Современные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором проектируются с таким расчетом, чтобы они были по величине возникающими при пуске электродинамических усилий, действующих на обмотки, и по условиям нагрева обмоток допускали прямой пуск. Поэтому прямой пуск всегда возможен, когда сеть достаточно мощна и пусковые токи двигателей не вызывают недопустимо больших падений напряжения в сети (не более 10-15%).

Нормальным способом пуска двигателей с короткозамкнутым ротором является прямой пуск. Таким образом, нередко осуществляется пуск двигателей мощностью в тысячи киловатт.

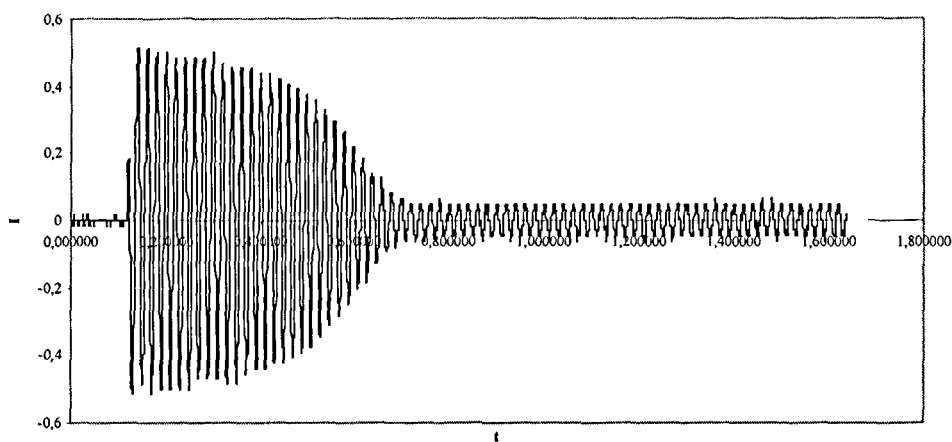


Рис. 3. 2, а Пусковой ток асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при прямом пуске

Напряжение на статоре асинхронного двигателя при прямом пуске отражается в рисунке (3. 2, б). В начальном моменте, когда ротор двигателя неподвижен, скольжение составляет $s=1$. Наибольшая величина ЭДС ротора при работе в двигательном режиме будет при подвижном роторе (E_2); ток ротора возникает благодаря ЭДС которая индуцируется в обмотках ротора вращающимся магнитным полем. Величина ЭДС вращающимся магнитным полем. Величина ЭДС ротора при вращающемся двигателе, и пересечения вращающимся полем проводников обметки ротора ω . Это частота определяется разностью скоростей поля статора Это разность называется абсолютным скольжения. По мере увеличения скорости и уменьшения скольжения ЭДС будет уменьшаться, поэтому напряжения на статоре будет увеличивается до номинальной величины.

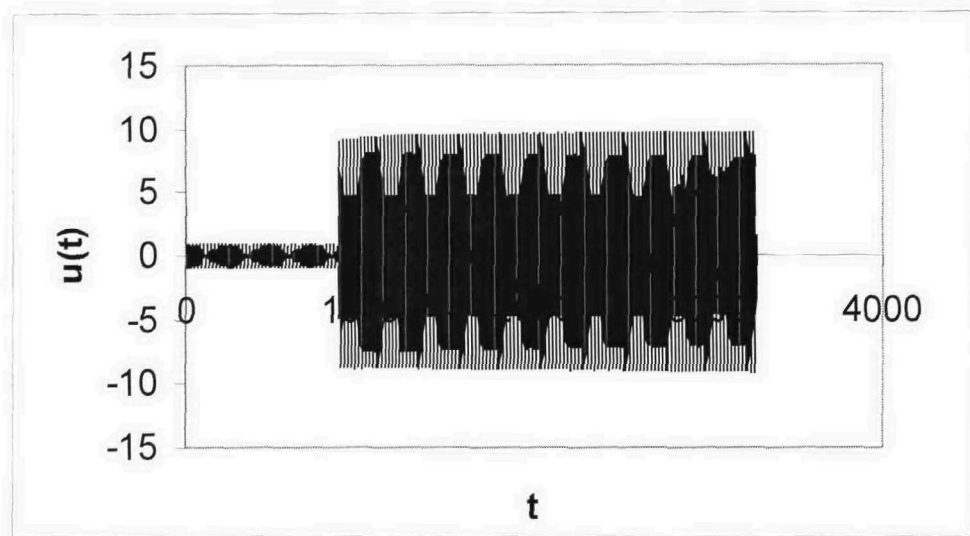


Рис. 3. 2, б Напряжения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при прямом пуске

Отношение между током и напряжением показано на (рис. 3. 2, в)

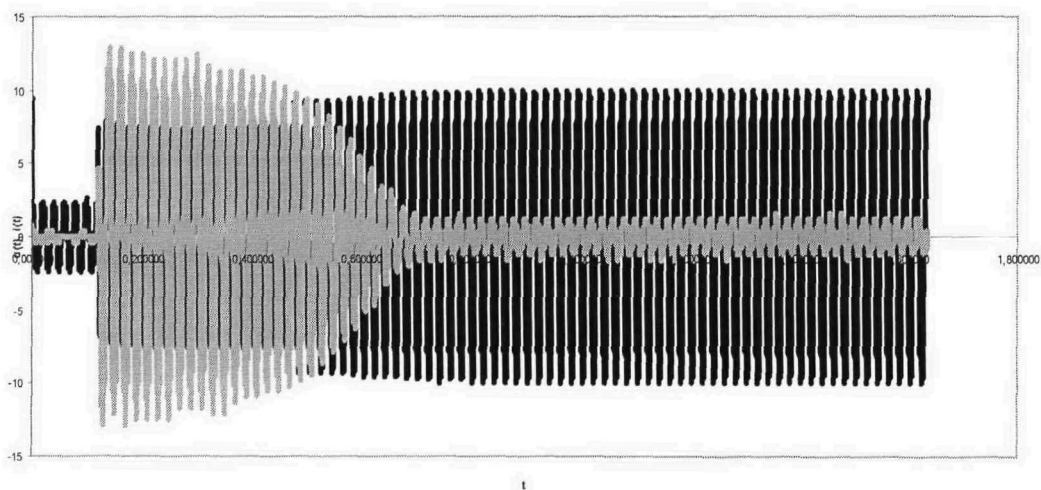


Рис. 3. 2, в Пусковой ток и напряжения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при прямом пуске

В начальном моменте скольжение составляет 1; ($S=(n_0 - n)/ n_0$), с увеличением скорости ω уменьшается скольжение, вследствие чего уменьшается ток ротора. Затем скорость будет увеличиваться до номинальной скорости ($\omega = \text{const}$, $s = \text{const}$). Это показано на рис.(3. 2, з).

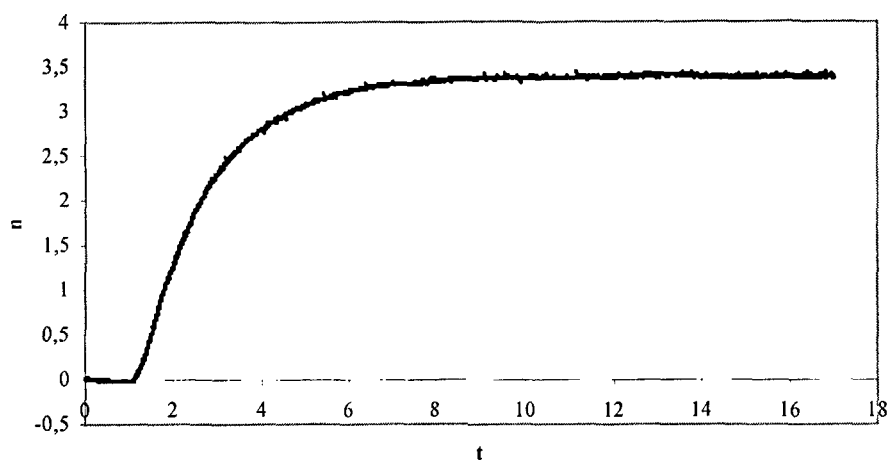


Рис.3. 2, з Скорость вращения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при прямом пуске

Сравнительный анализ электрических параметров двух прямых пуска показал различия между осциллограммой и программой SAD тока, напряжения и скорости. В моменте пуска резкий ток статора, согласно данным программы SAD, происходит до пускового тока и продолжается до номинального пуска, то есть через 0,054 секунд.

