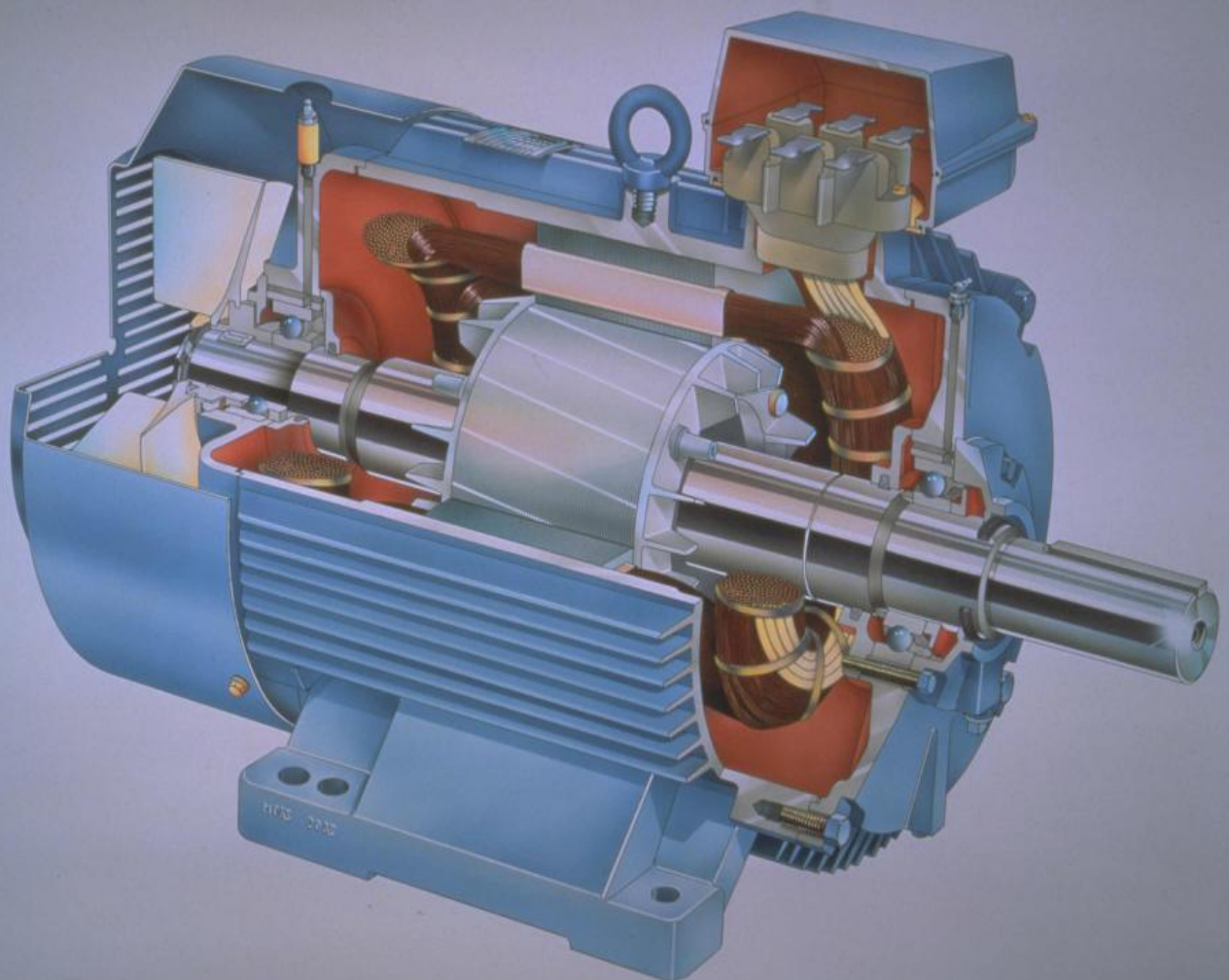


О.В. Арсентьев, Ю.В. Коновалов

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИВОД

Учебное пособие



О.В. Арсентьев, Ю.В. Коновалов

***ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ
ПРИВОД***
Учебное пособие

2013

1. Введение

Широкое внедрение прогрессивных видов современного автоматизированного электропривода позволяет наиболее эффективно решать задачи интенсификации, механизации и автоматизации производства.

По общепринятому определению электрический привод (электропривод) представляет собой электромеханическую систему, предназначенную для приведения в движение исполнительных органов рабочей машины и управления этим движением. Автоматизация электропривода расширяет его возможности: осуществляет автоматизированное управление процессом в соответствии с заданной программой или в зависимости от изменяющихся условий работы.

Процесс автоматизации сводит к минимуму участие человека (оператора) в управлении работой электропривода (ЭП). Во многих случаях системы автоматизированного электропривода работают автономно и выполняют свои функции только в соответствии с реализованными в них принципами регулирования.

В связи с этим к электроприводу предъявляются достаточно жесткие требования, т.к. от качества его работы зависит действие сложных и дорогостоящих производственных механизмов. Нарушение функций электропривода может привести к остановке технологического процесса, что на многих установках совершенно не допустимо по условиям эффективности и безопасности производства.

Для выполнения своих функций ЭП должен вырабатывать механическую энергию за счет электрической энергии, получаемой от сети электроснабжения.

При создании (проектировании) новых систем электропривода или модернизации уже существующих выбирают серийно выпускаемые двигатели с соответствующей пуско-регулирующей аппаратурой, которые обеспечили бы наилучшее выполнение возлагаемых на них функций и соответствовали бы условиям работы ЭП и рабочей машины. Их паспортные данные должны быть близки к расчетным для данной системы ЭП, а их конструктивное исполнение соответствовать условиям работы электропривода.

В зависимости от типа применяемого электродвигателя (постоянного тока, переменного тока – синхронный или асинхронный) существуют соответствующие виды систем электроприводов. Род электрического преобразовательного устройства (управляемый выпрямитель, преобразователь частоты, система генератор-двигатель и пр.) так же во многом определяется типом управляемого

электродвигателя. Из вышесказанного можно сделать вывод, что основные характеристики электропривода и конструкция устройств, входящих в его структуру, зависят от того, какой электродвигатель используется для основного преобразования электрической энергии в механическую энергию перемещения исполнительного органа рабочей машины.

Современный электропривод состоит из ряда устройств, каждое из которых выполняет собственные функции. Для определения их взаимодействий рассмотрим типовую структурную схему автоматизированного электропривода АЭП (рис. 1).

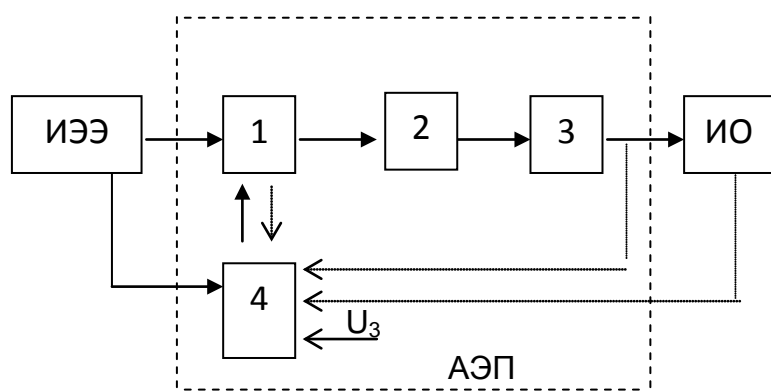


Рис.1 Структурная схема автоматизированного электропривода

В общем случае АЭП состоит из преобразовательного (1), электродвигательного (2), передаточного (3) и управляющего (4) устройств. Электрическая энергия подается на преобразовательный и управляющий блоки, образующие систему управления (СУ) АЭП, от источника электрической энергии (ИЭЭ). Передаточное устройство передает механическую энергию непосредственно исполнительному органу (ИО) рабочей машины. Управляющее устройство служит для выработки сигнала управления, поступающего на преобразовательное устройство и являющегося функцией задающего сигнала U_3 и обратных связей (пунктирные стрелки).

Важнейшим элементом электропривода является двигатель, параметры которого должны соответствовать характеристикам приводимого механизма во всех режимах работы данной установки. Именно он осуществляет преобразование электрической энергии в механическую. Остальные элементы АЭП осуществляют управление электромеханическим преобразованием и передают механическую энергию к ИО. Правильный выбор электродвигателя определяет качество работы АЭП и производительность установки.

Работа электропривода определяется действием двух факторов: момента, развиваемого двигателем, и момента нагрузки, соответствующей потребляемой ИО механической энергии. Основным критерием при выборе электродвигателя является соответствие его механической мощности с ожидаемой нагрузкой. Вращающий момент на валу двигателя должен быть больше приведенного момента нагрузки. При выборе электродвигателя необходимо произвести некоторые расчеты, которые позволят учесть особенности производственного процесса: характер изменения момента нагрузки, частоту циклов пуск-остановка. Асинхронный двигатель с фазным ротором при работе в составе АЭП требует подбора соответствующих резисторов в цепь ротора для обеспечения требуемых механических и электромеханических характеристик при установившихся и переходных режимах работы.

Оптимальный режим работы электромеханического преобразователя определяется его тепловым состоянием. Выбор для АЭП электродвигателя недостаточной мощности приводит к его перегреву и преждевременному выходу из строя, при недоиспользовании двигателя снижаются энергетические показатели электропривода, увеличивается установленная мощность его остальных устройств.

Известно, что наиболее широко в промышленности применяются асинхронные двигатели (до 70% от общего числа электродвигателей), поэтому в настоящее время особенно актуально разрабатывать и применять АЭП, в которых используется именно этот тип электрических машин. Обусловлено это тем, что этот тип электродвигателей наиболее прост по конструкции и технологичен в изготовлении при достаточно высокой надежности в работе. До недавнего времени, разработка АЭП на базе асинхронных двигателей была затруднена из-за сложности регулирования координат (частоты вращения ротора, напряжения на статоре и т.д.). Развитие полупроводниковой техники позволило расширить область ее применения в управляемом электроприводе. Разработаны и широко применяются недорогие и надежные в работе управляемые выпрямители, инверторы, преобразователи частоты и пр. преобразовательные и управляющие устройства, которые позволяют достаточно эффективно воздействовать на электромеханический процесс преобразования.

Таким образом, при разработке системы АЭП первоначально следует определить тип применяемого электродвигателя и путем проведения необходимых расчетов установить его соответствие предполагаемому режиму работы производственного механизма. Правильно выбранный электродвигатель для системы АЭП позволяет наиболее полно реализовывать функции электропривода и оптимизировать его участие в производственном процессе.

2. Выбор асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором для электропривода

Общие принципы выбора электродвигателей

Выбор электродвигателя имеет большое экономическое значение, так как от этого зависят производительность исполнительного органа, энергетические показатели электропривода и надежность установки.

Основными энергетическими показателями электродвигателя в общем случае являются его КПД (η) и коэффициент мощности ($\cos \varphi$). Их величины зависят от типа двигателя, его номинальной мощности (P_H) и частоты вращения, а также нагрузки на валу. При одинаковой мощности экономически наиболее выгодным является двигатель, для которого η и $\cos \varphi$ имеют наибольшую величину, поскольку ток двигателя:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \eta \cdot \cos \varphi}$$

принимает наименьшее значение.

При работе двигателя выделяющиеся в нем потери вызывают нагрев его элементов. Допустимый нагрев определяется теплостойкостью используемых изоляционных материалов, которые делятся на семь классов, отличающихся допустимой температурой (Табл.1).

Таблица 1

Классы изоляционных материалов

Класс изоляции	Y	A	E	B	F	H	C
Допустимая температура, °C	90	105	120	130	150	180	Свыше 180

Наиболее распространенной для обмоток электродвигателей является изоляция классов В, F и H. Для установок, работающих в среде с высокой температурой и при тяжелых условиях эксплуатации, а также для особо ответственных электроприводов и установок, требующих уменьшения веса двигателя, применяют изоляцию класса H. Например, для крановых двигателей применяют изоляционные материалы классов нагревостойкости F и H.

Если в процессе эксплуатации температура обмоток двигателя не превышает допустимой для данного класса изоляции, то срок ее службы достигает 15-20 лет.

Так как электрические машины могут работать в различных температурных условиях, то для унификации определения их номинальных данных стандартную температуру окружающей среды $\theta_{ср.ст}$ принимают равной 40⁰С.

Помимо температуры окружающей среды на нагрев двигателя большое влияние оказывает интенсивность теплоотдачи его поверхности, которая зависит от скорости воздуха, проходящего через двигатель. Поэтому у двигателей с самовентиляцией при снижении скорости теплоотдача ухудшается. Чтобы двигатель, работающий при пониженной скорости, не перегрелся, необходимо снижать его нагрузку. При длительной работе таких двигателей с угловой частотой вращения (ω) ниже номинальной момент развиваемый двигателем (M) и его мощность (P) по условиям допустимого нагрева не должны превышать (ориентировочно) следующих величин в соответствии с табл.2.

Таблица 2

Зависимость момента и мощности от угловой частоты вращения

$\omega, \%$	100	90	80	70	60	50	40	25
$M, \%$	100	96	91	85	80	72	62	60
$P, \%$	100	86	73	60	48	36	25	16

У двигателей закрытого типа тепло отводится главным образом через наружную поверхность и скорость двигателя почти не оказывает влияния на его охлаждение. Поэтому допустимая нагрузка таких двигателей при работе на пониженной скорости остается неизменной.

Задача выбора мощности двигателя по условиям допустимого нагрева относительно проста при работе его с постоянной нагрузкой. Однако для большинства приводов нагрузка на валу изменяется в широких пределах. Характер изменения нагрузки задается в виде нагрузочных диаграмм привода, представляющих зависимости мощности, момента или тока во времени: $P(t)$, $M(t)$, $I(t)$. По этим диаграммам выполняется анализ нагревания двигателя и определяется возможность его использования. В случае неблагоприятных результатов проверки выбирается новый двигатель. Вторым критерием выбора мощности двигателя является возможность преодоления максимальных нагрузок. С этой целью выбранный по условиям нагрева двигатель должен быть проверен по перегрузочной способности, т.е. максимальный допустимый момент двигателя должен превышать наибольшее значение момента на нагрузочной диаграмме привода. Перегрузочная способность асинхронных двигателей определяется величиной критического

момента $M_{кр}$. С учетом возможного падения напряжения в сети максимальный момент этих двигателей принимают равным: $M_{МАХ}=(0,8...0,9) M_{кр}$.

Помимо двух основных факторов – нагрева и необходимой перегрузочной способности, при выборе двигателя необходимо учитывать его соответствие требованиям рабочей машины по механической прочности, допустимому диапазону скоростей вращения и конструктивному исполнению.

Система условных обозначений для асинхронных двигателей

Трехфазные асинхронные двигатели серии 4А. Асинхронные двигатели (АД) серии 4А предназначены для длительного режима работы S1 (ГОСТ 183-74) при питании от сети 50 Гц. Эти двигатели охватывают диапазон номинальных мощностей от 0,060 до 400 кВт и выполнены на 17 высотах оси вращения – от 50 до 355 мм. Двигатели серии 4А заменили разработанные в 1957-1959 годах двигатели серии А2 и АО2. Они могут быть основного исполнения 4А, 4АН и иметь различные модификации:

4АР – с повышенным пусковым моментом;

4АС – с повышенным скольжением;

4А...8/4 – многоскоростные (для данного обозначения 750/1500 об/мин);

4АК, 4АНК – с фазным ротором.

Существует серия асинхронных двигателей 4АМ, которая является модернизированной серией 4А с использованием более совершенных электротехнических материалов.

В настоящее время широко используются АД унифицированной серии АИ, разработанной совместно со странами Интерэлектро. Эта серия имеет шкалу мощностей из 34 ступеней от 0,025 до 400 кВт и выполнена в 18 габаритах с осями вращения (h) от 45 до 355 мм.

Двигатели с $h = 50...132$ мм выполняют с изоляцией класса нагревостойкости В; остальные – с изоляцией класса F.

В серии 4А принята следующая система обозначения:

$\frac{4A}{1 \quad 2 \quad 3 \quad 4 \quad 5 \quad 6 \quad 7 \quad 8}$

где

1 - название серии (4А);

2 - исполнение по способу защиты:

H - исполнение IP23;

отсутствие буквы - исполнение IP24;

где первая цифра - степень защиты обслуживающего персонала от соприкосновения с токоведущими частями и от попадания твердых тел внутрь корпуса. Если стоит цифра 2, то обеспечена защита от проникновения внутрь оболочки пальцев или предметов длиной не более 80 мм и от проникновения твердых тел размеров свыше 12 мм;

вторая цифра - степень защиты от проникновения воды. Если стоит цифра 3, то обеспечена защита от дождя: дождь, падающий на оболочку под углом 60 градусов от вертикали не должен оказывать вредного воздействия на изделие. Цифра 4 - это защита от брызг: вода, разбрызгиваемая на оболочку в любом направлении, не должна оказывать вредного воздействия на АД.

3 - исполнение АД по материалу станины и щитов:

A - станина и щиты алюминиевые;

X - станина алюминиевая, щиты чугунные (или обратное сочетание материалов);

отсутствие буквы - станина и щиты чугунные или стальные;

4 - высота оси вращения в мм (две или три цифры);

5 - установочный размер по длине станины:

S - меньший; M - средний; L - больший;

6 - длина сердечника статора:

A - меньшая; B - большая; отсутствие буквы означает, что выполняется только одна длина сердечника;

7 - число полюсов (2p);

8 - климатическое исполнение и категория размещения:

У - для эксплуатации в районах с умеренным климатом;

З - для эксплуатации в закрытых помещениях с естественной вентиляцией.

Для повторно-кратковременного (S3) (в отдельных случаях для кратковременного (S2)) создана специальная серия **крановых электродвигателей**, допускающая большое число включений и значительную кратность пусковых и перегрузочных вращающих моментов. С 1970 года выпускались электродвигатели серии MTF, MTH000-713. Их технические данные приведены в [7,8]. В настоящее время эти электродвигатели заменяются на новую

серию 4MT, по основным размерам и параметрам унифицированную с серией 4A. Двигатели, рассчитанные для условий эксплуатации при температуре окружающей среды $\theta_{CP,CT}$ не выше $40^{\circ}C$, имеют изоляцию класса F и типовое обозначение 4MTF, 4МТКF. Двигатели, рассчитанные для эксплуатации в тропиках и при температуре окружающего воздуха до $50^{\circ}C$ и выше (металлургия), имеют изоляцию класса H. Их типовое обозначение 4MTH, 4МТКН. Электродвигатели с высотой оси вращения свыше 200 мм изготавливаются только с изоляцией класса H.

В серии 4MT принята следующая система обозначения:

4MT						
1	2	3	4	5	6	7

где

- 1 – порядковый номер серии (4MT);
- 2 – буква К – короткозамкнутое исполнение;
- 3 – буквы F и H – тип изоляции;
- 4 – три цифры – высота оси вращения;
- 5 - условный размер двигателя по длине:
 - S - меньший; M - средний; L - больший; LB – увеличенная длина;
- 6 – число полюсов (2p);
- 7 – последняя группа знаков – климатическое исполнение:
 - У1 - для эксплуатации в районах с умеренным климатом;
 - T1 - для эксплуатации в условиях тропического климата ($+10 \dots +60^{\circ}C$);
 - ХЛ - для использования в климатических зонах с холодным климатом ($- 60 \dots + 40^{\circ}C$).

С 1986 года выпускаются двигатели для подъемно-транспортных механизмов с регулированием скорости 1:4. Двигатели первого поколения имели серию ВАКР, в настоящее время используются специальные электродвигатели кранового исполнения ВТ и 2ВКр, либо электродвигатели общего назначения серии В. По своим электромеханическим характеристикам электродвигатели серий ВТ, 2ВКр и В близки к электродвигателям серии 4А и отличаются от них лишь спецификой обеспечения взрывозащиты.

Нагрузочные диаграммы и тепловые режимы работы электроприводов

Рабочие машины по характеру изменения нагрузки на валу могут быть отнесены к нескольким группам с типовыми режимами. Существующая классификация предусматривает восемь режимов с условными обозначениями от S1 до S8:

- продолжительный номинальный режим работы S1;
- кратковременный номинальный режим работы S2;
- повторно-кратковременный номинальный режим работы S3;
- повторно-кратковременный номинальный режим работы с частыми пусками S4;
- повторно-кратковременный номинальный режим работы с частыми пусками и электрическим торможением S5;
- перемежающийся номинальный режим работы S6;
- перемежающийся номинальный режим работы с частыми реверсами S7;
- перемежающийся номинальный режим работы с двумя или более угловыми скоростями S8.

В соответствии с этим разделением точно так же определены режимы работы электродвигателей.

Рассмотрим наиболее часто встречающиеся нагрузочные диаграммы режимов работы электродвигателей (рис.2): продолжительного S1 (а), кратковременного S2 (б) и повторно-кратковременного S3 (в) режимов.

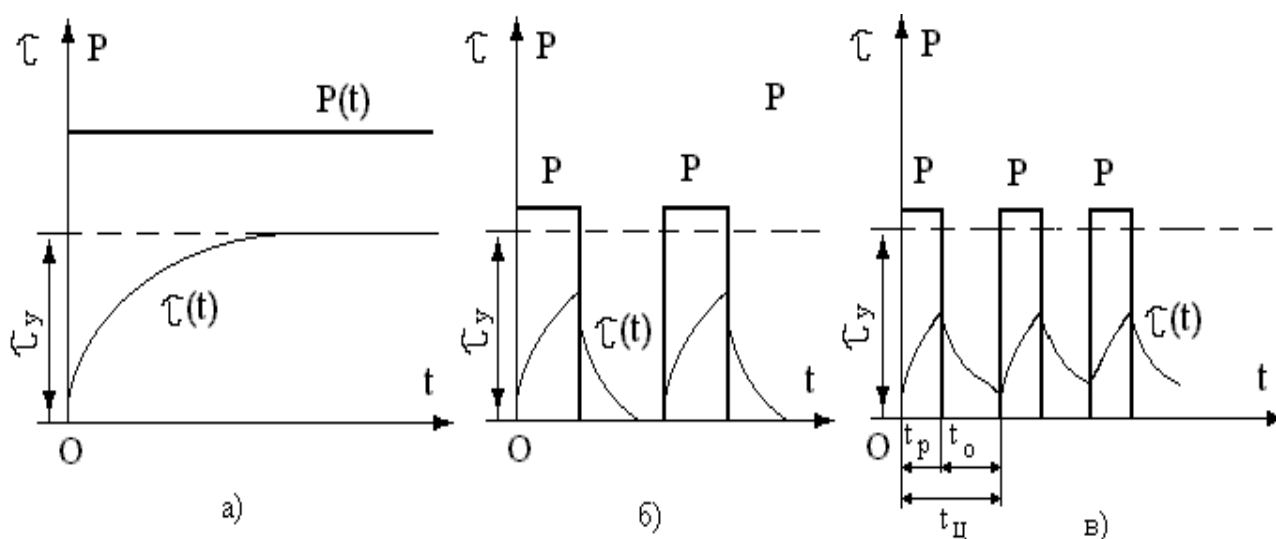


Рис. 2 Нагрузочные диаграммы режимов работы электродвигателей

При непрерывном режиме работы температура двигателя достигает установившегося значения τ_y . Такой режим работы электропривода называют длительным или продолжительным S1.

При циклическом характере во время работы двигателя происходит повышение температуры двигателя, а во время паузы его температура снижается. Если за время работы температура двигателя не успевает достигнуть установившегося значения τ_y , а за время паузы двигатель успевает охладиться до температуры окружающей среды, то такой режим называют кратковременным S2.

Если период работы t_p чередуется с паузами t_o , причем периоды работы и паузы не настолько длительны, чтобы температура отдельных частей машины достигала установившегося значения, то такой режим работы называют повторно-кратковременным S3.

Выбор мощности двигателя при длительном режиме работы

При длительном режиме работы стараются применять серии двигателей, предназначенных для этого режима работы. Допускается использование других двигателей с дополнительным пересчетом по мощности для соответствующего режима. В случае постоянной или незначительно изменяющейся в процессе работы нагрузки выбор двигателя достаточно прост. По каталогу подбирают двигатель с номинальной мощностью P_H , равной (или ближайшей большей) расчетной мощности P_p , необходимой для работы машины, и с требуемой скоростью вращения, т.е. соблюдают условие:

$$P_H \geq P_p.$$

Расчетную мощность можно определить по формуле, кВт:

$$P_p = M \frac{n}{9550},$$

где вращающий момент (M) выражен в $H \cdot м$, а частота вращения (n) в *об/мин*.

В данном случае нет необходимости проверки электродвигателя по нагреву, так как при номинальной нагрузке нагрев его всегда находится в допустимых для данного класса используемой изоляции пределах. При этом, поскольку режим работы длительный и с неизменной нагрузкой, то выбранный электродвигатель на перегрузочную способность по максимальному моменту также не проверяется.

Однако подавляющее большинство механизмов работают с длительным режимом и при изменяющейся нагрузке на валу. Каждый i -ый участок

характеризуется временем t_i и мощностью P_i . В этом случае выбор мощности двигателя вначале производится ориентировочно по средней мощности P_{CP} статической нагрузки с введением коэффициента запаса $k_{ЗАП} = 1,1 \dots 1,3$, приближенно учитывающего превышение номинальной мощности над средним значением, т.е.:

$$P_H \approx k_{ЗАП} \cdot P_{CP} = k_{ЗАП} \frac{\sum_{i=1}^n P_i \cdot t_i}{\sum_{i=1}^n t_i}.$$

Верхний предел коэффициента $k_{ЗАП}$ принимают при значительных колебаниях нагрузки. Учитывая приближенность такого выбора мощности, его правильность уточняют проверкой предварительно принятого двигателя по условиям нагревания используя метод средних потерь или метод эквивалентных величин.

Метод средних потерь основан на следующем. При работе двигателя с постоянной мощностью, равной номинальной, потери ΔP_H вызывают нагрев его до установившейся температуры, равной допустимой температуре изоляции. Количество тепла, выделившееся в двигателе за время работы, равно $\Delta P_H t_p$. Если при работе двигателя с переменной нагрузкой на валу за время t_p выделится такое же количество тепла, то конечная температура его будет также равна допустимой температуре изоляции. Это количество тепла может быть определено как произведение средних потерь ΔP_{CP} на время работы t_p . Средние потери определяются по формуле:

$$\Delta P_{CP} = \frac{\Delta P_1 \cdot t_1 + \Delta P_2 \cdot t_2 + \dots + \Delta P_n \cdot t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}.$$

Следовательно, если мощность потерь не превысит номинального значения, то двигатель не нагреется выше допустимой температуры изоляции, т.е. условие правильности выбора мощности двигателя по нагреву можно записать в виде:

$$\Delta P_H \geq \Delta P_{CP}.$$

Номинальные потери ΔP_H для выбранного двигателя с номинальной мощностью P_H в продолжительном режиме определяют по формуле:

$$\Delta P_H = P_H \left(\frac{1}{\eta_H} - 1 \right),$$

где η_H – КПД двигателя при номинальной нагрузке.

При работе на отдельных участках диаграмм с длительными нагрузками, большими P_H , рекомендуется принимать:

$$\Delta P_H \geq (1,1 \dots 1,2) \Delta P_{CP}.$$

Метод средних потерь справедлив при неизменных условиях нагревания и охлаждения, т.е. при условии, что теплоотдача двигателя остается в продолжение всего времени работы постоянной, соответствующей номинальному режиму. Для двигателей с самовентиляцией, работающих с изменением скорости вращения, например во время пуска, замедления и остановок, это условие нарушается. Теплоотдача их в эти периоды ухудшается, что приводит к увеличению температуры двигателя. Для учета этого явления при определении средних потерь уменьшают продолжительность участков работы с пониженной скоростью при расчете средних потерь, умножая их на коэффициенты α (при пуске и замедлении) и β (во время паузы). Тогда выражение для средних потерь приобретает следующий вид:

$$\Delta P_{CP} = \frac{\Delta P_1 \cdot t_1 + \Delta P_2 \cdot t_2 + \Delta P_3 \cdot t_3}{\alpha \cdot t_1 + t_2 + \alpha \cdot t_3 + \beta \cdot t_0},$$

где t_1 и t_3 – время разгона и торможения; t_0 – время паузы.

Для асинхронных двигателей коэффициенты, учитывающие ухудшение охлаждения, принимают равными $\alpha = 0,5$ и $\beta = 0,25$.

Метод средних потерь является универсальным и наиболее точным, однако применение его не всегда возможно, поскольку во многих случаях отсутствуют необходимые данные для расчета потерь. Поэтому на практике применяют более простой метод – метод эквивалентных величин (метод эквивалентного тока или метод эквивалентного момента).

Метод **эквивалентного тока** основан на замене действительного, изменяющегося во времени по величине действующего значения тока, потребляемого электродвигателем, эквивалентным током, при котором потери мощности при этой нагрузке соответствуют средним потерям в нем при переменном режиме работы. Исходя из этого, эквивалентное (среднеквадратичное) значение тока, потребляемого электродвигателем при переменном режиме работы, определяется по формуле:

$$I_{ЭК} = \sqrt{\frac{I_1^2 \cdot t_1 + I_2^2 \cdot t_2 + I_3^2 \cdot t_3}{\alpha \cdot t_1 + t_2 + \alpha \cdot t_3 + \beta \cdot t_0}},$$

где I_1 , I_2 и I_3 - значения токов электродвигателя в соответствующие промежутки времени (пуск, работа с определенной нагрузкой и торможение).

Найденный эквивалентный ток сравнивают с номинальным током предварительного выбранного двигателя. Двигатель выбран правильно, если выполняется условие:

$$I_H \geq I_{ЭК},$$

где I_H – номинальный ток двигателя.

Далее электродвигатель проверяют по перегрузочной способности исходя из условия:

$$\lambda_i \geq \frac{I_M}{I_H},$$

где I_M – максимальный ток рабочего промежутка времени, который находят из диаграммы нагрузки двигателя, λ_i – каталожное значение перегрузочной способности двигателя по току.

Метод эквивалентного тока проще метода средних потерь и получил широкое распространение, но, в отличие от последнего не является универсальным. Например, для асинхронных двигателей с глубоким пазом и с двойной клеткой на роторе сопротивление меняется в зависимости от скорости. В этом случае метод эквивалентного тока использовать нельзя.

Часто при выборе мощности двигателя приходится иметь дело с диаграммой моментов, получаемой в результате расчета механических переходных процессов. У асинхронных двигателей вращающий момент можно считать пропорциональным току. Тогда, заменяя токи пропорциональными им величинами моментов, получим формулу для **эквивалентного момента**:

$$M_{ЭК} = \sqrt{\frac{M_1^2 \cdot t_1 + M_2^2 \cdot t_2 + M_3^2 \cdot t_3}{\alpha \cdot t_1 + t_2 + \alpha \cdot t_3 + \beta \cdot t_0}},$$

где M_1 , M_2 и M_3 - значения моментов нагрузки на валу двигателя в соответствующие промежутки времени (пуск, работа с определенной нагрузкой и торможение). Без учета ухудшения условий охлаждения при пуске, торможении и остановках на нагрев двигателя эквивалентный момент находят по упрощенной формуле:

$$M_{ЭК} = \sqrt{\frac{M_1^2 \cdot t_1 + M_2^2 \cdot t_2 + M_3^2 \cdot t_3}{t_1 + t_2 + t_3 + t_0}}$$

Номинальная мощность электродвигателя определяется по значению эквивалентного момента по формуле:

$$P_H = M_{ЭК} \frac{n_H}{9550},$$

где n_H – номинальная частота вращения двигателя.

Проверку электродвигателя по условиям допустимой перегрузки производят исходя из условия:

$$\lambda_M \geq \frac{M_{MAX}}{M_H},$$

где M_{MAX} – максимальный момент двигателя, λ_M – каталожное значение перегрузочной способности двигателя по моменту.

Учитывая возможное снижение напряжения при эксплуатации асинхронных двигателей, приводящее к снижению развиваемого двигателем момента, допустимую перегрузочную способность по моменту следует принимать несколько меньше каталожной:

$$\lambda_{M.ДОП} = (0,8 \dots 0,9) \lambda_M.$$

Электродвигатель проверяется также по достаточности развиваемого им пускового момента из условия:

$$\lambda_{П} \geq \frac{M_{П}}{M_H},$$

где $M_{П}$ – пусковой момент электродвигателя по диаграмме моментов, $\lambda_{П}$ – каталожное значение кратности пускового момента.

Если при изменении нагрузки частота вращения двигателя остается постоянной или изменяется незначительно, то развиваемый им момент пропорционален мощности двигателя. В этом случае при выборе двигателя можно воспользоваться диаграммой мощности на валу двигателя и определить **эквивалентную мощность** по формуле:

$$P_{ЭК} = \sqrt{\frac{P_1^2 \cdot t_1 + P_2^2 \cdot t_2 + P_3^2 \cdot t_3}{t_1 + t_2 + t_3 + t_0}}$$

При правильном выборе двигателя должно выполняться условие: $P_H \geq P_{ЭК}$.

Выбор двигателя при кратковременном режиме работы

При кратковременном режиме S2 за время работы температура электродвигателя не успевает достигнуть установившегося значения, а время паузы достаточно велико, так что за это время электродвигатель успевает охладиться до температуры окружающей среды (рис.2,б). Промышленность изготавливает электродвигатели для кратковременного режима работы стандартной длительностью 15, 30, 60 и 90 мин. При кратковременном режиме работы с постоянной неизменной одноступенчатой нагрузочной диаграммой выбор мощности электродвигателя производится по значению мощности при кратковременном режиме работы и заданном времени работы в этом режиме по каталогу. При ступенчатом кратковременном графике нагрузки механизма определяют эквивалентные мощность, ток или момент нагрузки. Расчет этих величин производится по тем же выражениям, что и при длительном режиме работы. Затем по соответствующему эквивалентному значению для заданной номинальной частоты вращения и длительности работы электродвигателя по каталогу выбирают электродвигатель.

Выбор мощности двигателя при повторно-кратковременном режиме работы

Повторно-кратковременный режим характеризуется чередованием рабочего периода и периодов пауз (рис. 2,в). При этом режиме работы за время t_P работы электродвигатель не успевает нагреться до установившейся температуры, а за время паузы t_0 не успевает охладиться до температуры окружающей среды. Повторно-кратковременный режим работы характеризуется относительной продолжительностью включения:

$$ПВ\% = \frac{t_P}{t_{Ц}} = \frac{t_P}{t_P + t_0} \cdot 100\%.$$

Для использования в повторно-кратковременном режиме работы промышленностью изготавливаются специальные электродвигатели на

нормированные продолжительности включения $PВ_H = 15, 25, 40, 60$ и 100% для двигателей постоянного тока и асинхронных двигателей с фазным ротором и $PВ_H = 25$ и 40% - для асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. При этом время цикла не должно превышать 10 мин. Выбор мощности электродвигателя в повторно-кратковременном режиме при заданной нагрузочной диаграмме также производится по методу эквивалентного тока, момента или мощности по тем же выражениям, что и при длительном режиме работы.