Здесь необходимо отметить, что в моменте пуска ток статора, по данным осциллограммы, начинается после 0,12 секунд с начала работы и приходит к номинальному току через 1,6 с. Итак, параметры тока статора совершенно изменяются в процессе пуска с единственной разностью в амплитуде тока.

По данным программы SAD, в моменте пуска происходит резкое падение напряжения статора и восстанавливается номинальным напряжением через 0,038 секунд. На осциллограммах напряжения ротора в моменте пуска начинается работа после 0,12 секунд и восстанавливается номинальным напряжением через 1,6 с. (рис. 3. 3, а). На осциллограммах напряжения ротора в моменте пуска отмечаются изменения параметров.

При анализе оснащения напряжения и скорости при пуске, по данным программы SAD, в моменте пуска происходят изменения напряжения и скорости. Скорость восстанавливается номинальной величиной. Согласно

осциллограмме, в момент пуска увеличивается напряжение, а скорость начинается после 0,09 секунд, и они восстанавливаются номинальной величиной через 1,7 с. (рис. 3. 3, б)

Сравнительная характеристика различных прямых пусков асинхронного короткозамкнутого двигателя приведена на рис.(3 .3, а, б).

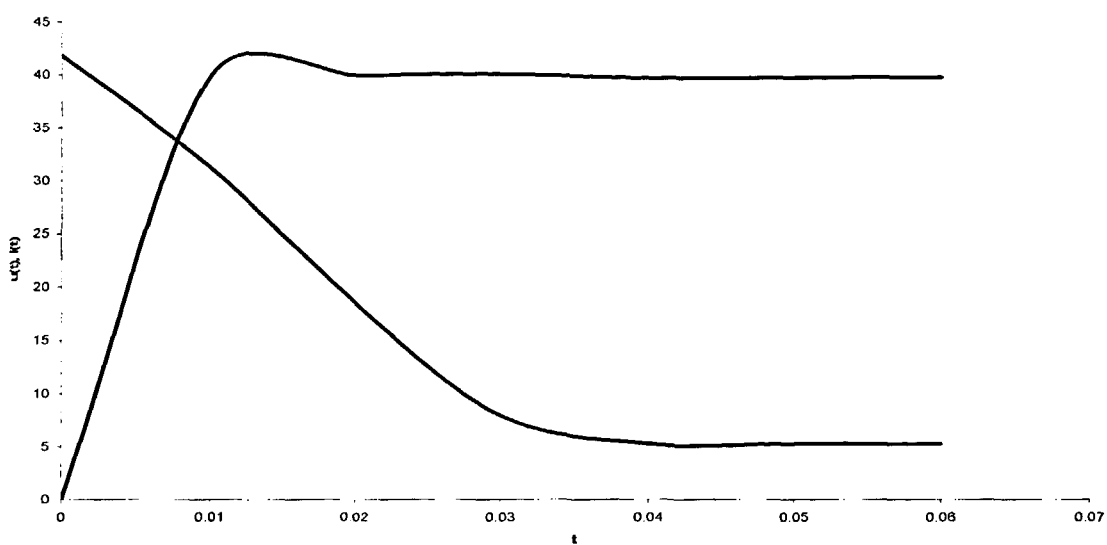


Рис. 3. 3, а . Графика тока и напряжения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при прямой пуске по программе SAD

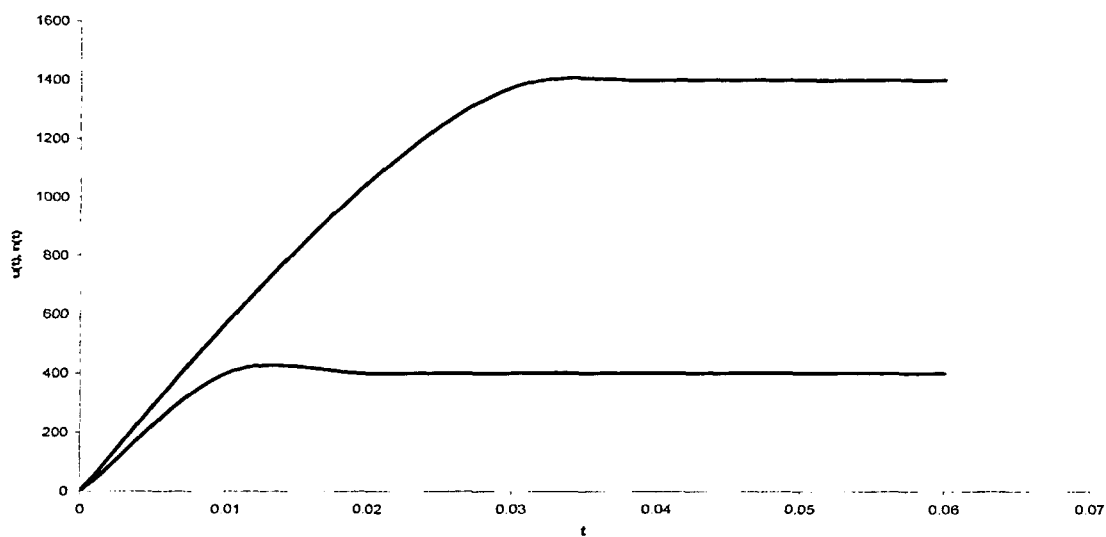


Рис. 3. 3, б. Графика скорость и напряжения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при прямой пуске по программе SAD

2. Софтстартерный пуск

Софтстартер обеспечивает плавный пуск и остановку двигателей переменного тока, используемых в приводе самых различных механизмов. При подключении обычного электродвигателя непосредственно к электросети возникают броски тока, превосходящие номинальный ток двигателя в 6-7 раз. При этом в момент пуска двигателя происходит просадка напряжения, зачастую приводящая к отказу или сбоям другого электрооборудования, подключённого к той же питающей сети. Для механизма, который подсоединён к валу двигателя (например, насос), рывки и удары при запуске также вредны и сокращают его ресурс.

Снижение напряжения на статоре асинхронного двигателя иногда используется для уменьшения пусковых токов двигателя. Это возможно, если момент сопротивления на валу двигателя при пуске не превышает $0,3-0,4M_H$. В этом случае посредством тиристорного регулятора напряжение, подводимое к обмотке статора, снижается, а затем по мере разгона двигателя увеличивается до номинального значения. Этим обеспечивается «плавный пуск» двигателя с уменьшенными пусковыми токами и сниженными динамическими нагрузками на рабочую машину.

Величина потока асинхронного двигателя будет пропорциональна напряжению питания U_1 , а величина ЭДС ротора и ток ротора I_2' также пропорциональны напряжению статора по формуле:

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r_2'}{s}\right)^2 + \left(x_1 + x_2'\right)^2}}$$

В начальный момент (рис.3.1) ток возрастает пропорционально напряжению статора, но двигатель не запустился, так как $M_{II} < M_M$, это показано на формуле:

$$M_n = \frac{pm_1 U_1^2 \frac{r_2'}{s}}{\omega_1 \left[\left(r_1 + c_1 \frac{r_2'}{s} \right)^2 + (x_1 + c_1 x_2')^2 \right]}$$

$$M_m \approx \pm \frac{pm_1 U_1^2}{2 \omega_1 c_1 (x_1 + c_1 x_2')}$$

Дальше двигатель начинает вращаться $M_{II} > M_m$. Потом происходит снижение тока ротора за счет уменьшения скольжения.

При восстановлении номинального напряжения восстанавливается и ток ротора, и пусковой ток АД может устанавливаться в пределах $(2,3 — 5) I_H$. Номинальный ток двигателя должен составлять от 70 до 100% максимально допустимого тока софтстартера. Это показано на рис (3. 4, а),

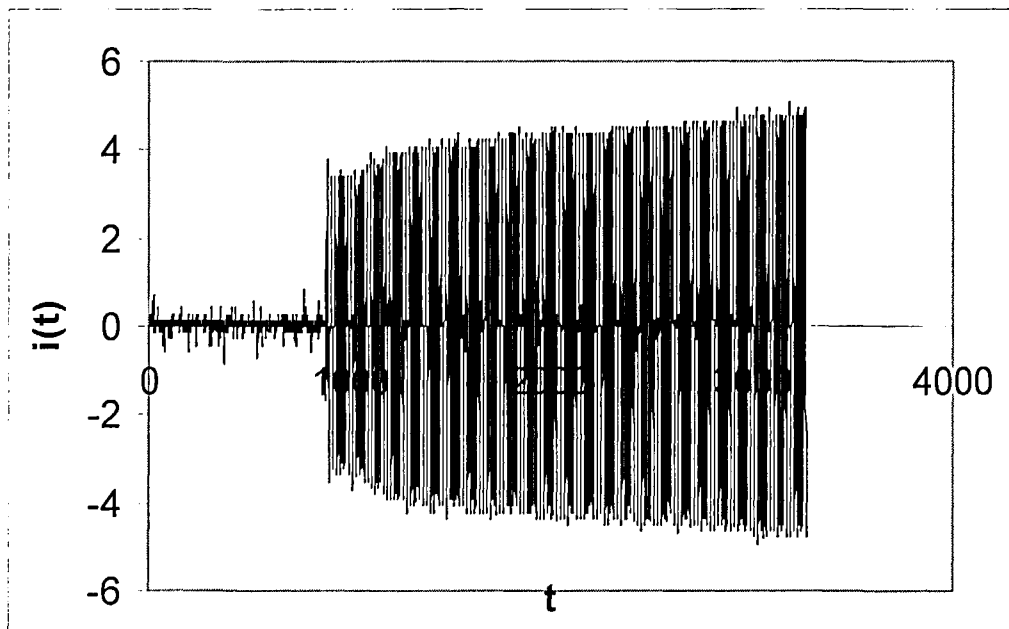


Рис. 3. 4, а. Пусковой ток асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при софтстартерном пуске по осциллографированию

В этом случае посредством своего тиристорного регулятора напряжение, подводимое к обмотке статора, снижается, а затем в результате разгона двигателя увеличивается до номинального значения. Этим обеспечивается

«плавный пуск» двигателя с уменьшенными пусковыми токами и сниженными динамическими нагрузками на рабочую машину.

Диаграмма изменения напряжения во времени на зажимах статора двигателя изображена на рис. 3. 4, б. Первоначальная установка пускового начального напряжения U_{n1} может варьироваться в пределах 9,3—59,3 % от номинального напряжения, что обеспечивает необходимый уровень пускового момента АД. Если при пуске АД требуется создать необходимый момент строгания, то возможно кратковременное в течение времени $t = 0,7$ с. приложение к статору импульса напряжения с амплитудой 87% от номинального напряжения. Продолжительность пуска t_n может варьироваться в пределах до 2,6 с. и напряжение увеличивается до номинального напряжения U_n .

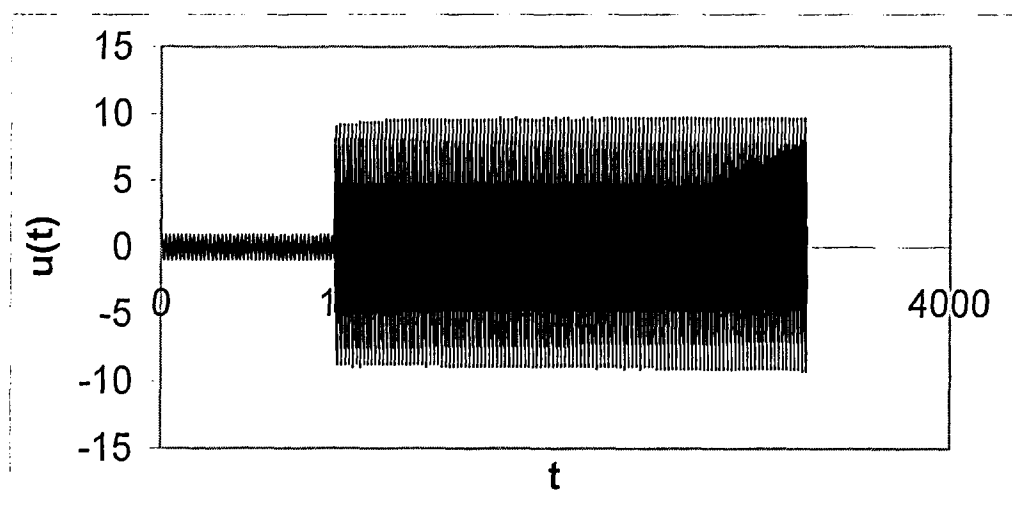


Рис. 3. 4, б Напряжение асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при софтстартерном пуске по осциллографированию

Диаграмма изменения напряжения и тока во времени на зажимах статора двигателя и тока на статоре изображена на рис. 3. 4, в.

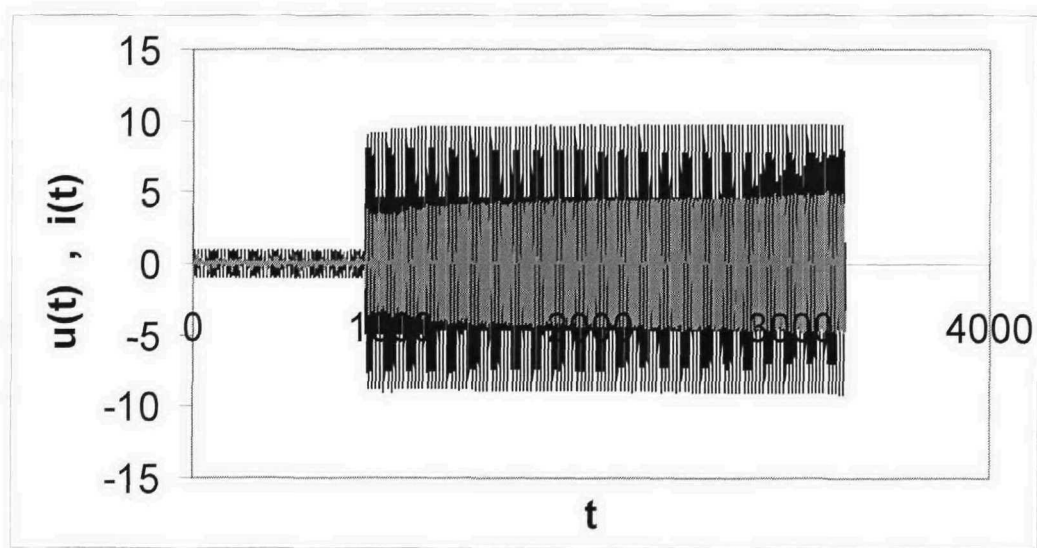


Рис. 3. 4, в Пусковой ток и напряжение асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при мягком пуске по осциллографированию

В то же время преднамеренное снижение напряжения, подаваемого на статорные обмотки, используется при регулировании скорости асинхронного двигателя, и для обеспечения плавности пуска (рис.3. 4, з). Регулирование скорости асинхронного двигателя путем изменения питающего напряжения сопряжено с возможностью перегрева его ротора и может производиться лишь при снижении относительно номинального момента сопротивления на валу двигателя в использовании двигателя с повышенным скольжением. Рассмотрим механические характеристики асинхронного короткозамкнутого двигателя с повышенным скольжением при регулировании напряжения статора.