Изложенной методикой можно пользоваться, если фактическая ПВ двигателя находится в пределах $10...60\%$. При фактической $PВ < 10\%$ следует использовать двигатель, рассчитанный на кратковременный режим работы, а при $PВ > 60\%$ - двигатель, предназначенный для продолжительного режима. Если фактическая продолжительность включения при заданном графике нагрузки отличается от нормированной продолжительности включения $PВ_H$ электродвигателя, то фактический эквивалентный ток $I_{ЭК}$, эквивалентный момент $M_{ЭК}$ или эквивалентная мощность $P_{ЭК}$ пересчитывают на ближайшую большую или меньшую нормированную продолжительность включения $PВ'_H\%$ по соответствующим формулам:

$$I'_{ЭК} = I_{ЭК} \sqrt{\frac{PВ\%}{PВ_H\%}}; M'_{ЭК} = M_{ЭК} \sqrt{\frac{PВ\%}{PВ_H\%}}; P'_{ЭК} = P_{ЭК} \sqrt{\frac{PВ\%}{PВ_H\%}};$$

где $I'_{ЭК}$, $M'_{ЭК}$, $P'_{ЭК}$ - соответственно эквивалентный ток, эквивалентный момент, эквивалентная мощность при данном графике нагрузки, пересчитанном на $PВ_H\%$. По значениям $I'_{ЭК}$, $M'_{ЭК}$, $P'_{ЭК}$ определяется мощность электродвигателя производственного механизма. При этом также должны выполняться условия: $I'_{ЭК} \leq I_H$, $M'_{ЭК} \leq M_H$, $P'_{ЭК} \leq P_H$, где I_H , M_H , P_H - соответственно номинальный ток, номинальный момент и номинальная мощность электродвигателя по каталогу при данной нормированной продолжительности включения $PВ_H$.

Задача 1. Выбор асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

Трехфазный асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором используется для электропривода механизма подачи угля, работающего с циклическим графиком момента нагрузки, приведенным к валу двигателя. Используя данные, приведенные в Приложении 1, табл.1 для соответствующего варианта задания выполнить следующие пункты:

1. Построить диаграмму моментов на валу двигателя $M=f(t)$.

2. Определить режим работы электропривода.
3. Определить расчетную мощность P_p , выбрать по каталожным данным по условиям нагрева электродвигатель и произвести проверку его на перегрузочную способность.
4. Для выбранного двигателя определить:
 - номинальные потери активной мощности;
 - класс изоляции обмоток статора и допустимую температуру нагрева обмотки.
5. По условному обозначению серии выбранного двигателя дать характеристику двигателя.

В таблице исходных данных M_1 , M_2 и M_3 – моменты нагрузки на валу двигателя, соответствующие участкам нагрузочного графика; t_1 , t_2 и t_3 – время работы двигателя с данными моментами нагрузки; t_0 – время паузы (интервалы между циклами работы); n_1 – синхронная частота вращения; k – коэффициент, учитывающий возможное снижение напряжение питающей сети.

Пример выбора мощности асинхронного двигателя для электропривода

Исходные данные приведены в табл.3:

Таблица 3

Исходные данные к задаче 1

M_1 , Н м	M_2 , Н м	M_3 , Н м	t_1 , с	t_2 , с	t_3 , с	t_0 , с	n_1 , об/мин	k
15	45	35	15	15	6	34	1000	0,9

1. Строим диаграмму моментов на валу двигателя $M=f(t)$. Ее вид представлен на рис.3.
2. Определяем режим работы электропривода.

Фактическая продолжительность включения согласно диаграмме:

$$ПВ\% = \frac{t_1 + t_2 + t_3}{t_{Ц}} \cdot 100\% = \frac{15 + 15 + 6}{70} \cdot 100\% = 51.4\%.$$

Так как фактическая ПВ% находится в пределах 10...60 % то это повторно-кратковременный режим - S3. Однако фактическая продолжительность включения при заданном графике нагрузки отличается от нормированной $ПВ_H\%$.

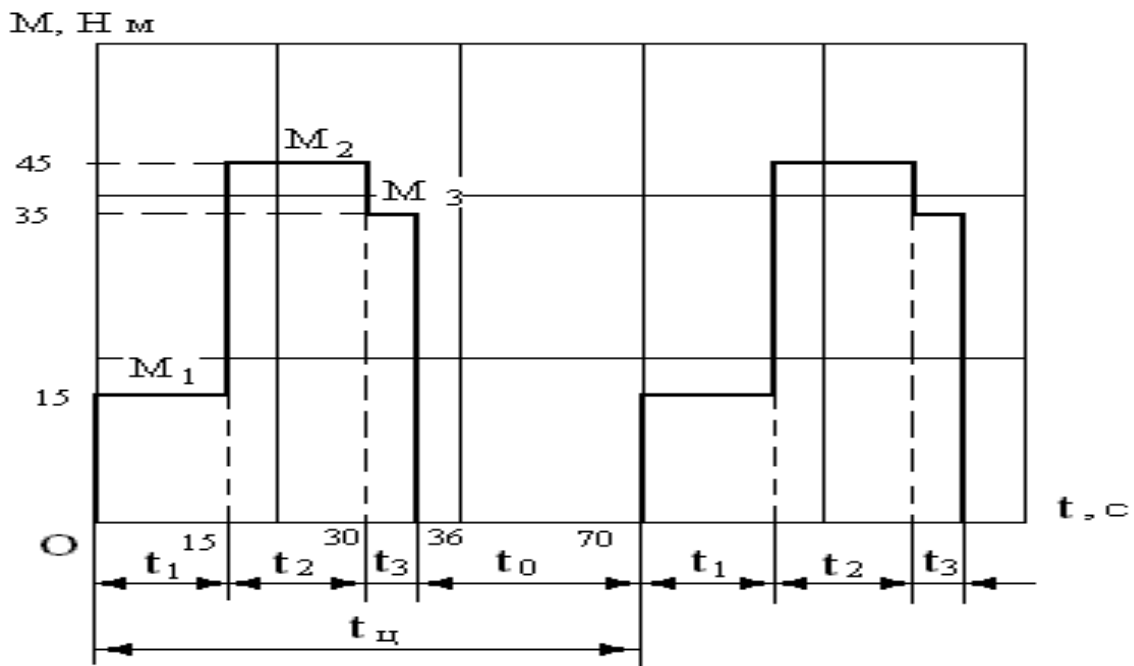


Рис. 3. Диаграмма моментов на валу электродвигателя

3. Выбираем двигатель по условиям нагревания используя метод эквивалентного момента. Эквивалентный момент нагрузки на валу:

$$M_{\text{ЭК}} = \sqrt{\frac{M_1^2 \cdot t_1 + M_2^2 \cdot t_2 + M_3^2 \cdot t_3}{t_1 + t_2 + t_3}} = \sqrt{\frac{15^2 \cdot 15 + 45^2 \cdot 15 + 35^2 \cdot 6}{15 + 15 + 6}} = 33,79 \text{ Нм}$$

Пересчитываем эквивалентный момент $M_{\text{ЭК}}$ на ближайшую большую нормированную продолжительность включения $PВ_H\% = 60\%$:

$$M'_{\text{ЭК}} = M_{\text{ЭК}} \sqrt{\frac{PВ\%}{PВ_H\%}} = 33,79 \sqrt{\frac{51,4}{60}} = 31,27 \text{ Нм}$$

Расчетная мощность при $PВ_H\% = 60\%$:

$$P_P = M'_{\text{ЭК}} \frac{n_1}{9550} = \frac{31,27 \cdot 1000}{9550} = 3,27 \text{ кВт}$$

По результатам расчета выбираем типоразмер асинхронного двигателя серии 4А с повышенным скольжением по условию $P_H > P_P$ для $PВ_H = 60\%$, $n_1 = 1000$ об/мин и $P_H = 3,8$ кВт для $PВ_H = 60\%$ (Приложение 2, табл.1) 4АС112МВ. Номинальные данные выбранного двигателя 4АС112МВ6У3 для $PВ_H = 40\%$ приведены в Приложение 2, табл.2: $P_H = 4,2$ кВт; $\eta_H = 75\%$; $n_H = 910$ об/мин; $M_{\text{МАХ}}/M_H = 2,1$.

Дальнейшие расчеты ведем для $PВ_H = 60\%$, выбранной в соответствии с фактической продолжительностью включения.

Номинальный момент электродвигателя:

$$M_H = 9550 \frac{P_H}{n_H} = 9555 \frac{3,8}{910} = 39,9 \text{ Нм}$$

Проверку выбранного электродвигателя на перегрузочную способность производим исходя из обеспечения условия:

$$\frac{M_{\text{НАИБ}}}{M_H} \leq k \cdot \frac{M_{\text{МАХ}}}{M_H},$$

где $M_{\text{НАИБ}}$ - наибольший момент нагрузки на графике (рис.3), $M_{\text{НАИБ}} = M_2 = 45 \text{ Н} \cdot \text{м}$;
 k – коэффициент, учитывающий возможное снижение питающего напряжения (принимается равным $k = 0,9$).

Таким образом:
$$\frac{M_{\text{НАИБ}}}{M_H} = \frac{45}{39,9} = 1,12 \leq k \cdot \frac{M_{\text{МАХ}}}{M_H} = 0,9 \cdot 2,1 = 1,89,$$

т.е. в данном случае условие по обеспечению требуемой перегрузочной способности электродвигателя выполняется.

4. Для выбранного двигателя определяем:

- номинальные потери активной мощности:

$$\Delta P_H = P_H \left(\frac{1}{\eta_H} - 1 \right) = 3,8(1/0,75 - 1) = 1,267 \text{ кВт},$$

- исходя из условного обозначения серии двигателя (высота оси вращения 112 мм) делаем заключение, что класс изоляции обмоток статора В и допустимая температура нагрева обмотки составляет 130°C .

5. По условному обозначению серии можно дать характеристику следующую характеристику двигателя: 4АС 112 М В 6 У3

$$\begin{array}{cccccccc} \underline{4} & \underline{А} & \underline{С} & \underline{\quad} & \underline{\quad} & \underline{112} & \underline{М} & \underline{В} & \underline{6} & \underline{У3} \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & & \end{array}$$

где

1 - название серии 4АС – асинхронный двигатель с повышенным скольжением;

2 - исполнение по способу защиты: отсутствие буквы - исполнение IP24;

где первая цифра - степень защиты обслуживающего персонала от соприкосновения с токоведущими частями и от попадания твердых тел внутрь корпуса. Т.к. стоит цифра 2, то обеспечена защита от проникновения внутрь

оболочки пальцев или предметов длиной не более 80 мм и от проникновения твердых тел размеров свыше 12 мм;

вторая цифра - степень защиты от проникновения воды. Цифра 4 - это защита от брызг: вода, разбрызгиваемая на оболочку в любом направлении, не должна оказывать вредного воздействия на АД.

3 - исполнение АД по материалу станины и щитов: отсутствие буквы - станина и щиты чугунные или стальные;

4 - высота оси вращения 112 мм ;

5 - установочный размер по длине станины: М - средний;

6 - длина сердечника статора: В - большая;

7 - число полюсов $2p = 6$;

8 - климатическое исполнение и категория размещения:

У - для эксплуатации в районах с умеренным климатом;

З - для эксплуатации в закрытых помещениях с естественной вентиляцией.

3. Определение допустимой частоты включений асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором

В автоматизированном электроприводе в настоящее время наиболее широко применяются асинхронные двигатели (АД) с короткозамкнутым ротором. Значительное число механизмов, использующих такие двигатели, работают в режимах с большим числом включений, достигающих несколько сотен в час (например, металлургические и различные подъемно-транспортные устройства). При этом большое значение приобретают потери в переходных режимах, вызывающие интенсивный нагрев двигателей и лимитирующие по этой причине количество включений, реверсов и торможений.

В связи с этим необходимо решить задачу определения минимально допустимой длительности рабочего цикла, при которой двигатель работает, не перегреваясь выше допустимой температуры, т.е. определить допустимое число включений в час h .

Вообще, такая проблема может возникнуть в любом типе электропривода - постоянного или переменного тока. Однако при использовании АД с фазным ротором или двигателей постоянного тока большая часть потерь энергии рассеивается во внешних резисторах якорных или роторных цепей, а в АД с короткозамкнутым ротором все потери энергии выделяются в объеме самой электрической машины.

Допустимым числом включений в час считают такое, при котором среднее превышение температуры АД после большого числа циклов будет равно допустимому. На рисунке 4 представлен рабочий цикл АД в виде упрощенной зависимости изменения угловой частоты вращения ω от времени t (тахограмма), состоящий из периодов пуска (время $t_{п}$), работы с установившейся скоростью при постоянной нагрузке (время $t_{у}$), торможения (время $t_{т}$) и паузы, когда двигатель отключен от сети (время t_0). Там же представлена зависимость средних значений моментов M на валу двигателя соответствующих определенным периодам ($M_{п ср.}$, $M_{с}$, $M_{т ср.}$) от времени.

Значение h можно определить при делении энергии, отдаваемой АД при его нагреве до температуры $\tau = \tau_{доп}$ ($\tau_{доп}$ – максимально допустимая температура нагрева двигателя, полное использование по нагреву, определяется классом его изоляции, табл.1) в окружающую среду за 1 час, на энергию, выделяемую АД за один цикл работы.

При полном использовании двигателя по теплу, энергия, отдаваемая двигателем в окружающую среду, Дж:

- в установившемся режиме

$$\Delta W'_y = \Delta P_H t_y$$

где ΔP_H - потери в номинальном режиме, Вт;

- в режиме паузы

$$\Delta W'_0 = \beta \Delta P_H t_0$$

где $\beta = A / A_0$ - коэффициент ухудшения теплоотдачи АД при неподвижном роторе, $n = 0$. Величина коэффициента зависит от системы охлаждения и конструктивного исполнения электродвигателя, например:

для закрытого самовентилируемого двигателя $\beta = 0,45 - 0,55$,

для защищенного самовентилируемого двигателя $\beta = 0,2 - 0,35$.

A_0 , A – теплоотдача соответственно при неподвижном роторе и при номинальной частоте вращения АД;

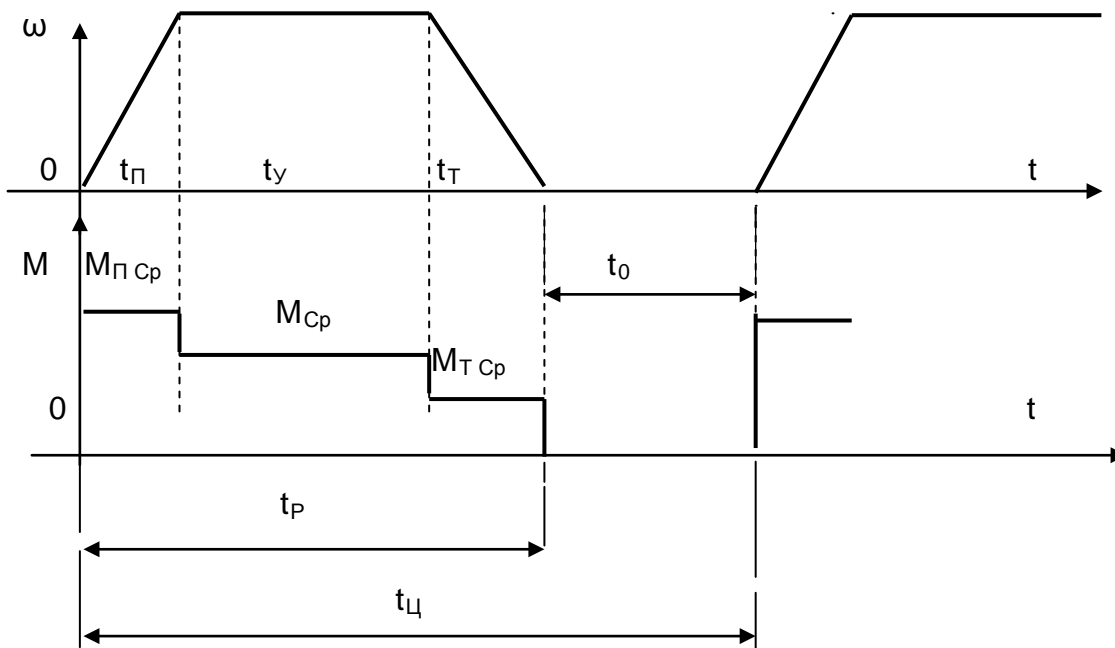


Рис.4. Временная диаграмма рабочего цикла АД.

- в режиме пуска и торможения

$$\Delta W'_{\Pi, T} = \frac{(1 + \beta)}{2} \Delta P_H (t_{\Pi} + t_T)$$

Суммарная энергия, отдаваемая двигателем в окружающую среду:

$$\Delta W' = \Delta W'_y + \Delta W'_0 + \Delta W'_{\Pi, T}$$

Энергия, выделяемая АД за один цикл работы, Дж:

$$\Delta W = \Delta W_{\Pi} + \Delta P_y t_y + \Delta W_T$$

- за период пуска

$$\Delta W_{\Pi} = \frac{J \omega_1^2}{2} \frac{M_{\Pi Cp}}{M_{\Pi Cp} - M_C} \left(1 + \frac{r_1}{r_2'}\right);$$

-за период торможения

$$\Delta W_T = K \frac{J \omega_0^2}{2} \frac{M_{TCp}}{M_{TCp} + M_C} \left(1 + \frac{r_1}{r_2'}\right),$$

$K=1$ – электродинамическое торможение, $K=3$ – торможение противовключением;

- потери мощности АД в установившемся режиме

$$\Delta P_y = \frac{a}{a+1} \Delta P_H + \left(\frac{1}{a+1} \Delta P_H\right) K_3^2,$$

$$K_3 = \frac{M_C}{M_H} \quad - \text{коэффициент нагрузки.}$$

В расчетных формулах используются следующие величины:

J - момент инерции элементов электропривода, приведенный к валу АД, кг · м²,

r_1/r_2' – отношение активного сопротивления обмотки статора к приведенному активному сопротивлению обмотки ротора;

ω_1 - синхронная угловая частота вращения магнитного поля АД, с⁻¹;

a – отношение постоянных потерь мощности (не зависят от режима работы АД) к переменным потерям мощности (зависят от режима работы АД) в АД, $a = 0,45 - 0,65$;

M_C - момент нагрузки, приведенный к валу двигателя, Н · м;

M_H - номинальный момент двигателя, Н · м.

$$M_{Пср} = \frac{M_{MAX} + M_{П}}{2} \quad - \text{средний момент при пуске, } M_{MAX} \text{ и}$$

$M_{П}$ соответственно максимальный и пусковой моменты АД, Н · м, где $M_{П} = M_{s=1}$ и определяется по формуле Клосса при $s=1$

$$M = \frac{2M_{MAX}}{\left(\frac{s_{KP}}{s} + \frac{s}{s_{KP}}\right)}.$$

Критическое скольжение s_{KP} определяется величиной максимального момента двигателя.

$$M_{TCp} = \frac{M_{s=2} + M_{II}}{2} - \text{средний момент при торможении}$$

противовключением, Н·м, где $M_{s=2}$ определяется по формуле Клосса при $s=2$:

$$M_{TCp} = \frac{M_H + M_{II}}{2} - \text{средний момент при динамическом}$$

торможении.