При снижении напряжения U_1 критическое скольжение двигателя и скорость идеального холостого хода ω_0 остаются постоянными, а максимальный момент M_k двигателя уменьшается пропорционально квадрату снижения напряжения, соответственно снижается жесткость рабочей части механической характеристики двигателя

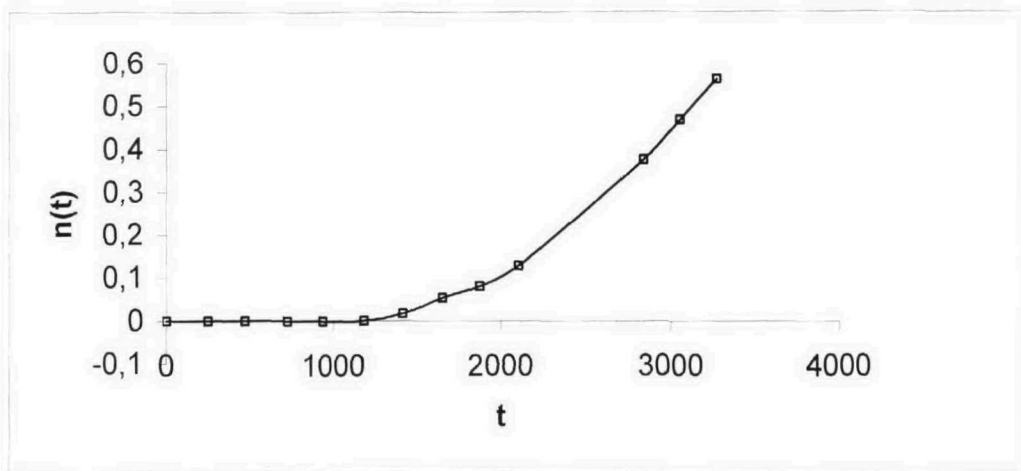


Рис. 3. 4, з. Скорости асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при софтстартерном пуске по осциллографированию

Диаграмма изменения напряжения и скорости во времени на зажимах статора двигателя изображена на рис. 3. 4, д.

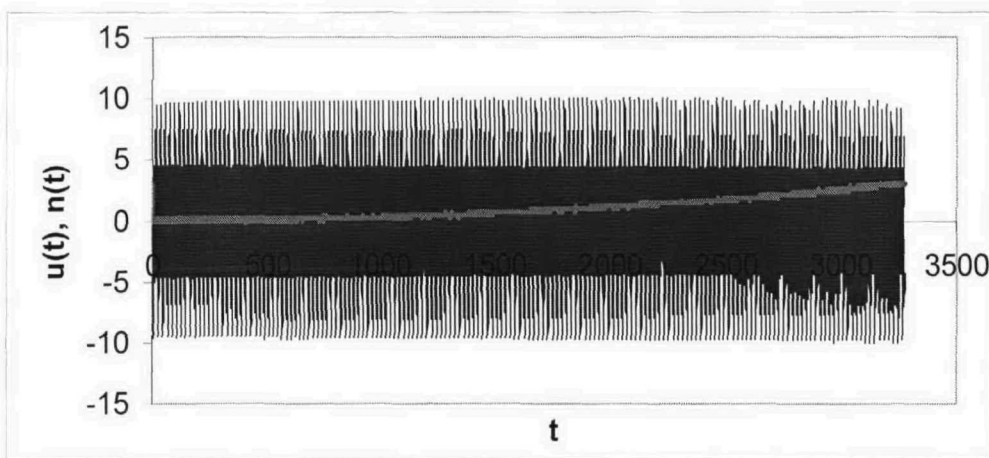


Рис. 3. 4, д. Напряжение и скорость асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при софтстартерном пуске по осциллографированию

Сравнительный анализ электрических параметров двух пусков показал различие между осциллограммой и программой SAD тока, напряжением и скорости. Согласно программе SAD, в момент пуска происходит резкий скачок тока статора до пускового тока и продолжается до номинального пуска через 3,72 с. По осциллограмме момент пуска тока статора начинается после 0,89 с

начала работы и приходит к номинальному току через 3,271 с. Параметры тока статора совершенно изменяются в процессе пуска с единственной разностью в амплитуде тока. Это показано на рис. (3. 5, *a*).

По программе SAD, в момент пуска происходит резкое падение напряжения статора и восстанавливается номинальное напряжение через 3,72 с. На осциллограммах напряжения ротора в момент пуска начинается работа после 0,89 с и восстанавливается номинальное напряжение через 3,271 с. (рис. 3.5, *б*). На осциллограммах напряжения ротора в момент пуска отмечаются изменения параметров.

При анализе оснащения напряжения и скорости в пуске согласно программе SAD в момент пуска напряжение и скорость восстанавливаются номинальными величинами через 3,72 с. А при пуске по осциллограмме напряжение и скорость начинаются после 0,89 с., и они восстанавливаются номинальными величинами через 3,271с.

Сравнительная характеристика различных прямых пусков асинхронного короткозамкнутого двигателя приведена на (рис. 3. 5, *a, б, в и г*).

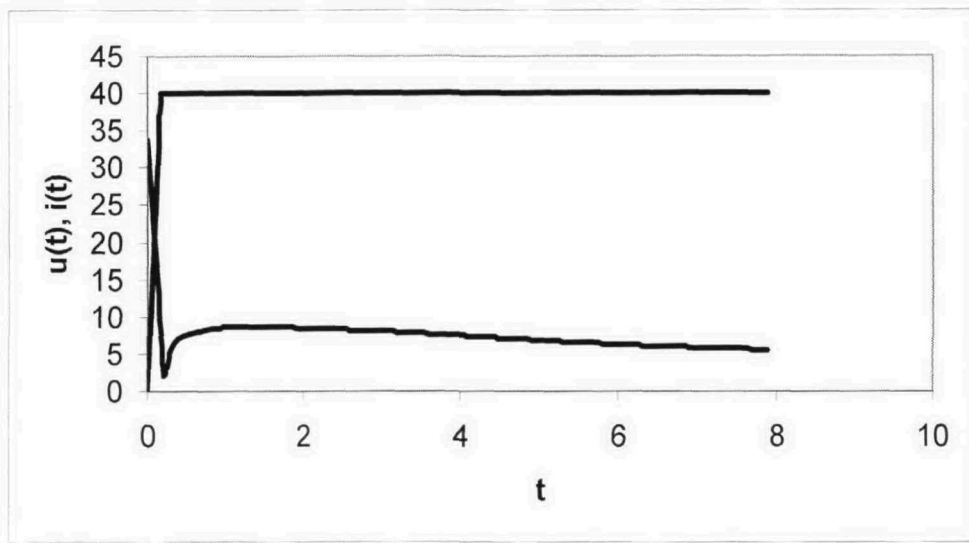


Рис. 3. 5, а. Пусковой ток и напряжение асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при софтстарторном пуске по программе SAD

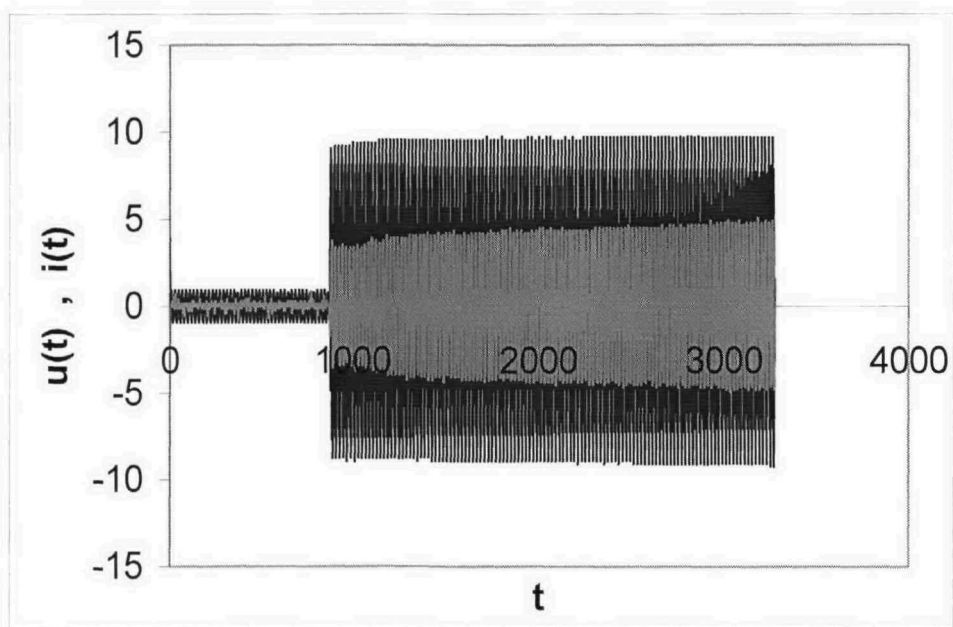


Рис. 3. 5, б. Пусковой ток и напряжение асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при софтстарторном пуске по осциллографированию