Продолжительность предельного по нагреву АД цикла, с:

$$t_{II} = 3600 / h.$$

Продолжительность рабочего интервала, с:

$$t_P = t_{II} \varepsilon, \text{ где } \varepsilon = \frac{t_P}{t_{II}} - \text{коэффициент включения АД.}$$

Время паузы, с:

$$t_0 = \frac{3600(1-\varepsilon)}{h}.$$

Продолжительность установившегося режима, с:

$$t_Y = \frac{3600}{h} \varepsilon - (t_{II} + t_T).$$

Приравнивая значения энергий, отдаваемой АД в окружающую среду и потерянную им за цикл работы, и учитывая полученные выражения для времени рабочего цикла, установившегося режима и паузы можно получить выражение для определения допустимого числа включений h за час работы АД.

Для квазиустановившегося режима работы получим значение h

$$h = 3600 \frac{(\Delta P_H - \Delta P_Y) \varepsilon + \Delta P_H \beta (1 - \varepsilon)}{(\Delta W_{II} + \Delta W_T) + \left(\frac{1 + \beta}{2} \Delta P_H + \Delta P_Y - \Delta P_H\right) (t_{II} + t_T)}$$

Величина $(t_{II} + t_T)$ не велика, второе слагаемое в знаменателе составляет не более 3% от $(\Delta W_{II} + \Delta W_T)$, поэтому выражение можно записать в несколько упрощенном виде

$$h = 3600 \frac{(\Delta P_H - \Delta P_Y)\varepsilon + \Delta P_H \beta(1 - \varepsilon)}{\Delta W_{II} + \Delta W_T}.$$

Если в установившемся режиме двигатель работает с номинальной мощностью, т.е. $\Delta P_Y = \Delta P_H$, то формула еще более упрощается:

$$h = 3600 \frac{\Delta P_H \beta(1 - \varepsilon)}{\Delta W_{II} + \Delta W_T}.$$

Увеличение числа включений h может быть достигнуто использованием независимой вентиляции для охлаждения АД, либо уменьшением потерь энергии в переходных режимах, например, использовать системы автоматизированного электропривода с частотным управлением АД.

Кроме того, для приводов с большим числом включений в час используются специальные электрические машины – крановые, металлургические. Эти машины рассчитаны на меньшие плотности тока в обмотках чем АД единой серии и имеют более низкие динамические потери в переходных режимах. Для таких двигателей единой серии 4А принято обозначение 4АС – асинхронные двигатели с повышенным скольжением. Они предназначены для привода механизмов с пульсирующей нагрузкой, а так же механизмов, работающих в повторно-кратковременном режиме S3 и перемежающимся S6 по ГОСТ 183-74. Возможно их использование в режимах S2 и S4.

Пояснения к выполнению расчета для задачи 2.

Исходные данные для расчета по вариантам представлены в Приложение 1, табл. 2.

Величину критического скольжения S_{KP} следует принимать:

- для четного варианта расчета 0,15;
- для нечетного варианта расчета 0,19.

Отношение активных сопротивлений обмоток статора и ротора АД r_1/r_2' :

- для четного варианта расчета 0,6;
- для нечетного варианта расчета 0,7.

Отношение постоянных потерь к переменным, a :

- для четного варианта расчета 0,6;
- для нечетного варианта расчета 0,8.

В предложенном задании некоторые величины заданы в виде ряда (3 значения). По заданию преподавателя необходимо выполнить соответствующие расчеты для построения зависимости допустимого числа включений h от предложенной переменной величины. При этом остальные переменные величины принимаются в расчетах как постоянные: по умолчанию выбираются 2-ые значения из предлагаемых в задании рядов.

Вид торможения в задании: Д – динамическое, П – противовключением.

В расчете, в соответствии с предложенным примером, должны быть представлены:

- исходные данные;
- расчет необходимых величин;
- графическая зависимость.

Для электропривода выбирается двигатель типа АС. Данные для этих АД приведены в Приложения 2, табл. 2. Следует обратить внимание, что продолжительность включения двигателей в таблице $PВ_H=40\%$. Это соответствует коэффициенту включения электродвигателя $\varepsilon = 0,4$. При других значениях ε необходимо первоначально определить типоразмер двигателя в соответствии с Приложения 2, табл. 1. Если в таблице отсутствует требуемый номинал мощности, то выбирается ближайший стандартный по условию, что он должен быть выше необходимой расчетной мощности электропривода. При выборе обратите внимание на соответствие синхронных частот вращения магнитного поля АД n_1 .

Задача 2. Определение допустимой частоты включения асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором

Электропривод механизма электротали работает с большой частотой включений. Цикл работы - стандартный, состоит из пуска, работа в установившемся режиме с моментом нагрузки равным M_c , торможения и паузы.

В соответствии с заданием имеем следующие **исходные данные**:

Расчетная мощность электропривода	$P_p = 23$ кВт;
Коэффициент включения электропривода	$\varepsilon = 0,25$
Синхронная частота вращения	$n_1 = 1000$ об/мин
Отношение величины постоянных потерь к переменным	$a = 0,6$
Критическое скольжение	$s_{кр} = 0,15$
Отношение сопротивлений обмоток статора и ротора	$r = r_1/r_2 = 0,6$
Отношение моментов инерции	$K_{ин} = I / I_d = 2; 2,5; 3$
Отношение моментов вращающихся, коэффициент нагрузки	$K_{наг} = M_c / M_n = 0,3; 0,5; 0,7.$
Коэффициент ухудшения охлаждения	$\beta = 0,2; 0,35; 0,45.$
Тип торможения -	П, противовключением

Расчитать допустимое число включений асинхронного двигателя (АД). Определить расчетно и построить графически зависимость числа включений h от изменения приведенного момента инерции I при средних заданных значениях M_c/M_n и β .

Продолжительность включения асинхронного двигателя ПВ = 100ε, т.е. ПВ = 25%
По таблице 3 для соответствующей синхронной частоты и величины ПВ определяем типоразмер и мощность АД:

Ближайшая стандартная мощность $P_n > P_p - 25$ кВт

Двигатель - 4АС200М

По таблице 2 определяем двигатель типа 4АС200М6У3, имеющий следующие номинальные данные:

Номинальная мощность для ПВ = 25%	$P_n := 25$ кВт
Номинальная частота вращения	$n_n := 910 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$
Коэффициент полезного действия	$\eta_n := 0.835$
Отношение $M_p / M_{ном}$	$K_{пуск} := 1.9$
Отношение $M_{max} / M_{ном}$	$K_{max} := 2.1$
Момент инерции АД	$J_d := 0.4 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$

Исходные данные для расчета (из задания):

$$\begin{array}{l} \varepsilon := 0.25 \quad r := 0.6 \quad a := 0.6 \quad i := 1..3 \quad \text{Кин}_i := \\ \text{К}_{\text{наг}} := 0.5 \quad s_{\text{кр}} := 0.15 \quad \beta := 0.35 \quad n_1 := 1000 \frac{\text{об}}{\text{мин}} \end{array}$$

2
2.5
3

Определяем номинальную угловую частоту вращения ротора ω_{H} и угловую скорость вращения магнитного поля ω_1 , с-1

$$\begin{array}{l} \omega_{\text{H}} := \pi \cdot \frac{n_{\text{H}}}{30} \quad \omega_{\text{H}} = 95.295 \quad \text{с}^{-1} \\ \omega_1 := \pi \cdot \frac{n_1}{30} \quad \omega_1 = 104.72 \quad \text{с}^{-1} \end{array}$$

Номинальный момент АД	$M_{\text{H}} := 1000 \cdot \frac{P_{\text{H}}}{\omega_{\text{H}}}$	$M_{\text{H}} = 262.343$	Н·м
Пусковой момент АД	$M_{\text{П}} := \text{К}_{\text{пуск}} \cdot M_{\text{H}}$	$M_{\text{П}} = 498.452$	Н·м
Максимальный момент АД	$M_{\text{MAX}} := M_{\text{H}} \cdot \text{К}_{\text{MAX}}$	$M_{\text{MAX}} = 550.921$	Н·м
Момент сопротивления	$M_{\text{C}} := \text{К}_{\text{наг}} \cdot M_{\text{H}}$	$M_{\text{C}} = 131.172$	Н·м
Момент инерции	$J_i := J_{\text{д}} \cdot \text{Кин}_i$	$J_i =$	кг·м ²

0.8
1
1.2

Расчитываем средние значения пускового $M_{\text{пер}}$ и тормозного $M_{\text{тср}}$ моментов

$$\begin{array}{l} M_{\text{пер}} := \frac{(M_{\text{MAX}} + M_{\text{П}})}{2} \quad M_{\text{пер}} = 524.687 \quad \text{Н·м} \\ \delta := 2 \\ M_{\text{S2}} := 2 \cdot \frac{M_{\text{MAX}}}{\left[\left(\frac{s_{\text{кр}}}{s} \right) + \left(\frac{s}{s_{\text{кр}}} \right) \right]} \quad M_{\text{S2}} = 82.176 \quad \text{Н·м} \\ M_{\text{тср}} := \frac{(M_{\text{S2}} + M_{\text{П}})}{2} \quad M_{\text{тср}} = 290.314 \quad \text{Н·м} \end{array}$$

Определяем потери энергии при пуске $\Delta W_{\text{п}}$ и торможении $\Delta W_{\text{т}}$.

$$\Delta W_{\text{п}_i} := \frac{J_i \cdot \omega_1^2 \cdot M_{\text{пер}} \cdot (1 + r)}{2 \cdot (M_{\text{пер}} - M_{\text{C}})}$$

$$\Delta W_{\Pi_i} =$$

9.358 · 10 ³	Дж
1.17 · 10 ⁴	
1.404 · 10 ⁴	

При торможении противовключением

$$K_{\text{мв}} := 3$$

$$\Delta W_{T_i} := \frac{K \cdot J_i \cdot \omega_1^2 \cdot M_{\text{тср}} \cdot (1 + r)}{2 \cdot (M_{\text{тср}} + M_c)}$$

$$\Delta W_{T_i} =$$

1.45 · 10 ⁴	Дж
1.813 · 10 ⁴	
2.175 · 10 ⁴	

Потери в номинальном режиме ΔP_H

$$\Delta P_H := 1000 \cdot P_H \cdot \frac{(1 - \eta_H)}{\eta_H}$$

$$\Delta P_H = 4.94 \times 10^3 \text{ Вт}$$

Потери при соответствующем коэффициенте нагрузки $K_{\text{наг}}$

$$\Delta P := \left[\frac{a \cdot \Delta P_H}{(a + 1)} \right] + \left[\frac{1 \cdot \Delta P_H}{(a + 1)} \right] \cdot K_{\text{наг}}^2$$

$$\Delta P = 2.624 \times 10^3 \text{ Вт}$$

Допустимое число включений в час

$$h_i := 3600 \cdot \frac{[(\Delta P_H - \Delta P) \cdot \epsilon + \Delta P_H \cdot \beta \cdot (1 - \epsilon)]}{\Delta W_{\Pi_i} + \Delta W_{T_i}}$$

$$h_i =$$

283.002
226.401
188.668

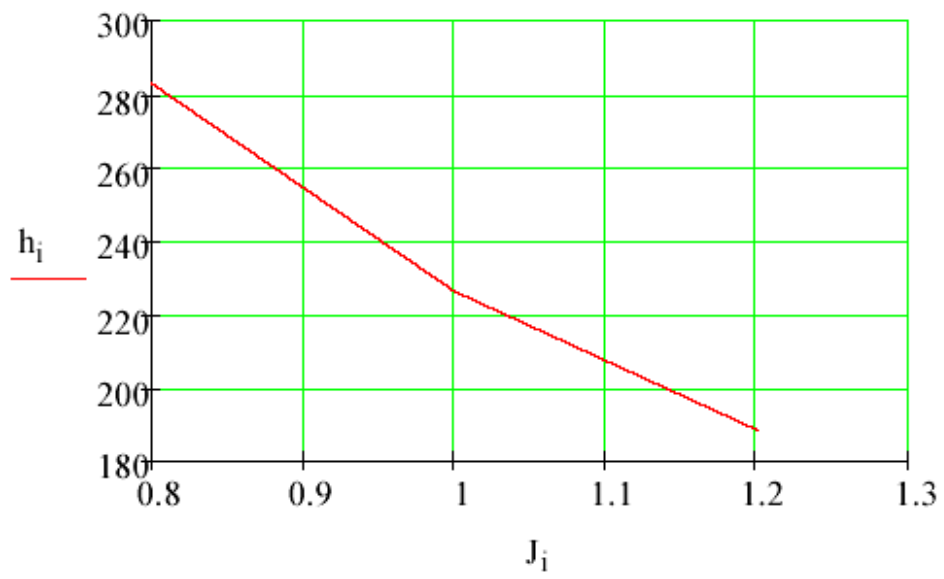


Рис. 5. Зависимость числа включений от момента инерции

4. Расчет и выбор резисторов для асинхронного двигателя с фазным ротором

В автоматизированном электроприводе для решения определенных задач часто применяются асинхронные двигатели с фазным ротором. Несмотря на более сложную конструкцию и повышенную стоимость по сравнению с АД с короткозамкнутым ротором, этот двигатель позволяет достаточно просто реализовать регулирование частоты вращения, ограничение и регулирование тока и момента. Изменение этих координат электропривода осуществляется путем введения дополнительных резисторов (чаще всего активных) в цепи обмотки фазного ротора.

Длительное регулирование частоты вращения таким способом энергетически нецелесообразно, т.к. при малых скольжениях большая часть потребляемой двигателем электроэнергии расходуется на нагрев реостатов в цепи ротора. Как правило, АД с фазным ротором применяется так, чтобы включение резисторов было по возможности кратковременным, например, где по условиям работы электропривода требуется получить необходимые пускорегулировочные характеристики. При этом такой АД почти всегда работает с комплектом добавочных резисторов для изменения сопротивления цепи фазного ротора. От правильного выбора резисторов зависит работа двигателя на искусственных характеристиках (их величина определяет форму механических и электромеханических характеристик) и его тепловая нагрузка (эти сопротивления ограничивают токи в обмотках АД в переходных режимах).

Таким образом, расчет и выбор резисторов напрямую связан с подбором необходимого АД с фазным ротором для соответствующих систем автоматизированного электропривода. При этом выбор АД по мощности проводится по методике, изложенной в задаче 1, а, в случае необходимости, допустимое число включений определяется при использовании алгоритма, представленного в задаче 2 настоящих методических указаний.

За номинальные параметры резисторов принимаются: сопротивление, напряжение, ток и продолжительность включения. Соответственно, для включения резисторов в цепь обмотки фазного ротора необходимо учитывать напряжение E_{PH} и ток в обмотке ротора I_{2H} . Основные характеристики АД с фазным ротором представлены в Приложении 2, Табл. 3, 4 соответственно при $PВ_H = 40\%$ и $PВ_H = 25\%$.

Переключение ступеней резисторов при регулировании координат осуществляется с помощью серийных контроллеров, тип которых выбирается в зависимости от параметров электропривода. Для электроприводов переменного тока применяются силовые кулачковые контроллеры типа ККТ60А и его модификации, предназначенные для применения в конкретных системах электропривода:

- ККТ61А, при коммутации в цепях обмоток статора и ротора, схема включения контактов симметричная, регулирование частоты вращения неустойчивое до 1:3;
- ККТ68А, при коммутации в цепи обмотки ротора, схема включения контактов симметричная, регулирование частоты вращения неустойчивое до 1:2;
- ККТ62А, при коммутации в цепях обмоток ротора двух АД, схема включения контактов симметричная, регулирование частоты вращения неустойчивое до 1:3.

Кулачковые контроллеры используются при напряжениях до 500 В и мощности АД до 30 кВт. Они имеют до 12 силовых контактов на номинальные токи до 63 А и маломощные контакты для коммутации цепей управления. Управление переключением осуществляется вручную, число позиций рукоятки (маховика) – до 6 положений в одну сторону от нулевого (среднего) положения.

Наиболее широкое применение в современном электроприводе (крановый, экскаваторный и т.д.) получили магнитные контроллеры, которые представляют собой сложные комплектные коммутационные устройства, обеспечивающие ряд программ переключений в главных цепях с помощью контакторов с электромагнитным приводом путем подачи оператором соответствующих команд по цепям управления. Магнитные контроллеры предназначены для пуска, регулирования частоты вращения, торможения, реверса и отключения электродвигателя. Они имеют преимущества по сравнению с кулачковыми контроллерами:

- для управления магнитным контроллером независимо от мощности привода используются командоконтроллеры или кнопочные станции, требующие минимальные затраты энергии оператора;
- износостойкость в 5-8 раз выше, чем у кулачковых контроллеров за счет коммутации осуществляемой контакторами;
- большой запас по коммутации, способны пропускать без повреждений ток до $15 I_H$ на время срабатывания защиты;

- в связи с заранее запрограммированной системой пуска и торможения возможность недопустимой перегрузки сведена к минимуму;
- применение магнитного контроллера по сравнению с кулачковым позволяет повысить степень автоматизации электропривода и тем самым производительность рабочей машины или механизма.

Магнитные контроллеры типа ТА, ТСА, ТСД, ДТА относятся к контроллерам переменного тока общего назначения. Они отличаются своими функциональными возможностями. Например, ТСД обеспечивает регулирование скорости 1:8, а остальные типы контроллеров не имеют гарантированного регулирования скорости электропривода (фактически могут обеспечить регулирование 1:3).

Для механизмов с высокой степенью использования применяются магнитные контроллеры серий К, КС, ДКС, в которых применяются контакторы с электромагнитным приводом постоянного тока. Они могут обеспечить фактическое регулирование скорости 1:3.

Область применения того или иного типа магнитного контроллера определяют характеристики электропривода и АД, в фазах обмотки ротора которого производятся соответствующие переключения ступеней сопротивлений. В Приложении 2 Табл. 5 представлены характеристики магнитных контроллеров с предельным током в обмотке ротора до 160 А. Для каждой ступени переключения в числителе указывается относительное значение сопротивлений, %, а в знаменателе – токовая нагрузка, %. Кроме того, определяется допустимый ток ротора, который задает диапазон применения контроллера и рабочие ступени резистора.

При проектировании контроллеров сопротивления ступеней резисторов рассчитываются по известным методам теории электропривода [1,2,3].

В электроприводе применяются элементы резисторов четырех конструктивных исполнений:

- с рассеиваемой мощностью 25 – 150 Вт и сопротивлением от 1 до 30 000 Ом типа ПЭВ, представляющие собой фарфоровые цилиндры, на которые навита нихромовая проволока и которые покрыты нагревостойкой стекловидной эмалью;
- с рассеиваемой мощностью 250 – 400 Вт и сопротивлением от 0,7 до 96 Ом, выполненные в виде плоских элементов с константановой, фехралевой или нихромовой проволоки диаметром от 0,5 до 1,6 мм, намотанной на фарфоровые изоляторы, закрепленные на металлическом держателе;

- с рассеиваемой мощностью 850 – 1000 Вт и сопротивлением от 0,078 до 0,154 Ом из фехральной ленты размерами от 0,8×6 до 1,6×1,5 мм, намотанной на ребро. Лента в виде спирали надета на фарфоровые изоляторы, опирающиеся на металлический держатель коробчатого сечения;

- с рассеиваемой мощностью 115 – 230 Вт при соответствующем токе 55 и 215 А и сопротивлением от 0,005 до 0,28 Ом из чугунных элементов типа НС400 и НС401

Сопротивления для АД с фазным ротором выполняются в виде отдельных элементов или, чаще всего, блоков резисторов. При мощности электропривода до 300 кВт блоки состоят из элементов первых трех конструкций. Во всех остальных случаях (мощность ЭП до нескольких тысяч кВт) применяются ящики резисторов типа ЯС100, ЯС101 с чугунными элементами.

Для рассматриваемого типа электропривода применяются стандартные блоки резисторов типа БФ 6 и БК 12, а так же отдельные элементы, специально рассчитанные для использования совместно с конкретными двигателями постоянного или переменного тока. Блоки БФ 6 выполняются в виде 6 элементов из фехральной ленты, а БК 12 – из 12 проволочных фехральных или константановых элементов. Данные по нормализованным блокам резисторов представлены в Приложении 2, Табл. 6, 7.

Технические данные отдельных элементов представляют как ток продолжительного режима работы, так и ток повторно-кратковременного режима с $PВ_H = 12,5; 25; 35\%$. Для блоков резисторов определен только ток продолжительного режима работы, при $PВ_H = 100\%$. Чаще всего в типовом электроприводе для АД используются именно резисторные блоки.

В реальном процессе резисторы на каждой ступени работают со своей продолжительностью включения. Поэтому для того, чтобы они нагревались до допустимой температуры, их следует использовать при большем токе нагрузки.

При расчетном токе I_P резистор, работающий в повторно-кратковременном режиме, следует выбирать на эквивалентный по перегреву длительный ток:

$$I_{\Delta} = KI_P,$$

где $K < 1$, и значение K определяется в общем случае по универсальным справочным кривым в зависимости от режима работы. Этот коэффициент зависит от времени работы резистора за цикл и продолжительности его включения. Чем они

меньше, тем ниже значение коэффициента, и, следовательно, тем на меньше значение тока нужно выбирать резистор.

В общем случае расчетный ток резистора определяется:

$$I_P = I_{2H} \frac{P_P}{P_H}, \text{ А,}$$

где P_P – расчетная мощность привода, зависящая от системы электропривода, его режима работы и параметров нагрузки, кВт; I_{2H} – номинальный ток ротора, А; P_H – номинальная мощность электродвигателя, кВт.

Чаще всего, при известной системе электропривода тип панели управления уже определен и по относительным значениям сопротивлений для каждой ступени (R_{Pn-Pm}) вычисляется их омическая величина (в одной фазе):

$$R_{Pn-Pm} = R_H \frac{R_{стун, \%}}{100}, \quad \text{Ом}$$

где $R_{стун, \%}$ – определено для каждой ступени панели управления; R_H – номинальное сопротивление обмотки ротора, Ом.

$$R_H = \frac{E_{PH}}{\sqrt{3}I_P},$$

где E_{PH} – номинальное напряжение ротора, В.

Для выбора резисторов необходимо определить значения расчетных токов по ступеням. Для этого первоначально определяем среднюю мощность потерь в резисторах (в трех фазах), кВт:

- для торможения противовключением

$$P_{P,T} = \frac{a \cdot P_{CT}}{k_T \eta_{ЭКВ} \eta_D} \left[(\eta_D - \eta_{ЭКВ}) + \frac{(1 - \eta_D)(1 + \varepsilon)(\eta_{ЭКВ,Б} - \eta_{ЭКВ})}{\eta_{ЭКВ,Б}} \right],$$

- для динамического торможения

$$P_{P,T} = \frac{a \cdot P_{CT}}{k_T \eta_{ЭКВ} \eta_D} \left[(1,25\eta_D - \eta_{ЭКВ} - 0,25\eta_{ЭКВ} \eta_D) + \frac{(1 - \eta_D)(1 + \varepsilon)(\eta_{ЭКВ,Б} - \eta_{ЭКВ})}{\eta_{ЭКВ,Б}} \right],$$

в которых мощность статической нагрузки P_{CT} , кВт

$$P_{CT} = M_{CT} n_H / 9550,$$

$$\eta_{ЭКВ} = \frac{\eta_{ЭКВ,Б}}{1 + \frac{\eta_{ЭКВ,Б} - \eta_{ЭКВН}}{\eta_{ЭКВН}} \frac{J}{1,2J_D} (n_{МАХ} / n_{БАЗ})^2},$$

где $\eta_{ЭКВ,Б}$ - эквивалентный базовый КПД, определяется системой электропривода, для асинхронного электропривода с АД с фазным ротором при торможении противовключением он равен 0,76, при динамическом торможении – 0,81;

k_T – коэффициент нагрузки, зависит от режима работы и выбранной системы электропривода для асинхронного электропривода с АД с фазным ротором при соотношении $J/(1,2J_D) > 5$ и торможении противовключением он равен 0,65, при динамическом торможении – 0,85, соответственно при $J/(1,2J_D) < 5$: противовключение -1,2, динамическое торможение - 1,3;

$\eta_{ЭКВН}$ - КПД, зависит от продолжительности включения, типа электропривода и способа торможения. Для $ПВ_H = 40\%$: при торможении противовключением – 0,72, при динамическом – 0,76; для $ПВ_H = 25\%$ соответственно – 0,68 и 0,71; при длительном режиме работы ($ПВ_H = 100\%$) $\eta_{ЭКВ,Б} = \eta_{ЭКВН}$.

J – приведенный момент инерции, кг · м²;

M_C – момент нагрузки, Н · м;

$\varepsilon = ПВ_H/100$, о.е. – коэффициент включения АД;

a – коэффициент использования привода, для общих механизмов $a=1$;

$n_{МАХ}$ – максимальная частота вращения, для асинхронных двигателей это синхронная частота вращения, n_1 , об/мин;

$n_{БАЗ}$ - базовая частота вращения, $n_{БАЗ} = 1000$ об/мин;

паспортные значения АД – коэффициент полезного действия $\eta_{ДВ}$, о.е., номинальная частота вращения n_H , об/мин, момент инерции J_D , кг · м², продолжительность включения $ПВ_H$, % (Приложение 2, Табл. 3, 4)

При симметричной схеме включения резисторов в фазы обмотки ротора, мощность приходящаяся на одну фазу, кВт

$$P_{P,T\phi} = P_{P,T} / 3.$$

Далее определяется расчетный тепловой ток резистора, А

$$I_{P,T} = \sqrt{\frac{1,1 \cdot 10^{11} P_{PT\phi}}{R_H \cdot \sum R_{\%} \cdot \sum (I_{\%}^2 \cdot R_{\%})}}$$

где $R_{\%}$ и $I_{\%}$ - относительные значения сопротивления ступени и тока нагрузки, %, определяемые по используемому типу магнитного контроллера (Приложение 2, Табл.5).

Для каждой ступени резистора вычисляется расчетное значение теплового тока, А

$$I_{Pn-Pm} = I_{P,T} \frac{I_{\%}}{100}.$$

По найденным расчетным значениям сопротивлений и токов по ступеням резистора определяются необходимые блоки резисторов (Приложение 2, Табл. 6, 7), разрабатываются схемы соединений элементов блока для получения требуемых сопротивлений и токов. Основными требованиями при подборе являются:

- длительный ток в реостате ступени должен быть больше или равен соответствующему расчетному тепловому току;
- выбранное сопротивление не должно отличаться от расчетного в «+» - на 15%, в «-» - на 10%;
- допускается недоиспользование блоков сопротивлений на 25% (при отсутствии навыков проектирования).

Расчет и выбор сопротивлений проводится для одной фазы. При симметричном сопротивлении в цепи ротора, в двух других фазах резисторы и схемы соединения элементов будут аналогичны.

Исходные данные для расчета представлены в Приложении 1, Табл. 3. Остальные необходимые для решения задачи таблицы и значения приведены в тексте раздела и соответствующих приложениях.

В расчете, в соответствии с примером решения задачи 3, должны быть представлены:

- исходные данные;
- электрическая схема АД с фазным ротором;
- расчет необходимых величин;

- таблицы для расчета токов и сопротивлений;
- разработанная схема включения резисторов в цепь ротора для одной фазы.

Рассмотрим на примере выбор резисторов в цепь ротора асинхронного двигателя с фазным ротором.

Задача 3. Расчет и выбор резисторов в асинхронном двигателе с фазным ротором

Задание

Рассчитать резисторы для электропривода механизма передвижения моста крана при расчетной мощности привода $P_p = 12,9$ кВт и частотой вращения исполнительного электродвигателя с фазным ротором n до 950 об/мин. Рекомендуемый режим торможения - противовключением (п). Расчетная продолжительность включения электропривода $ПВ_H = 40\%$.

Момент инерции электропривода, приведенный к валу двигателя -

$$J = 12 \cdot J_D, \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

Момент нагрузки - $M_C = \frac{M_H}{2,5}, \text{ Н} \cdot \text{м}$

Решение

По расчетной мощности электропривода и частоте вращения электродвигателя из таблицы 3, Приложение 2 выбираем требуемый АД с фазным ротором с режимом работы, соответствующему требованиям электропривода $ПВ_H = 40\%$ ($P_H \geq P_p, n_H \geq n$): 4МТФ160ЛВ6.

Двигатель имеет следующие номинальные данные:

Число пар полюсов: $p = 3$

Мощность: $P_H = 15 \text{ кВт}$

Номинальная частота вращения: $n_H = 930 \text{ об/мин}$

Ток статора: $I_1 = 39 \text{ А}$

Коэффициент полезного действия: $\eta_D = 0,83$

Номинальный ток ротора: $I_{2H} = 48 \text{ А}$

Номинальное напряжение ротора: $E_{PH} = 213V$

Момент инерции: $J_D = 0,31 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$

Продолжительность включения: $ПВ_H = 40\%$.

Угловая номинальная частота вращения АД:

$$\omega_H = 2 \cdot \pi \cdot \frac{n_H}{60} \quad \omega_H = 97,389 \text{ с}^{-1}$$

Номинальный момент АД:

$$M_H = 1000 \cdot \frac{P_H}{\omega_H} \quad M_H = 97,389 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Суммарный момент инерции, приведенный к валу двигателя:

$$J = 12 \cdot J_D \quad J = 3,72 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

Момент нагрузки:

$$M_C = \frac{M_H}{2,5} \quad M_C = 61,608 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Из таблицы 5, Приложение 2 по номинальному току ротора выбираем тип панели управления (до 60 А) - ТА.

Исходя из числа ступеней реостата, для выбранной панели управления определяем электрическую схему АД с фазным ротором. Схема представлена на рисунке 6.

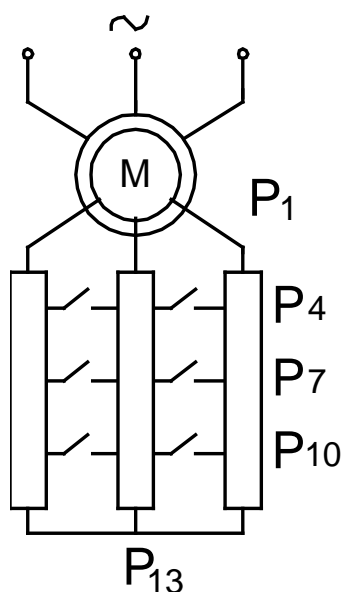


Рис.6. Электрическая схема АД с фазным ротором.

Сопротивления и токи ступеней резисторов с панелью управления ТА

P1 - P4	15/83
P4 - P7	20/59
P7 - P10	40/50
P10 - P13	120/21
Общее	195

В числителе указаны относительные значения сопротивлений, % по ступеням;
в знаменателе - токовая нагрузка, %.

$$P_P = 12,9 \text{ кВт}$$

$$I_P = I_{2H} \cdot \frac{P_P}{P_H} \quad I_P = 41,28 \text{ А}$$

$$R_H = \frac{E_{PH}}{\sqrt{3} \cdot I_P} \quad R_H = 2,979 \text{ Ом}$$

$$R_{1-4} = R_H \cdot 0,15 \quad R_{1-4} = 0,447 \text{ Ом}$$

$$R_{4-7} = R_H \cdot 0,2 \quad R_{4-7} = 0,596 \text{ Ом}$$

$$R_{7-10} = R_H \cdot 0,4 \quad R_{7-10} = 1,192 \text{ Ом}$$

$$R_{10-13} = R_H \cdot 1,2 \quad R_{10-13} = 3,575 \text{ Ом}$$

$$R_{ОБЩ} = R_H \cdot 1,95 \quad R_{ОБЩ} = 5,809 \text{ Ом}$$

Для торможения противовключением имеем:

$$\eta_{ЭКВ.Б} = 0,76 \quad \eta_{ЭКВ.Н} = 0,72$$

Соотношение моментов инерции: $\frac{J}{1,2 \cdot J_D} \geq 5 \quad \frac{3,72}{1,2 \cdot 0,31} = 10$, тогда $K_T = 0,65$

$$\varepsilon = \frac{ПВ_H}{100} \quad \varepsilon = 0,4$$

Частота тока в сети: $f_1 = 50 \text{ Гц}$

$$n_{баз} = 1000 \text{ об/мин}$$

$$n_{MAX} = 60 \cdot \frac{f_1}{p}$$

$$n_{MAX} = 1000 \text{ об/мин}$$

$$\eta_{\text{экв}} = \frac{\eta_{\text{экв.б}}}{1 + \frac{(\eta_{\text{экв.б}} - \eta_{\text{экв.Н}}) \cdot \left(\frac{J}{1,2 \cdot J_{\text{Д}}}\right) \cdot \left(\frac{n_{\text{MAX}}}{n_{\text{баз}}}\right)^2}{\eta_{\text{экв.Н}}}} \quad \eta_{\text{экв}} = 0,489$$

$$P_{\text{СТ}} = M_{\text{С}} \cdot \frac{n_{\text{H}}}{9550} \quad P_{\text{СТ}} = 6 \text{ кВт}$$

$$P_{\text{РТ}} = \left(\frac{a \cdot P_{\text{СТ}}}{K_{\text{T}} \cdot \eta_{\text{экв}} \cdot \eta_{\text{Д}}} \right) \cdot \left[(\eta_{\text{Д}} - \eta_{\text{экв}}) + (1 - \eta_{\text{Д}}) \cdot (1 + \varepsilon) \cdot \frac{(\eta_{\text{экв.б}} - \eta_{\text{экв}})}{\eta_{\text{экв.б}}} \right]$$

$$P_{\text{РТ}} = 9,706 \text{ кВт}$$

$$P_{\text{РТФ}} = \frac{P_{\text{РТ}}}{3} \quad P_{\text{РТФ}} = 3,235 \text{ кВт}$$

$$I_{\text{РТ}} = \sqrt{1,1 \cdot 10^{11} \cdot \frac{P_{\text{РТФ}}}{R_{\text{H}} \cdot 195 \cdot (83^2 \cdot 15 + 59^2 \cdot 20 + 50^2 \cdot 40 + 21^2 \cdot 120)}}$$

$$I_{\text{РТ}} = 43,359 \text{ А}$$

$$I_{1-4} = 0,83 \cdot I_{\text{РТ}} \quad I_{1-4} = 35,988 \text{ А}$$

$$I_{4-7} = 0,59 \cdot I_{\text{РТ}} \quad I_{4-7} = 25,582 \text{ А}$$

$$I_{7-10} = 0,50 \cdot I_{\text{РТ}} \quad I_{7-10} = 21,676 \text{ А}$$

$$I_{10-13} = 0,21 \cdot I_{\text{РТ}} \quad I_{10-13} = 9,105 \text{ А}$$

В соответствии с таблицей 9 на нормализованные блоки БК-12 выбираем для одной фазы блок резисторов ИРАК.434331.003-03 с 12 ступенями резисторов. Схема соединения блока для одной фазы представлена на рисунке 7.