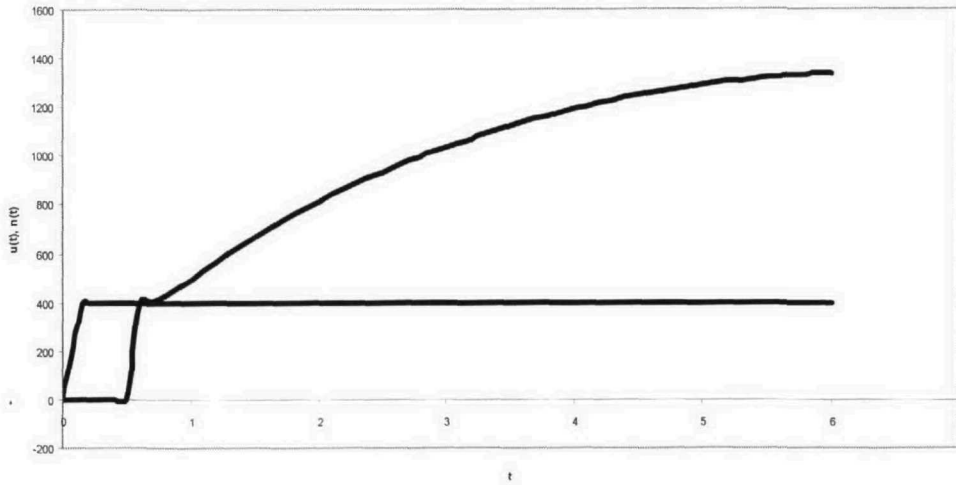


Рис. 3. 5, в. Напряжение и скорость асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при софтстарторном пуске по программе SAD

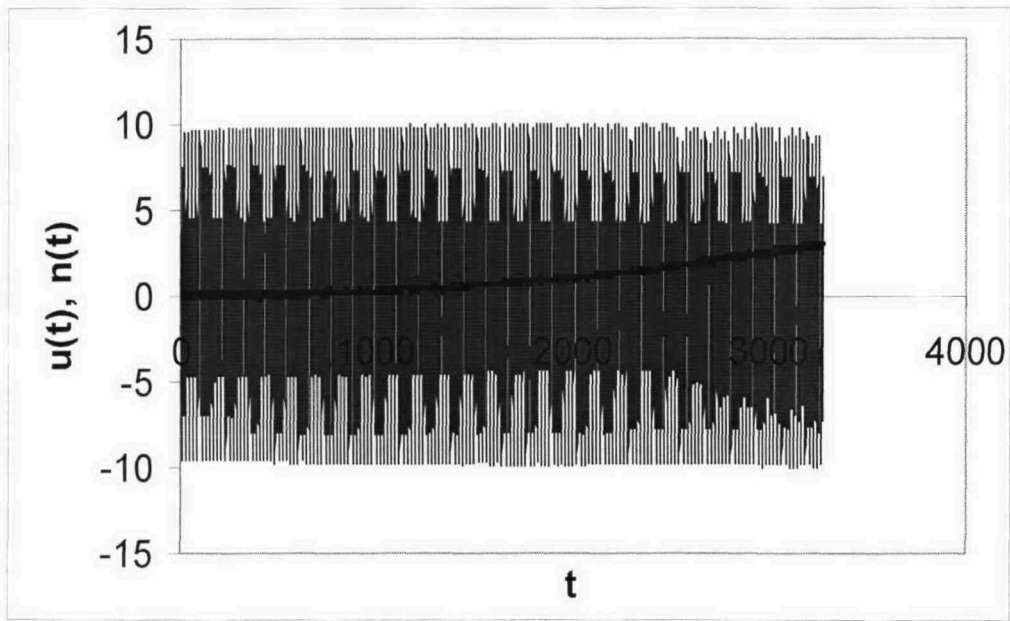


Рис. 3. 5, г. Напряжение и скорость асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при софтстарторном пуске по осциллографированию

3. 3. Пример расчета динамики различных способов пуска для привода с асинхронным двигателем 4А355М4

Для проведения вычислительного эксперимента принимались следующие условия:

- полная загрузка двигателя составляет 75 % номинальной, момент сопротивления носит вентиляторный характер;
- момент трогания задавался равным 12 % номинального момента;
- пуск осуществляется при разгруженном рабочем механизме,
- коэффициент загрузки для пускового режима составляет 0,25 номинального;
- система плавного пуска работает с пусковым импульсом напряжения, равным по амплитуде 50 % номинального значения и имеющим длительность 0,2 с;
- начальные значения напряжения задавались равными 30 % номинального значения для системы плавного пуска и 10 %

излагаются результаты вычислительных экспериментов, проведенных с целью изучения влияния пусковых устройств на энергетические и ряд других показатели пуска привода переменного тока. Все исследования выполнялись для приведенного выше примера асинхронного привода. Примеры полученных зависимостей приведены на рис.3. 6 – 3. 8.

Анализ представленных и аналогичных зависимостей позволяет сделать некоторые выводы. В качестве параметров, определяющих качество пускового режима, были приняты следующие:

- затраты активной и реактивной энергии на процесс пуска;
- суммарное значение теплового импульса, накопленного электродвигателем в процессе пуска;

- значение теплового импульса, накопленного двигателем за то время, когда ток статора превышает в процессе пуска свое номинальное значение;
- максимальное действующее значение тока статора двигателя
- максимальное значение углового ускорения привода в процессе пуска.

Анализ результатов вычислительного эксперимента показывает, что способа пуска, имеющего наилучшие показатели по всем перечисленным параметрам, не существует.

Так затраты активной мощности на пуск привода минимальны для прямого пуска и монотонно увеличиваются для применения любых пусковых устройств с ростом длительности пуска. Такая закономерность известна достаточно давно, однако требовала подтверждения для случая использования современных пусковых устройств. В целом, наибольшие затраты активной энергии на пуск электропривода характерны для систем с устройствами плавного пуска. Следует учитывать, что в данном случае рассматривался не нагруженный пуск привода. Для случая пуска полностью загруженного привода это различие станет еще более существенным. Расход реактивной энергии по сравнению со случаем прямого пуска может заметно снижаться в приводах с системами частотного пуска. Однако необходимо учитывать, что в диссертации анализируются только затраты реактивной энергии на основной гармонике. Учет мощности искажений, неизбежных при использовании любых полупроводниковых пусковых устройств, может существенно изменить этот вывод. Для систем плавного пуска расход реактивной энергии существенно возрастает. Учет мощности искажений сделает данное отличие еще более заметным.

Существенными факторами, влияющими на моторесурс электродвигателя и, следовательно, на его срок службы, являются величины теплового импульса, получаемого машиной при пуске, и величина пускового тока. Тепловой импульс предлагается рассматривать в двух его составляющих: суммарный тепловой импульс, накапливаемый двигателем в процессе пуска, и тепловой импульс,

накапливаемый двигателем за тот отрезок времени при пуске, пока величина тока статора превышает свое номинальное значение. Анализ результатов вычислительных экспериментов показывает, что для приводов с системами плавного пуска обе эти величины всегда больше номинального значения, за которое принимается тепловой импульс, накапливаемый двигателем при прямом пуске. При этом величины теплового импульса меньше, чем при пуске с применением устройств автоматического переключения статорных обмоток «звезда-треугольник», только при временах разгона незначительно превышающих постоянную времени привода. При использовании систем частотного пуска тепловой импульс существенно снижается, независимо от закона регулирования частоты. Некоторую корректировку этих результатов может дать учет дополнительных потерь, вызываемых несинусоидальностью напряжения на выходе полупроводниковых пусковых устройств.

Снижение пусковых токов достигается при использовании любых пусковых устройств. Особенно существенно снижение пусковых токов при использовании систем частотного пуска, управляемых по закону $\frac{U}{f} = const$.

Следует отметить, что для систем плавного пуска при значительных временах разгона величина максимального тока определяется только амплитудой пускового импульса напряжения. При малых значениях времени разгона максимальные значения тока статора снижаются в меньшей степени.