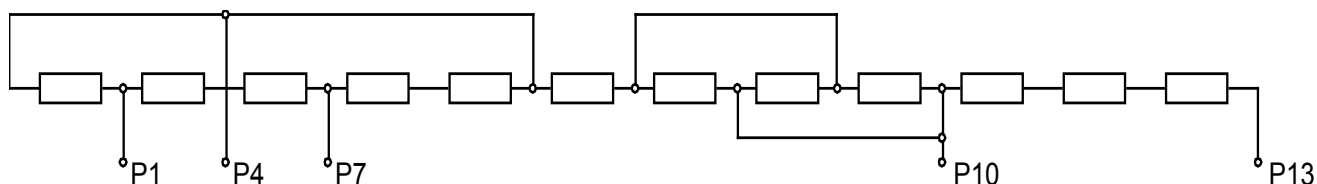


Рис.7. Электрическая схема соединений сопротивлений на фазу обмотки ротора АД с фазным ротором.

В таблице 5 представлены расчетные и фактические параметры ступеней резисторов на одну фазу обмотки ротора.

Таблица 5

Ступени резисторов в фазной обмотке ротора

Ступени	Сопротивление расчетное, Ом	Сопротивление фактическое, Ом	Отклонение, %	Ток расчетный, А	Ток фактический, А
P1-P4	0.447	0,487	+8.9	35.988	18.3·2
P4-P7	0.596	0.65	+9	25.582	18.3·2
P7-P10	1.192	1.3	+9	21.679	18.3·2
P10-13	3.575	3.9	+9	9.105	18.3

Выбранные сопротивления попадают в допуск: "-10" - "+15" %

Фактическая величина тока, протекающего через резисторы, не превышает длительный допустимый ток резисторов (18.3 А). Сопротивления по току недогружены, проверка по кратковременному режиму не требуется.

5. Использование программы MATLAB для моделирования электромеханических процессов в электроприводе

5.1. Введение в систему MATLAB

Система MATLAB предлагается разработчиками (фирма Math Works, Inc.) как лидирующий на рынке язык программирования *высокого уровня* для технических вычислений с большим числом стандартных пакетов прикладных программ. Название MATLAB происходит от словосочетания Matrix Laboratory (матричная лаборатория). Популярности системы способствует ее мощное расширение Simulink, предоставляющее удобное средство для моделирования линейных и нелинейных динамических систем, а также множество других пакетов расширения системы.

5.2. Пакет расширения Simulink

Программа Simulink является приложением к пакету MATLAB. При моделировании с использованием Simulink реализуется принцип визуального программирования, в соответствии с которым, пользователь на экране из библиотеки стандартных блоков создает модель устройства и осуществляет расчеты. При этом пользователю не нужно досконально изучать язык программирования и численные методы математики, а достаточно общих знаний требующихся при работе на компьютере и, естественно, знаний той предметной области, в которой он работает.

5.3. Запуск Simulink

Для запуска программы необходимо предварительно запустить пакет MATLAB. Основное окно пакета MATLAB показано на рис. 8. Там же показана подсказка появляющаяся в окне при наведении указателя мыши на ярлык Simulink в панели инструментов.

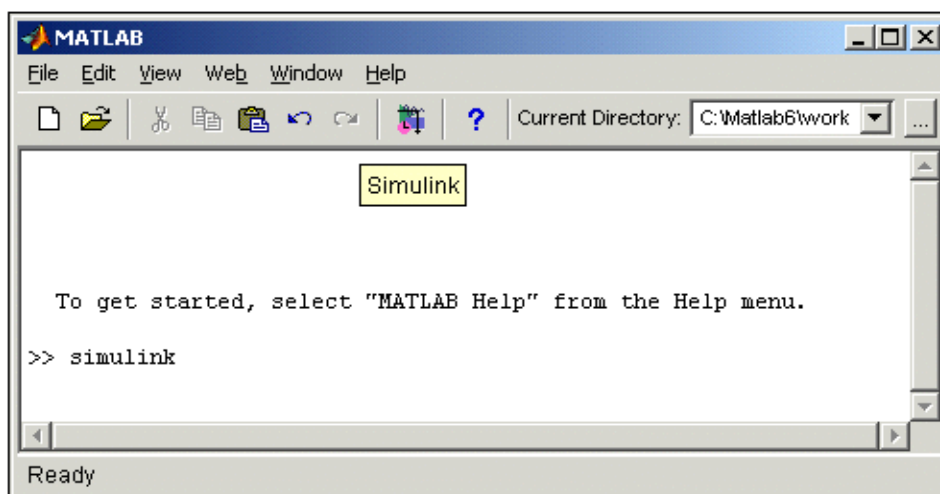



Рис. 8. Основное окно программы MATLAB

После открытия основного окна программы MATLAB нужно запустить программу Simulink. Это можно сделать, нажав кнопку  (Simulink) на панели инструментов командного окна MATLAB, что приводит к открытию окна обозревателя разделов библиотеки Simulink (рис. 9).

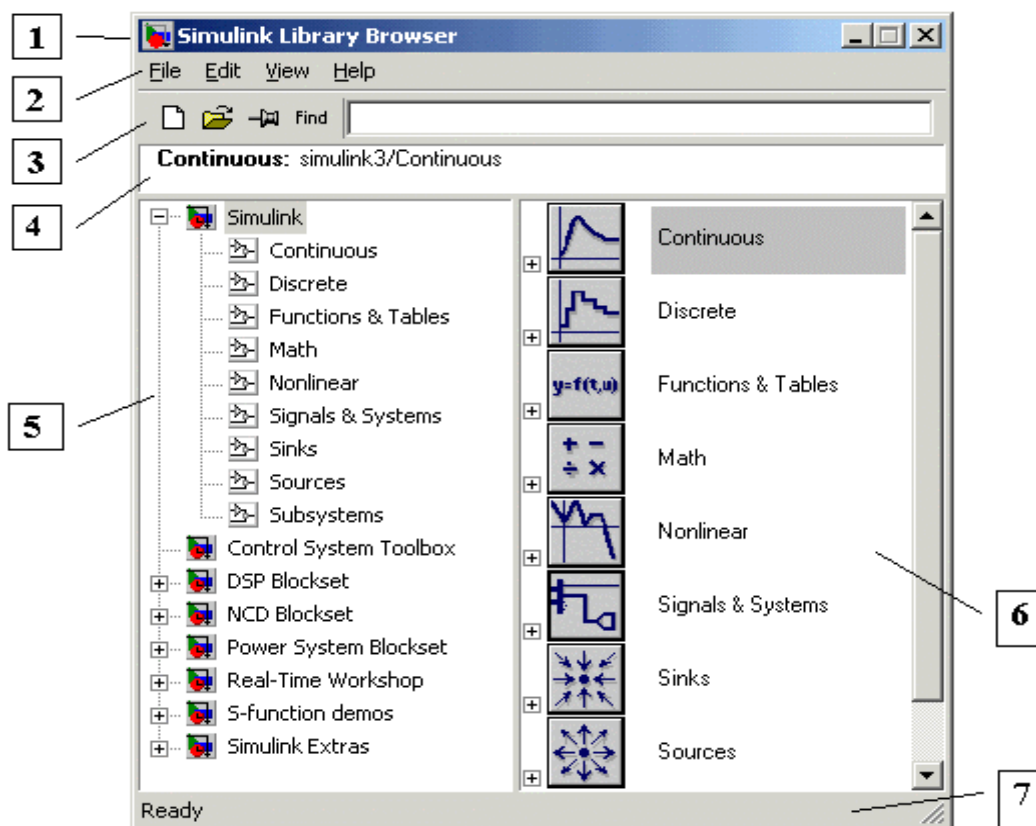


Рис. 9. Окно обозревателя разделов библиотеки Simulink

5.4. Обозреватель разделов библиотеки Simulink

Окно обозревателя библиотеки блоков содержит следующие элементы (рис. 9):

1. Заголовок с названием окна – Simulink Library Browser.
2. Меню с командами File, Edit, View, Help.
3. Панель инструментов с ярлыками наиболее часто используемых команд.
4. Окно комментария для вывода поясняющего сообщения о выбранном блоке.
5. Список разделов библиотеки, реализованный в виде дерева.
6. Окно содержимого раздела библиотеки (список вложенных разделов библиотеки или блоков)
7. Строка состояния, содержащая подсказку по выполняемому действию.

На рис. 9 выделена основная библиотека Simulink (в левой части окна) и показаны ее разделы (в правой части окна).

Библиотека Simulink содержит следующие основные разделы:

1. Continuous – линейные блоки.
2. Discrete – дискретные блоки.
3. Functions & Tables – функции и таблицы.
4. Math – блоки математических операций.
5. Nonlinear – нелинейные блоки.
6. Signals & Systems – сигналы и системы.
7. Sinks - регистрирующие устройства.
8. Sources — источники сигналов и воздействий.
9. Subsystems – блоки подсистем.

Список разделов библиотеки Simulink представлен в виде дерева, и правила работы с ним являются общими для списков такого вида:

- Пиктограмма свернутого узла дерева содержит символ "+", а пиктограмма развернутого содержит символ "-".
- Для того чтобы развернуть или свернуть узел дерева, достаточно щелкнуть на его пиктограмме левой клавишей мыши (ЛКМ).

При выборе соответствующего раздела библиотеки в правой части окна отображается его содержимое (рис. 10).

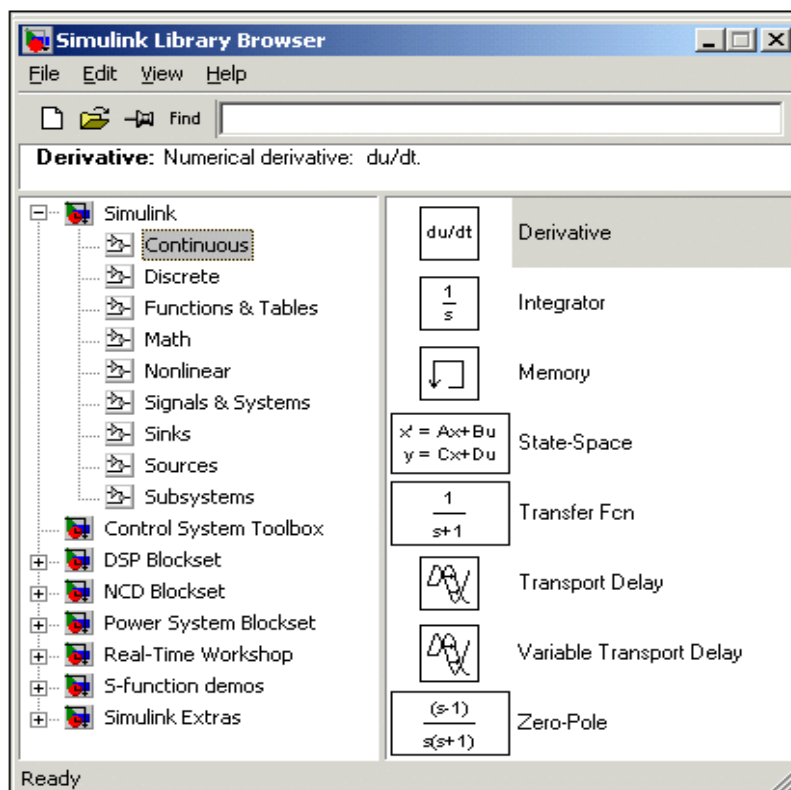


Рис. 10. Окно обозревателя с набором блоков раздела библиотеки

Для работы с окном используются команды собранные в меню. Меню обозревателя библиотек содержит следующие пункты:

- File (Файл) — работа с файлами библиотек.
- Edit (Редактирование) — добавление блоков и их поиск (по названию).
- View (Вид) — управление показом элементов интерфейса.
- Help (Справка) — вывод окна справки по обозревателю библиотек.

Для работы с обозревателем можно также использовать кнопки на панели инструментов (рис. 11).

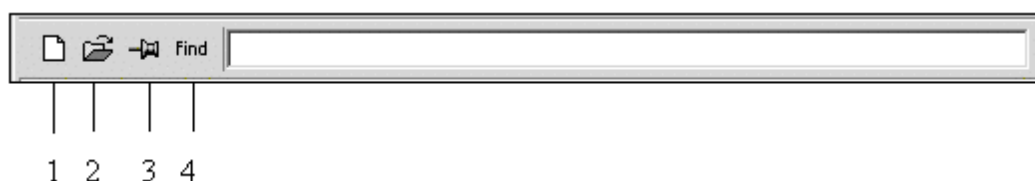



Рис. 11. Панель инструментов обозревателя разделов библиотек

Кнопки панели инструментов имеют следующее назначение:

1. Создать новую **S**-модель (**S**imulink–модель) (открыть новое окно модели).
2. Открыть одну из существующих S-моделей.
3. Изменить свойства окна обозревателя. Данная кнопка позволяет установить режим отображения окна обозревателя "поверх всех окон". Повторное нажатие отменяет такой режим.
4. Поиск блока по названию (по первым символам названия) Find. После того как блок будет найден, в окне обозревателя откроется соответствующий раздел библиотеки, а блок будет выделен.

5.5. Создание модели

Для создания модели в среде SIMULINK необходимо последовательно выполнить ряд действий:

1. Создать новый файл модели с помощью команды File/New/Model, или используя кнопку  на панели инструментов. Вновь созданное окно модели показано на рис. 12.

2. Расположить блоки в окне модели. Для этого необходимо открыть соответствующий раздел библиотеки (Например, Sources - Источники). Далее, указав курсором на требуемый блок и нажав на левую клавишу "мыши" - "перетащить" блок в созданное окно. *Клавишу мыши нужно держать нажатой.* На

рис 13 показано окно модели, содержащее следующие блоки: источник постоянного сигнала (Constant), передаточная функция (Transfer Fcn) и осциллограф (Scope).

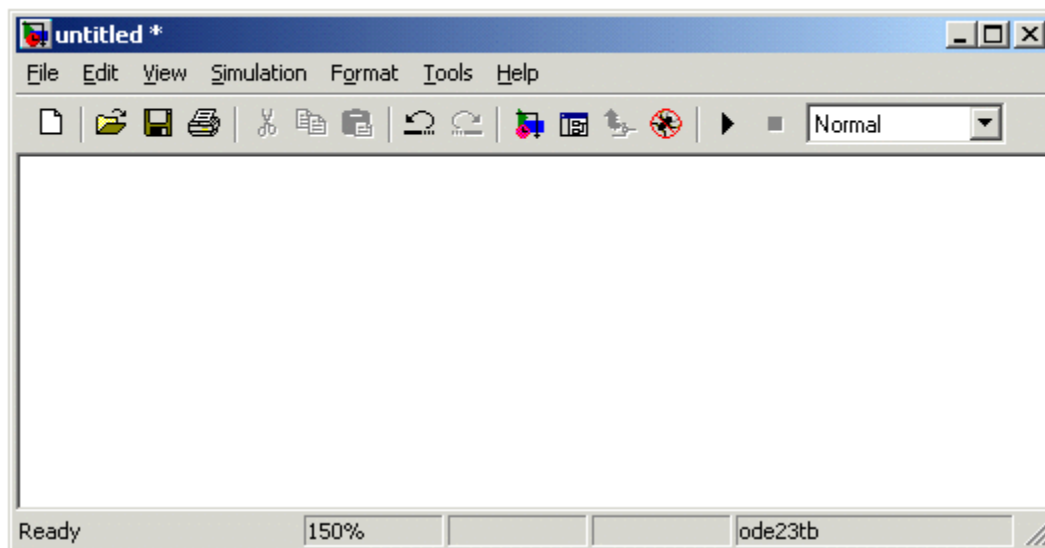


Рис. 12. Пустое окно модели

Для удаления блока необходимо выбрать блок (указать курсором на его изображение и нажать левую клавишу “мыши”), а затем нажать клавишу Delete на клавиатуре.

Для изменения размеров блока требуется выбрать блок, установить курсор в один из углов блока и, нажав левую клавишу “мыши”, изменить размер блока (курсор при этом превратится в двухстороннюю стрелку).

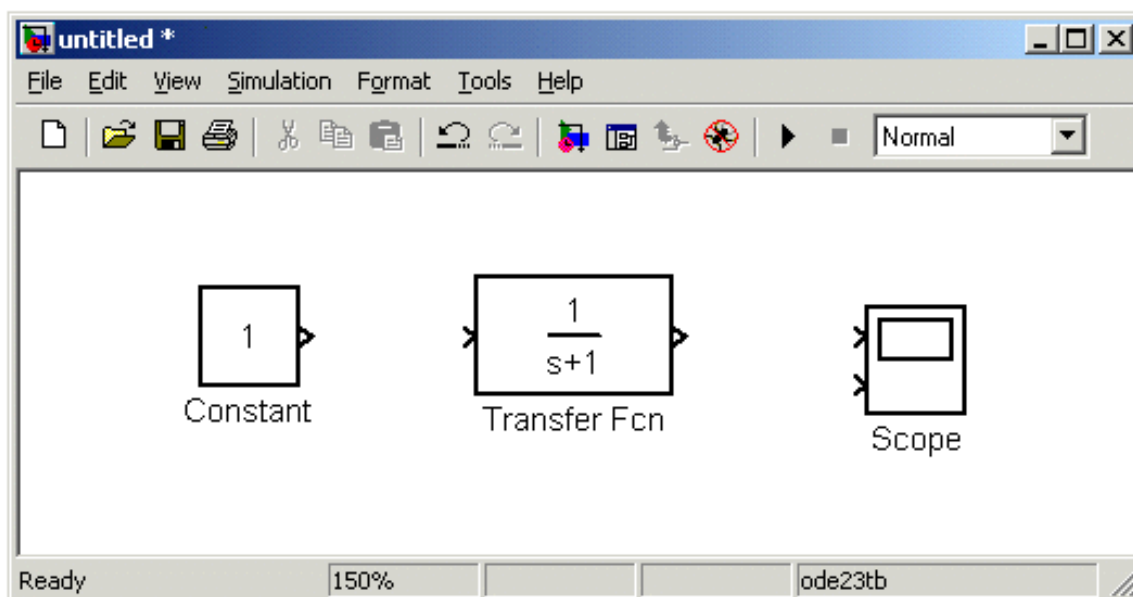


Рис. 13. Окно модели, содержащее блоки

3. Далее, если это требуется, нужно изменить параметры блока, установленные программой “по умолчанию”. Для этого необходимо дважды щелкнуть левой клавишей “мыши”, указав курсором на изображение блока. Откроется окно редактирования параметров данного блока. При задании численных параметров следует иметь в виду, что в качестве десятичного разделителя должна использоваться точка, а не запятая.