Ряд приводов требует ограничения максимальных значений угловых ускорений в процессе их разгона. Данная задача также может решаться с помощью применения различных пусковых устройств. Результаты выполненных исследований показывают, что существенного снижения этого параметра можно добиться только при достаточно больших временах разгона. Лучшими показателями в этом отношении обладают системы частотного пуска. Однако, следует отметить, что применение устройств автоматического переключения

статорных обмоток «звезда-треугольник» в некоторых случаях может давать даже лучший результат, особенно при относительно малых временах разгона.

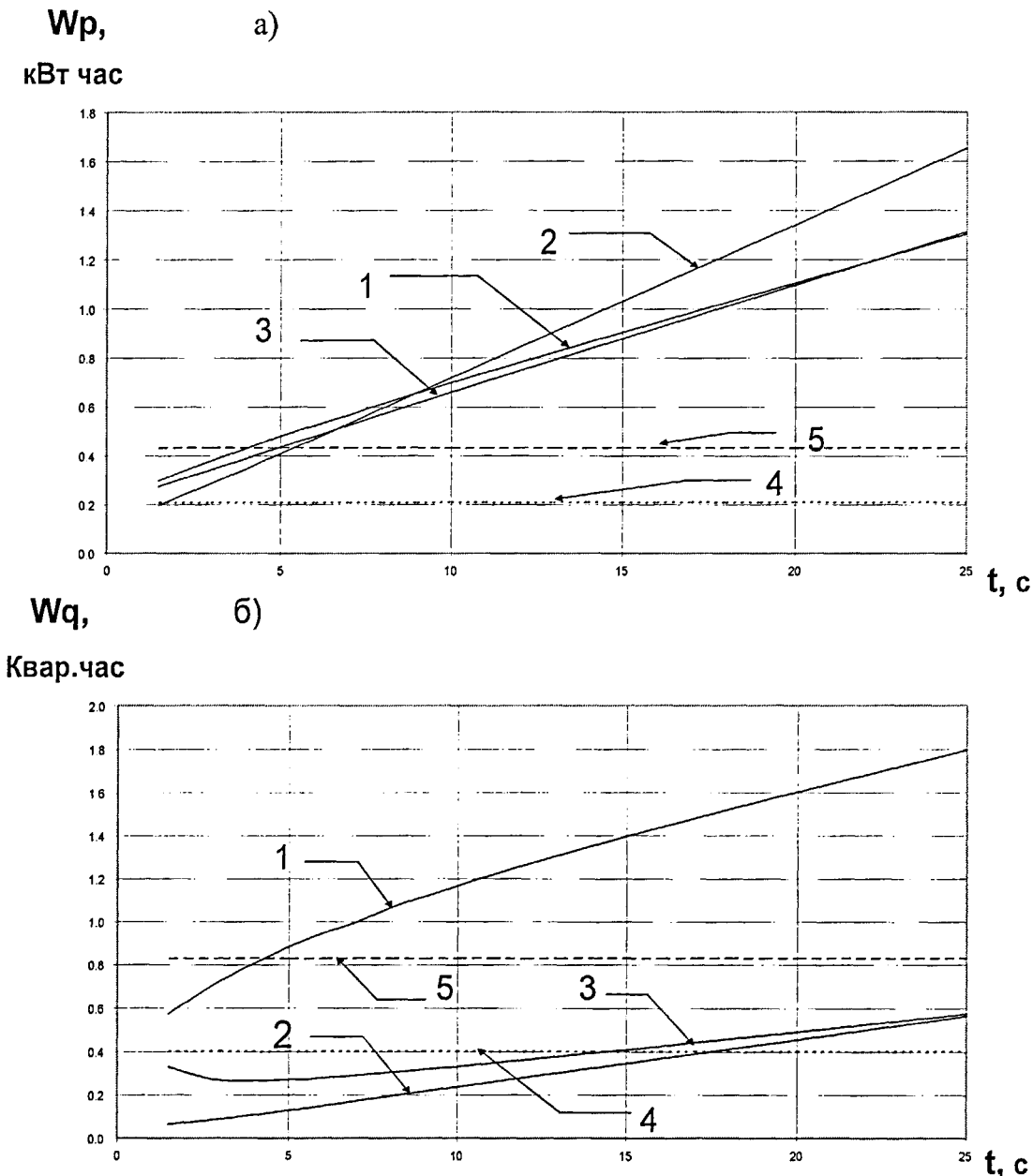
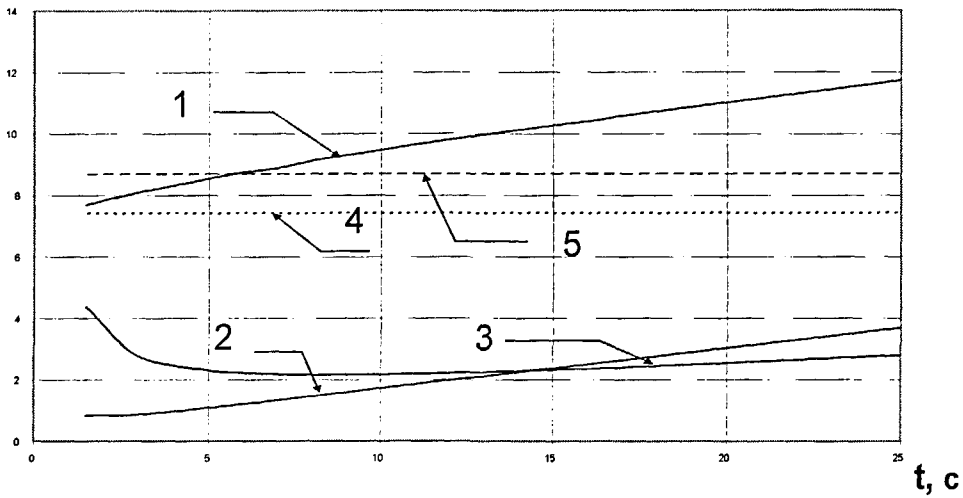


Рис. 3. 6. Расход энергии (кВт.час) в зависимости от длительности разгона при различных способах пуска; а) активной; б) реактивной.
 1- пуск с устройством плавного пуска; 2- разгон привода с устройством частотного пуска при законе регулирования $\frac{U}{f} = const$.; 3- разгон привода с устройством частотного пуска при законе регулирования $\frac{U}{f^2} = const$.; 4- уровень расхода энергии для прямого пуска; 5- уровень расхода энергии для пуска с устройством автоматического переключения обмотки

КА**2.С

а)



КА**2.С

б)