4. После установки на схеме всех блоков из требуемых библиотек нужно выполнить соединение элементов схемы. Для соединения блоков необходимо указать курсором на “выход” блока, а затем, нажав и, не отпуская левую клавишу “мыши”, провести линию к входу другого блока. После чего отпустить клавишу. В случае правильного соединения изображение стрелки на входе блока изменяет цвет. Для создания точки разветвления в соединительной линии нужно подвести курсор к предполагаемому узлу и, нажав правую клавишу “мыши”, протянуть линию. Для удаления линии требуется выбрать линию (так же, как это выполняется для блока), а затем нажать клавишу Delete на клавиатуре. Схема модели, в которой выполнены соединения между блоками, показана на рис. 14.

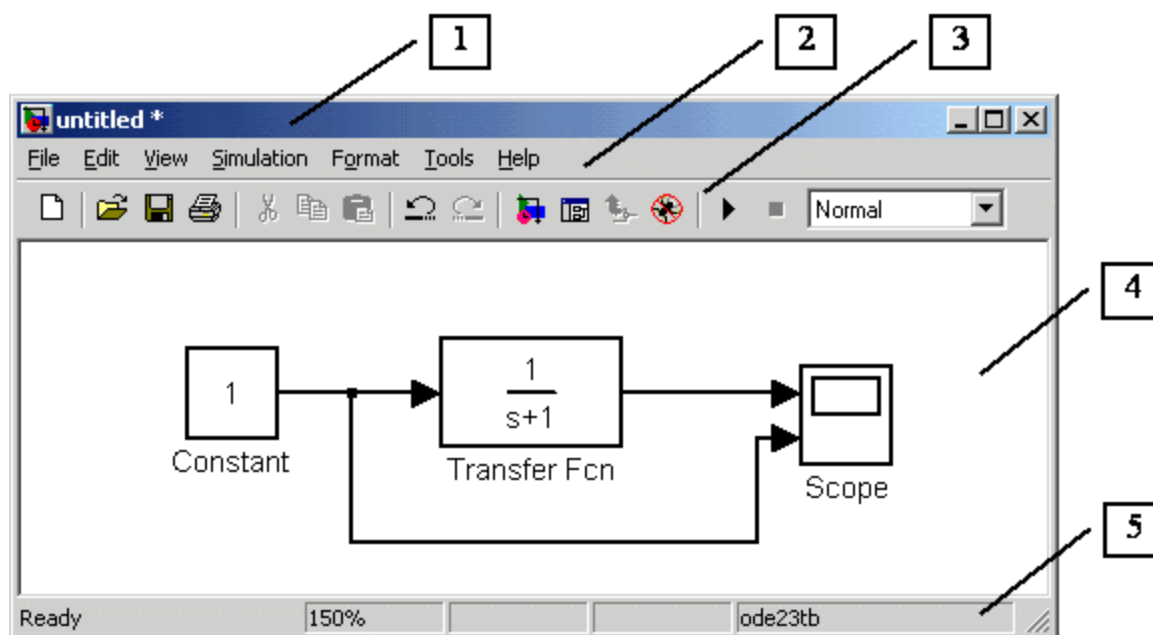


Рис. 14. Схема модели

5. После составления расчетной схемы необходимо сохранить ее в виде файла на диске, выбрав пункт меню File/Save As... в окне схемы и указав папку и имя файла. Следует иметь в виду, что имя файла не должно превышать 32 символов, должно начинаться с буквы и не может содержать символы кириллицы и спецсимволы. При последующем редактировании схемы можно пользоваться

пунктом меню File/Save. При повторных запусках программы SIMULINK загрузка схемы осуществляется с помощью меню File/Open... в окне обозревателя библиотеки или из основного окна MATLAB.

5.6. Окно модели

Окно модели содержит следующие элементы (см. рис. 14):

1. Заголовок, с названием окна. Вновь созданному окну присваивается имя Untitled с соответствующим номером.
2. Меню с командами File, Edit, View и т.д.
3. Панель инструментов.
4. Окно для создания схемы модели.
5. Строка состояния, содержащая информацию о текущем состоянии модели.

Меню окна содержит команды для редактирования модели, ее настройки и управления процессом расчета, работы файлами и т.п.:

- File (Файл) — работа с файлами моделей.
- Edit (Редактирование) — изменение модели и поиск блоков.
- View (Вид) — управление показом элементов интерфейса.
- Simulation (Моделирование) — задание настроек для моделирования и управление процессом расчета.
- Format (Форматирование) — изменение внешнего вида блоков и модели в целом.
- Tools (Инструментальные средства) — применение специальных средств для работы с моделью (отладчик, линейный анализ и т.п.)
- Help (Справка) — вывод окон справочной системы.

Для работы с моделью можно также использовать кнопки на панели инструментов (рис.15).

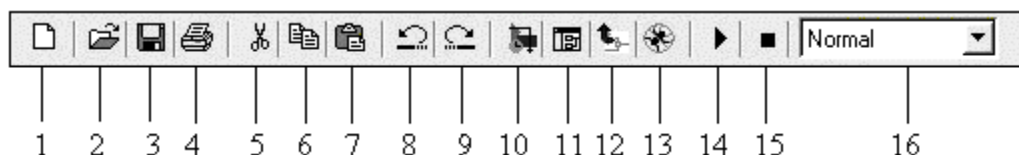



Рис. 15. Панель инструментов окна модели

Кнопки панели инструментов имеют следующее назначение:

1. New Model — открыть новое (пустое) окно модели.

2. Open Model — открыть существующий mdl-файл.
3. Save Model — сохранить mdl-файл на диске.
4. Print Model — вывод на печать блок-диаграммы модели.
5. Cut — вырезать выделенную часть модели в буфер промежуточного хранения.
6. Copy — скопировать выделенную часть модели в буфер промежуточного хранения.
7. Paste — вставить в окно модели содержимое буфера промежуточного хранения.
8. Undo — отменить предыдущую операцию редактирования.
9. Redo — восстановить результат отмененной операции редактирования.
10. Library Browser — открыть окно обозревателя библиотек.
11. Toggle Model Browser — открыть окно обозревателя модели.
12. Go to parent system — переход из подсистемы в систему высшего уровня иерархии (“родительскую систему”). Команда доступна только, если открыта подсистема.
13. Debug — запуск отладчика модели.
14. Start/Pause/Continue Simulation — запуск модели на исполнение (команда Start); после запуска модели на изображении кнопки выводится символ , и ей соответствует уже команда Pause (Приостановить моделирование); для возобновления моделирования следует щелкнуть по той же кнопке, поскольку в режиме паузы ей соответствует команда Continue (Продолжить).
15. Stop — закончить моделирование. Кнопка становится доступной после начала моделирования, а также после выполнения команды Pause.
16. Normal/Accelerator — обычный/Ускоренный режим расчета. Инструмент доступен, если установлено приложение Simulink Performance Tool.

В нижней части окна модели находится строка состояния, в которой отображаются краткие комментарии к кнопкам панели инструментов, а также к пунктам меню, когда указатель мыши находится над соответствующим элементом интерфейса. Это же текстовое поле используется и для индикации состояния Simulink: Ready (Готов) или Running (Выполнение). В строке состояния отображаются также:

- масштаб отображения блок-диаграммы (в процентах, исходное значение равно 100%),

- индикатор степени завершенности сеанса моделирования (появляется после запуска модели),
- текущее значения модельного времени (выводится также только после запуска модели),
- используемый алгоритм расчета состояний модели (метод решения).

5.7. Основные приемы подготовки и редактирования модели

5.7.1. Добавление текстовых надписей

Для повышения наглядности модели удобно использовать текстовые надписи. Для создания надписи нужно указать мышью место надписи и дважды щелкнуть левой клавишей мыши. После этого появится прямоугольная рамка с курсором ввода. Аналогичным образом можно изменить и подписи к блокам моделей. На рис. 16 показаны текстовая надпись и изменение надписи в блоке передаточной функции. Следует иметь в виду, что если рассматриваемая версия программы Simulink не адаптирована к использованию кириллических шрифтов, то применение их может иметь самые разные последствия: отображение надписей в нечитаемом виде, обрезание надписей, сообщения об ошибках, а также невозможность открыть модель после ее сохранения. Поэтому, применение надписей на русском языке для Simulink крайне не желательно.

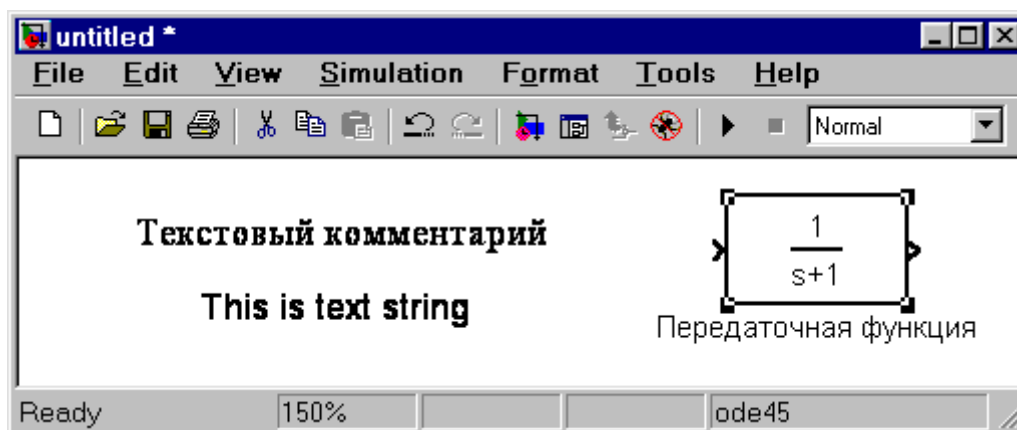



Рис. 16. Текстовая надпись и изменение надписи в Transfer Function


5.7.2. Выделение объектов

Для выполнения какого-либо действия с элементом модели (блоком, соединительной линией, надписью) этот элемент необходимо сначала выделить. Выделение объектов проще всего осуществляется мышью. Для этого необходимо установить курсор мыши на нужном объекте и щелкнуть левой клавишей мыши.

Произойдет выделение объекта. Об этом будут свидетельствовать маркеры по углам объекта (см. рис. 16). Можно также выделить несколько объектов. Для этого надо установить курсор мыши вблизи группы объектов, нажать левую клавишу мыши и, не отпуская ее, начать перемещать мышью. Появится пунктирная рамка, размеры которой будут изменяться при перемещении мыши. Все охваченные рамкой объекты становятся выделенными. Выделить все объекты также можно, используя команду Edit/Select All. После выделения объекта его можно копировать или перемещать в буфер промежуточного хранения, извлекать из буфера, а также удалять, используя стандартные приемы работы в Windows-программах.


5.7.3. Копирование и перемещение объектов в буфер промежуточного хранения

Для копирования объекта в буфер его необходимо предварительно выделить, а затем выполнить команду Edit/Сору или воспользоваться инструментом  на панели инструментов.

Для вырезания объекта в буфер его необходимо предварительно выделить, а затем выполнить команду Edit/Cut или воспользоваться инструментом  на панели инструментов. При выполнении данных операций следует иметь в виду, что объекты помещаются в собственный буфер MATLAB и недоступны из других приложений. Использование команды Edit/Сору model to Clipboard позволяет поместить *графическое изображение* модели в буфер Windows и, соответственно, делает его доступным для остальных программ.

Копирование можно выполнить и таким образом: нажать *правую* клавишу мыши и, не отпуская ее, переместить объект. При этом будет создана копия объекта, которую можно переместить в необходимое место.

5.7.4. Вставка объектов из буфера промежуточного хранения

Для вставки объекта из буфера необходимо предварительно указать место вставки, щелкнув левой клавишей мыши в предполагаемом месте вставки, а затем выполнить команду Edit/Paste или воспользоваться инструментом  на панели инструментов.

5.7.5. Удаление объектов

Для удаления объекта его необходимо предварительно выделить, а затем выполнить команду Edit/Clear или воспользоваться клавишей Delete на клавиатуре. Следует учесть, что команда Clear удаляет блок без помещения его в буфер обмена. Однако эту операцию можно отменить командой меню File/Undo.

5.7.6. Соединение блоков

Для соединения блоков необходимо сначала установить курсор мыши на выходной порт одного из блоков. Курсор при этом превратится в большой крест из тонких линий (рис. 17). Держа нажатой левую кнопку мыши, нужно переместить курсор к входному порту нужного блока. Курсор мыши примет вид креста из тонких сдвоенных линий (рис. 18). После создания линии необходимо отпустить левую клавишу мыши. Свидетельством того, что соединение создано, будет жирная стрелка у входного порта блока. Выделение линии производится точно также как и выделение блока – одинарным щелчком левой клавиши мыши. Черные маркеры, расположенные в узлах соединительной линии будут говорить о том, что линия выделена.

Удаление соединений выполняется также как и любых других объектов (см. п. 5.7.5).

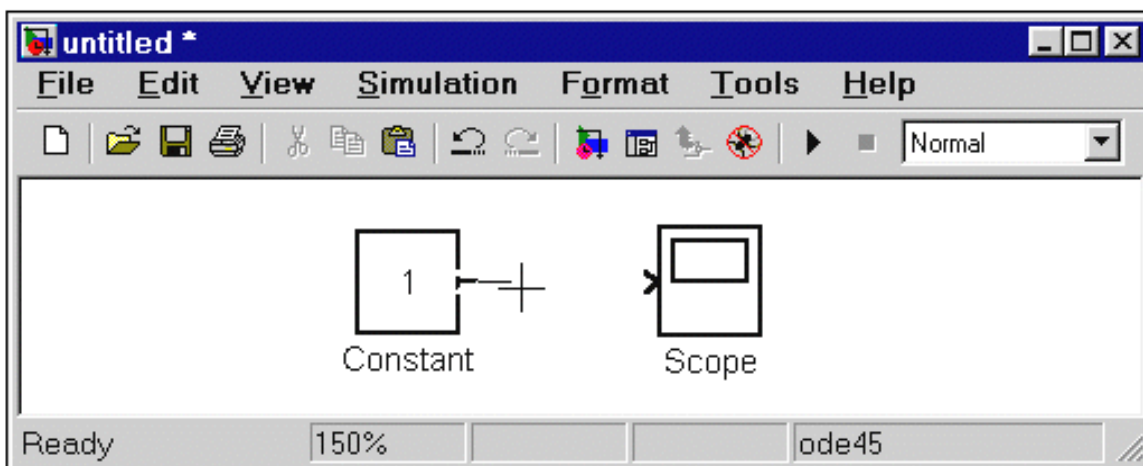


Рис. 17. Начало создания соединения

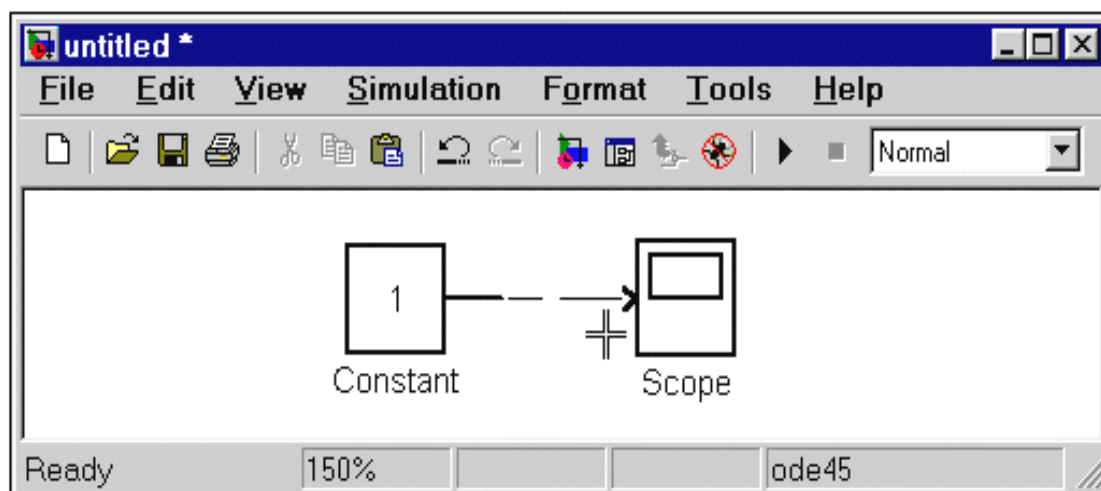


Рис. 18. Завершение создания соединения

5.7.7. Изменение размеров блоков

Для изменения размера блока он выделяется, после чего курсор мыши надо установить на один из маркеров по углам блока. После превращения курсора в двустороннюю стрелку, необходимо нажать левую клавишу мыши и растянуть (или сжать) изображения блока. На рис. 19 показан этот процесс. Размеры надписей блока при этом не изменяются.

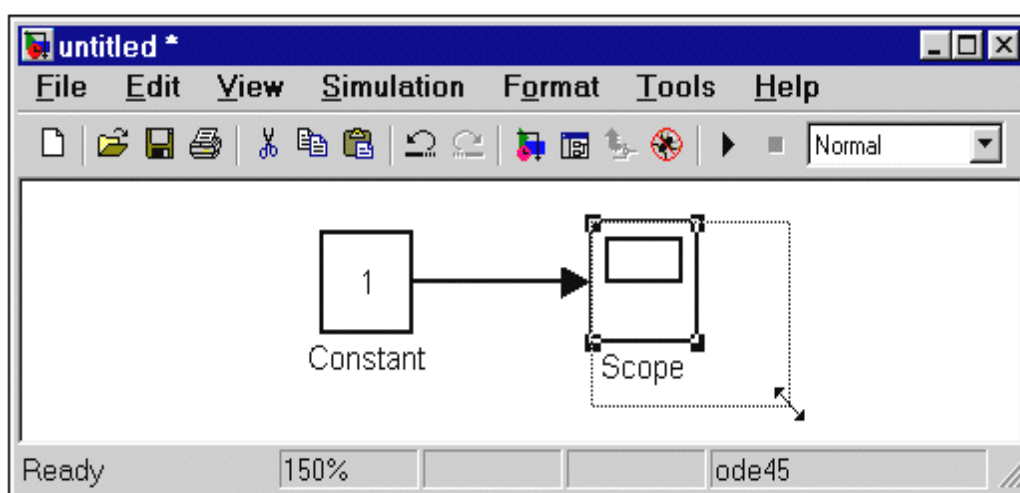




Рис. 19. Изменение размера блока

5.7.8. Перемещение блоков

Любой блок модели можно переместить, выделив его, и передвинув, держа нажатой левую клавишу мыши. Если к входам и выходам блока подведены соединительные линии, то они не разрываются, а лишь сокращаются или увеличиваются в длине. В соединении можно также вставить блок, имеющий один вход и один выход. Для этого его нужно расположить в требуемом месте соединительной линии.