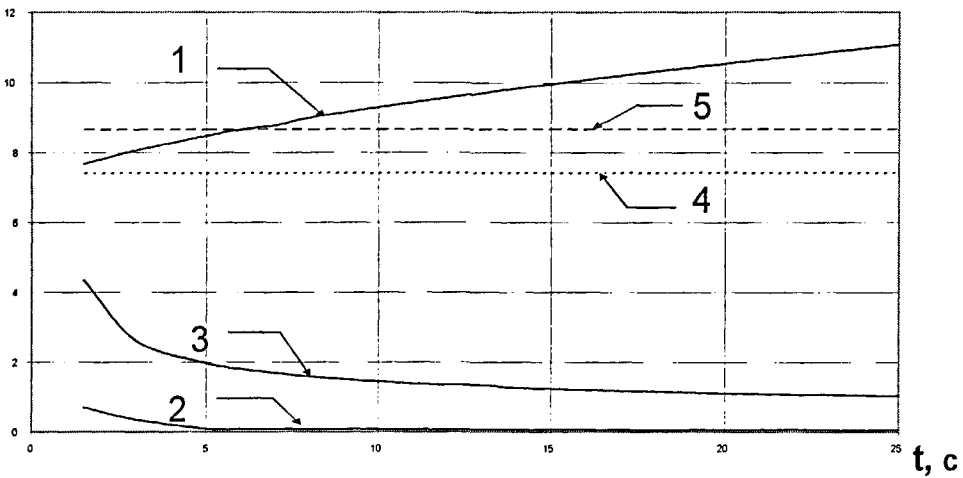
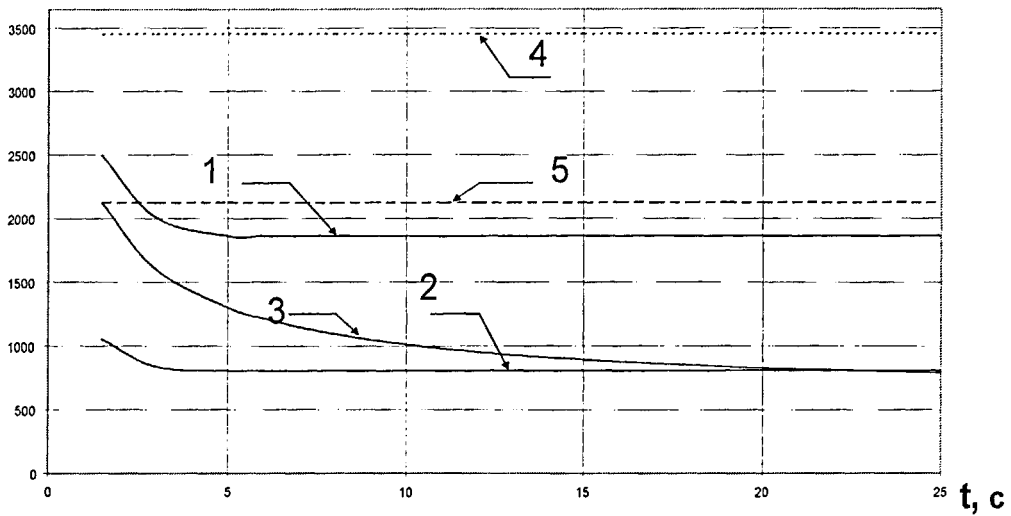


Рис.3. 7. Значения накопленного теплового импульса ($A^2 \cdot c$) в зависимости от длительности разгона при различных способов пуска: а) суммарный тепловой импульс; б) тепловой импульс, накопленный за то время, когда ток статора превышает в процессе пуска свое номинальное значение.

1- пуск с устройством плавного пуска; 2- разгон привода с устройством частотного пуска при законе регулирования $\frac{U}{f} = const$; 3- разгон привода с устройством частотного пуска при законе регулирования $\frac{U}{f^2} = const$; 4- тепловой импульс при прямом пуске; 5- тепловой импульс при пуске с устройством автоматического переключения обмотки

$I_{max},$
A

а)



$\epsilon_{max},$
рад/с

б)

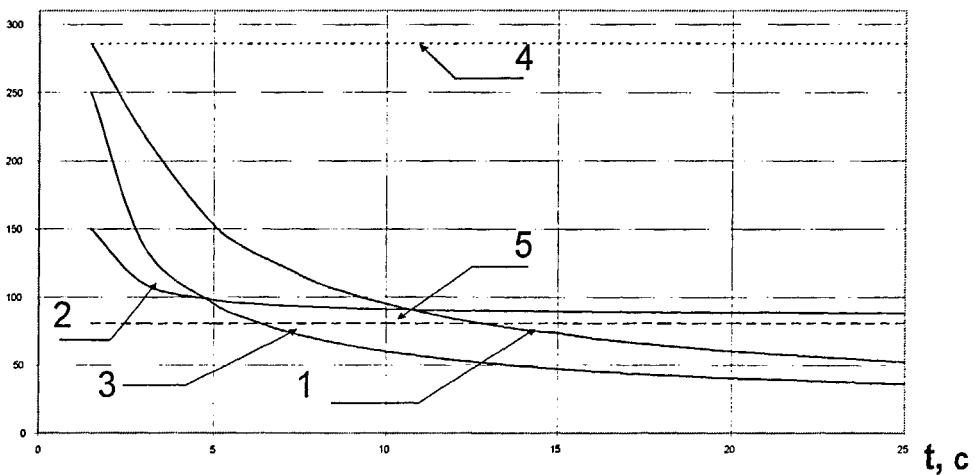


Рис. 3. 8 . Максимальные значения параметров в зависимости от длительности разгона при различных способах пуска : а) действующее значение статора (A); б) угловое ускорение (рад/с²)

1. пуск с устройством плавного пуска; 2- разгон привода устройством частотного пуска при законе регулирования $\frac{U}{f} = const.$; 3- разгон привода с устройством частотного пуска при законе регулирования $\frac{U}{f^2} = const.$; 4- прямой пуск; 5- пуск с устройством автоматического переключения обмотки

Выводы

В целом в диссертационной работе получены следующие результаты и выводы

1. Построены электромеханические модели для устройств плавного пуска, пуска автоматическим переключением обмоток статора звезда/треугольник, частотного пуска. Данные модели позволяют исследовать динамику и энергетические показатели пуска, используя только каталожные данные электродвигателей и приводов и параметры настройки пусковых устройств.
2. Существующие устройства плавного и частотного пуска позволяют решить задачи обеспечения достаточно мягкого пуска, ограничить пусковые токи и температурное воздействие на привод в процессе его разгона. Устройства частотного пуска обладают в комплексе наилучшими показателями по большинству критериев. Устройства плавного пуска в целом имеют более низкие показатели.
3. Во многих случаях проблемы пуска могут быть решены применением устройств автоматического переключения статорных обмоток «звезда-треугольник», что особенно важно с учетом их значительно меньшей стоимости и высокой надежности.
4. Существующие устройства плавного и частотного пуска не позволяют снижать расход электрической энергии на разгон привода и, более того, всегда повышают его. Для каждого конкретного случая необходимо производить технико-экономическое обоснование использования устройств плавного и частотного пуска, в особенности для приводов большой мощности.
5. Разработанные модели реализованы в виде программных модулей

комплекса SAD, предназначенного для расчета режимов и электромеханических переходных процессов в электротехнических системах промышленных предприятий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамов Б.И., Дрожжин А.С., Дронов А.С. и др. Частотно-управляемые электроприводы на базе высоковольтных преобразователей // Электротехника. - 2001. - № 1.
2. Алексеев А.Е. Конструкция электрических машин. Госэнергоиздат 1964г
3. Аникеев Г.И. Нестационарные почти периодические колебания роторов. -М.: Наука, -1979. 136с.
4. Башарин А.В., Голубев Ф.Н., Кепперман В.Г. Примеры расчета автоматизированного электропривода. Л.: Энергия, 1972. 440 с.
5. Белоусенко И. В. Шварц Г. Р. Великий С. Н. Ершов М. С. Яризов А. Д. Новые технологии и современное оборудование в электроэнергетике газовой промышленности
6. Бендат Дж, Пирсол А. Применение корреляционного и спектрального анализа. - М.: Мир, 1983. 312с.
7. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. М.: Наука, 1972.450 с.
8. Боголюбов Н.Н., Митропольский Ю.А. Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний. - М.: Наука, 1974. - 504 с.
9. Брускин Д. Э., Зорохович А. Е., Хвостов В. С. Электрические машины. М., 1979. Ч. I.—282 с. Ч. II.—303 с.
10. Большман Я. М. Справочник по проектированию электропривода и силовых осветительных установок. — М.: Энергия, 1974.
11. Важнов А.И. Электрические машины. Издательство «ЭНЕРГИЯ», 1966г
12. Вешневский С.Н. Характеристики двигателей в электроприводе. М.-Л.: Энергия, 1977. 432 с.
13. Вибрации в технике. Справочник. Т.2./ Под редакцией И.И. Блехмана. - М.:Машиностроение, -1979. - 352 с.

14. Вольдек А.И. Электрические машины. Издательство «ЭНЕРГИЯ», 1974 г. 840 с
15. Гейлер Л.Б. Основы электропривода.- Мн.: Высшая школа, 1972.
16. Герасимов В.Г. Электротехника и электроника: книга 3 Электрические измерения и основы электроники. М.: Энергоатомиздат, 1998 г.
17. Голован А.Т. Основы электропривода. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1959. 344 с.
18. Данилевич Я. Б., Домбровский В. В., Казовский Е. Я. Параметры электрических машин переменного тока. - Л.: Наука. 1965. - 340 с.
19. Дацковский А.Х., Кузнецов И.С., Роговой В.И. и др. К вопросу применения быстроходных частотно-регулируемых электроприводов магистральных газопроводов//Электротехника. — 2001. — № 1.
20. Дерцакян А. К. Перспективы развития и размещения газовой промышленности // Обзор.информ. Сер. Важнейшие научно-технические проблемы газовой промышленности. 1985. Вып.6. 72 с.
21. Дзюбин И. И. Тиристоры в электрических схемах. — М.: Энергия, 1972.
22. Жежеленко И. В. Показатели качества электроэнергии на промышленных предприятиях. М.: Энергия, 1977. 127 с.
23. Жежеленко И. В., Рабинович М. Л., Божко В. М. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях. Киев.: Техника, 1981, 160 с.
24. Жерве Г.К. Промышленные испытания электрических машин. - Л.: Энергоатомиздат, 1987. - 324 с.
25. Зарицкий С. П. Диагностика газоперекачивающих агрегатов с газотурбинным приводом. - М.: Недра, 1987. - 175 с.
26. Зимин Е. Н., Чувашов И. И. Электрооборудование промышленных предприятий. Ч. 1. — М.: Стройиздат, 1977.
27. Зимин В. И., Кап-лан М. Я, Палей А. М. и др. Обмотки электрических машин. М., 1975—288 с.
28. Иванов—Смоленский А. В. Электрические машины. М., 1980.--928 с.

29. Ильинский Н.Ф. Электроприводы постоянного тока с управляемым моментом. М.: Энергоиздат, 1981. 144 с.
30. Ильинский Н.Ф. Рожанковский Ю.В., Горнов А.О. Энергосбережение в электроприводе. М.: Высшая школа, 1989. 127 с.
31. Кацман М.М. Электрические машины. — М.: Издательский центр «Академия», 2003.
32. Келим Ю. М. Типовые элементы систем автоматического управления. — М.: «Форум», 2002.
33. Ключев. В.И. Теория электропривода. М.: Энергоатомиздат, 1985. 560 с.
34. Ключев В.И. Ограничение динамических нагрузок электропривода. М.: Энергия, 1972. -320с.
35. Ковчин С. А., Сабинин Ю. А. Основы электропривода. С.-П.: Энергоатомиздат, 1994. 496 с.
36. Кононенко Е.В., Сипайлов Г. А., Хорьков К.А. Электрические машины. - М.: Высшая школа, 1987. - 279с.
37. Кравчик А.Э. и др. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1982. 504 с.
38. Копылов И. П. Электрические машины. М., 1986.—360 с.
39. Костенко Г. Н., Пиотровский Л. М. Электрические машины. Л., 1972. Ч. 1.— 544 с.; 1973. Ч. II. —648 с.
40. Ла-Салль Ж., Левшиц С. Исследование устойчивости прямым методом Ляпунова. - М.: Мир, 1964. - 168 с.
41. Левщик-Гарик М. Обмотки машин переменного тока.. Госэнергоиздат 1964г.
42. Меньшов Б.Г., Ершов М.С., Яризов А.Д. Электротехнические установки и комплексы в нефтегазовой промышленности: Учеб. для вузов. — М.: Недра, 2000.

43. Меньшов Б. Г., Доброжанов В. И., Ершов М. С. Теоретические основы управления электропотреблением промышленных предприятий. Издательство «Нефть и Газ», - М. : 1995
44. Меньшов Б. Г. Ершов М. С. надежность электроснабжения газотурбинных компрессорных станций. М. : «НЕДРА» 1995
45. Меньшов Б.Г. Ершов М. С. Вопросы управления электротехническими системами нефтегазовых комплексов в аварийных режимах // Промышленная энергетика, 1995 № 9.
46. Михайлов В. В., Жуков Ю. С., Суд И. И. Энергетика нефтяной и газовой промышленности. М.: Недра, 1982. 350 с.
47. Онищенко Г. Б. Электрический привод. Учебник для вузов – М. : РАСХН. 2003 – 320. : ил.
48. Основы автоматизированного электропривода/М. Г. Чиликин, М- М. Соколов, В. М. Терехов, А. В. Шинянский. М.: Энергия, 1974. 567 с.
49. Петров Г. Н. Электрические машины. Ч. II. Асинхронные и синхронные машины. 1963.—416 с.
50. Пиотровский Л. М., Васютинский С. Б., Несговорова Е. Д. Испытание электрических машин. Ч. 2. М., 1960. — 290 с.
- 51..Повышение качества электрической энергии в промышленных электрических сетях // Материалы конференции. М.: МДНТП, 1982. 176 с.
52. Потапов В. Д., Яризов А. Д. Имитационное моделирование производственных процессов в горной промышленности. - М.: Высшая школа, 1981.-191 с.
53. Попов В.И. Ахонов Т. А. Макаров Л. Н. современные асинхронные электрические машины: новая российская серия РА 1999
54. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей Правила техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей. М.: Энергоатомиздат, 1986г

55. Проектирование электрических машин./Под ред. И. П. Копылова. М., 1980.—495 с.
56. Справочник по автоматизированному электроприводу/Под ред. В. А. Елисеева и А. В. Шинянского. М.: Энергоатомиздат, 1983. 616 с.
57. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных электродвигателей. Госэнергоиздат, 1963г.
58. Трифоном А. А. Электромеханическая модель асинхронного двигателя с учетом магнитных потерь в роторе. // Международная конференция: «новые в идеи в науках о Земле». Материялы докладов. Т.3. – М.: КДУ, 2005.
59. Технический уровень основного оборудования и требования по его совершенствованию. 2-е изд., откорректированное по состоянию на ноябрь 1985 г. Мингазпром, Техническое управление. М., 1985. 275 с.
60. Уайт Д., Вудсон Г. Электромеханическое преобразование энергии. М.-Л.: Энергия, 1964. 527 с.
61. Хайлов Н.Н. Исследование механических переходных процессов электропривода. Государственная Академия нефти и газа имени И.М. Губкина. Москва-1993 г.
62. Хализев Г. П. Электрический привод. — М.: Высшая школа, 1977.
63. Цейтлин Л. С. Электропривод, электрооборудование и основы управления. М. : «высшая школа », 1985
64. Чабан В.И. Основы теории переходных процессов электромашинных систем. Львов: Высшая школа, 1980. 200 с.
65. Чиликин М. Г., Соколов М. М., Терехов В. М., Шинянский Л. В. Основы автоматизированного электропривода. — М.: Энергия, 1974.
66. Чиликин М. Г., Ключев В. И., Сандлер А.С. Теория автоматизированного электропривода. М.: Энергия, 1979. 616с.
67. Чиликин М.Г., Сандлер А.С. Общий курс электропривода. М.: Энергоиздат, 1981.567с.

68. Шёнфельд Р., Хабигер Э. Автоматизированные электроприводы: Пер. с нем. / Под ред. Ю.А. Борцова. - Л.: Энергоатомиздат, 1985. - 464 с.
69. Электромагнитные переходные процессы в асинхронном электроприводе / М. М. Соколов, Л. П. Петров, Л. Б. Масандилов, В. А. Ладензон. - М.: Энергия, 1971.-624 с.
70. Электроприводы постоянного и переменного тока с улучшенными динамическими и энергетическими показателями. -Тр. Моск. энерг. ин-та, 1982. -Вый. 570. - 108 с.
71. Энергосберегающие технические решения в электроприводе / Под ред. А. О. Горнова. - М.: Изд-во МЭИ, 1991. - 56 с.
72. Cyril W. Lander, Power Electronics, Second Edition ,London, 1987.
73. Fitzgerald, A. E., Electrical Machinery, McGraw-Hill, New York, 1971.
74. Ghandhi, S. K., Semiconductor Power Devices, Wiley, New York, 1977.
75. Morton, A. H., Advanced Electrical Engineering, Pitman, London, 1966, p. 221
76. Mullard Technical Handbook, Semiconductor Devices, Mullard Ltd., London
77. Pelly, B. R., Thyristor Phase-Controlled Converters and Cycloconverters, Wiley, New York 1971.
78. Silicon Controlled Rectifier Manual, General Electric Company, New York.