5.7.9. Использование команд Undo и Redo

В процессе освоения программы пользователь может совершать действия кажущиеся ему необратимыми (например, случайное удаление части модели, копирование и т.д.). В этом случае следует воспользоваться командой Undo — отмена последней операции. Команду можно вызвать с помощью кнопки  в панели инструментов окна модели или из меню Edit. Для восстановления отмененной операции служит команда Redo (инструмент ).

5.7.10. Форматирования объектов

В меню Format (также как и в контекстном меню, вызываемом нажатием правой клавиши мыши на объекте) находится набор команд форматирования блоков. Команды форматирования разделяются на несколько групп:

1. Изменение отображения надписей:

- Font — форматирование шрифта надписей и текстовых блоков.
- Text alignment — выравнивание текста в текстовых надписях.
- Flip name — перемещение подписи блока.
- Show/Hide name — отображение или скрытие подписи блока.

2. Изменение цветов отображения блоков:

- Foreground color — выбор цвета линий для выделенных блоков.
- Background color — выбор цвета фона выделенных блоков.
- Screen color — выбор цвета фона для всего окна модели.

3. Изменение положения блока и его вида:

- Flip block – зеркальное отображение относительно вертикальной оси симметрии.
- Rotate block – поворот блока на 90^0 по часовой стрелке.
- Show drop shadow — показ тени от блока.
- Show port labels — показ меток портов.

4. Прочие установки:

- Library link display — показ связей с библиотеками.
- Sample time colors — выбор цвета блока индикации времени.
- Wide nonscalar lines — увеличение/уменьшение ширины не скалярных линий.
- Signal dimensions — показ размерности сигналов.
- Port data types — показ данных о типе портов.
- Storage class — класс памяти. Параметр, устанавливаемый при работе Real-Time Workshop.
- Execution order — вывод порядкового номера блока в последовательности исполнения.
-

5.8. Завершение работы

Для завершения работы необходимо сохранить модель в файле, закрыть окно модели, окно обозревателя библиотек, а также основное окно пакета MATLAB.

5.9. Библиотека блоков Simulink

5.9.1. Источники сигналов

5.9.1.1. Источник постоянного сигнала Constant

Назначение:

Задаёт постоянный по уровню сигнал.

Параметры:

1. Constant value – постоянная величина.
2. Interpret vector parameters as 1-D – интерпретировать вектор параметров как одномерный (при установленном флажке). Значение константы может быть действительным или комплексным числом, вычисляемым выражением, вектором или матрицей.

Рис. 20 иллюстрирует применение этого источника и измерение его выходного сигнала с помощью цифрового индикатора Display.

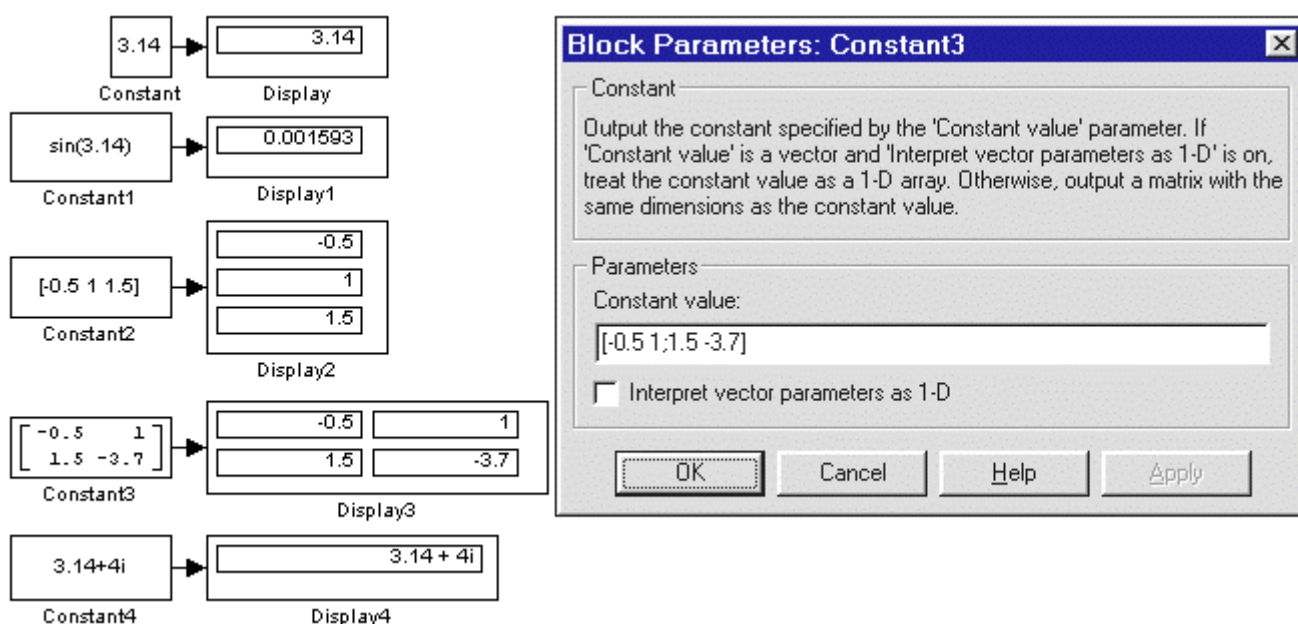


Рис. 20. Источник постоянного воздействия Constant

5.9.1.2. Источник синусоидального сигнала Sine Wave

Назначение:

Формирует синусоидальный сигнал с заданной частотой, амплитудой, фазой и смещением.

Для формирования выходного сигнала блоком могут использоваться два алгоритма. Вид алгоритма определяется параметром Sine Type (способ формирования сигнала):

- Time-based – по текущему времени.

- Sample-based – по величине шага модельного времени.

При формировании выходного сигнала по текущему значению времени для непрерывных систем выходной сигнал источника соответствует выражению:

$$y = Amplitude * \sin(frequency * time + phase) + bias.$$

Параметры:

1. Amplitude – амплитуда.
2. Bias – постоянная составляющая сигнала.
3. Frequency (rads/sec) – угловая частота (рад/с).
4. Phase (rads) – начальная фаза (рад).
5. Sample time – шаг модельного времени. Используется для согласования работы источника и других компонентов модели во времени.

На рис. 21 показано применение блока с разными значениями шага модельного времени (Sample time = 0 для блока Sine Wave 1 и Sample time = 0.1 для блока Sine Wave 2). Для отображения графиков выходных сигналов в модели использован виртуальный осциллограф (Scope).

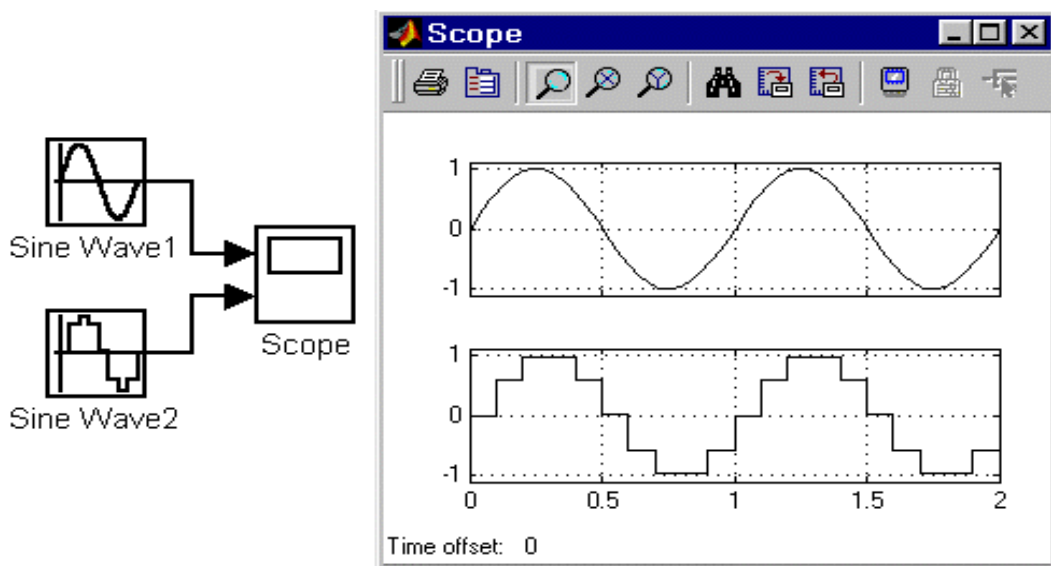


Рис. 21. Блок Sine Wave

5.9.1.3. Идеальный источник переменного напряжения

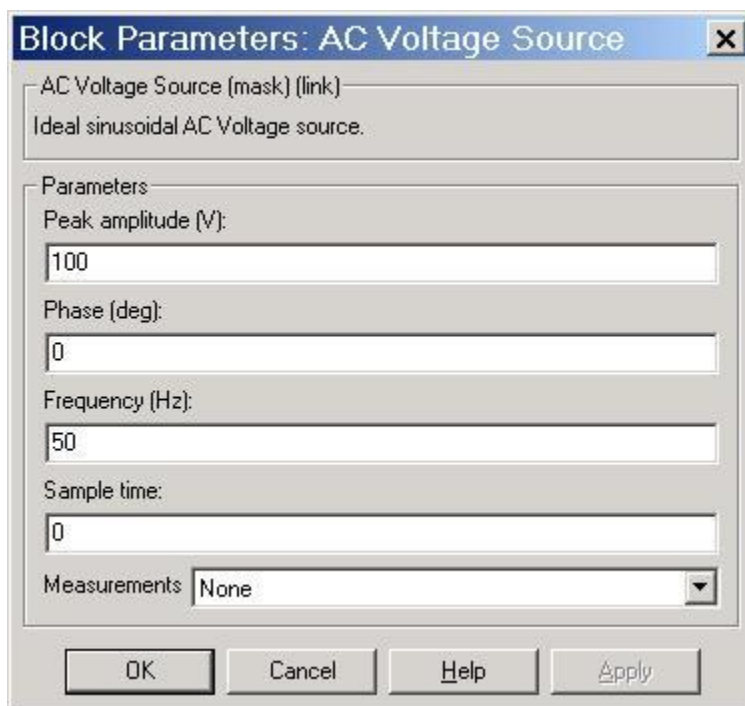
Пиктограмма:



Назначение:

Вырабатывает синусоидальное напряжение с постоянной амплитудой.

Окно задания параметров:



Параметры блока:

Peak Amplitude (V) – амплитуда выходного напряжения источника.

Phase (deg) – начальная фаза (град).

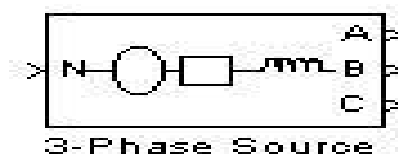
Frequency (Hz) – частота источника (Гц).

Sample time – шаг дискретизации. Параметр задает шаг дискретизации по времени выходного напряжения источника при создании дискретных моделей.

Measurements – измеряемые переменные. Параметр позволяет выбрать, передаваемые в блок Multimeter, переменные, которые затем можно увидеть с помощью блока Scope.

5.9.1.4. Трехфазный источник напряжения

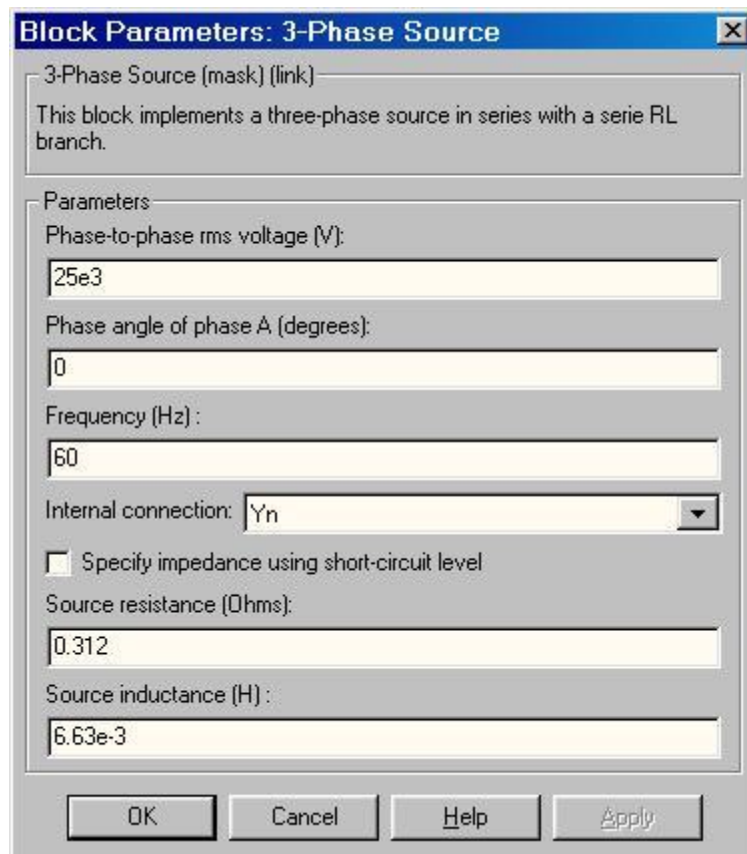
Пиктограмма:



Назначение:

Вырабатывает трехфазную систему напряжений.

Окно задания параметров:



Параметры блока:

Phase-to-phase rms voltage (V) – действующее значение линейного напряжения.

Phase angle of phase A (deg) – начальная фаза напряжения в фазе А (град).

Frequency (Hz) – частота источника (Гц).

Internal connection – соединение фаз источника. Значение параметра выбирается из списка:

- Y – звезда,
- Yn – звезда с нулевым проводом,
- Yg – звезда с заземленной нейтралью.

Specify impedance using short-circuit level – задать собственное полное сопротивление источника используя параметры короткого замыкания. При установке данного параметра в окне диалога появляются дополнительные графы для ввода параметров короткого замыкания источника.

Source resistance (Ohms) – собственное сопротивление источника (Ом).

Source inductance (H) – собственная индуктивность источника (Гн).

3-Phase short-circuit level at base voltage (VA) – мощность короткого замыкания при базовом значении напряжения.

Base voltage ($V_{rms\ ph-ph}$) – действующее значение линейного базового напряжения. Величина базового линейного напряжения источника, при котором определена мощность короткого замыкания.

X/R ratio – отношение индуктивного и активного сопротивлений.

5.9.1.5. Генератор ступенчатого сигнала Step

Назначение:

Формирует ступенчатый сигнал.

Параметры:

1. Step time – время наступления перепада сигнала (с).
2. Initial value – начальное значение сигнала.
3. Final value – конечное значение сигнала.

Перепад может быть как в большую сторону (конечное значение больше чем начальное), так и в меньшую (конечное значение меньше чем начальное). Значения начального и конечного уровней могут быть не только положительными, но и отрицательными (например, изменение сигнала с уровня -5 до уровня -3).

На рис. 22. показано использование генератора ступенчатого сигнала.

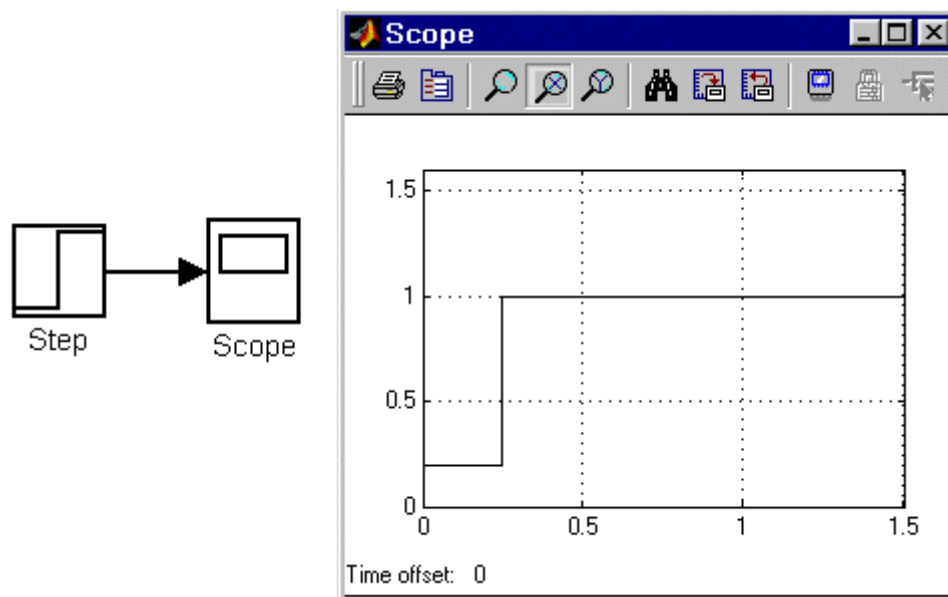


Рис. 22. Блок Step

5.9.2. Sinks - приемники сигналов

5.9.2.1. Осциллограф Scope

Назначение:

Строит графики исследуемых сигналов в функции времени. Позволяет наблюдать за изменениями сигналов в процессе моделирования.

Изображение блока и окно для просмотра графиков показаны на рис. 23.

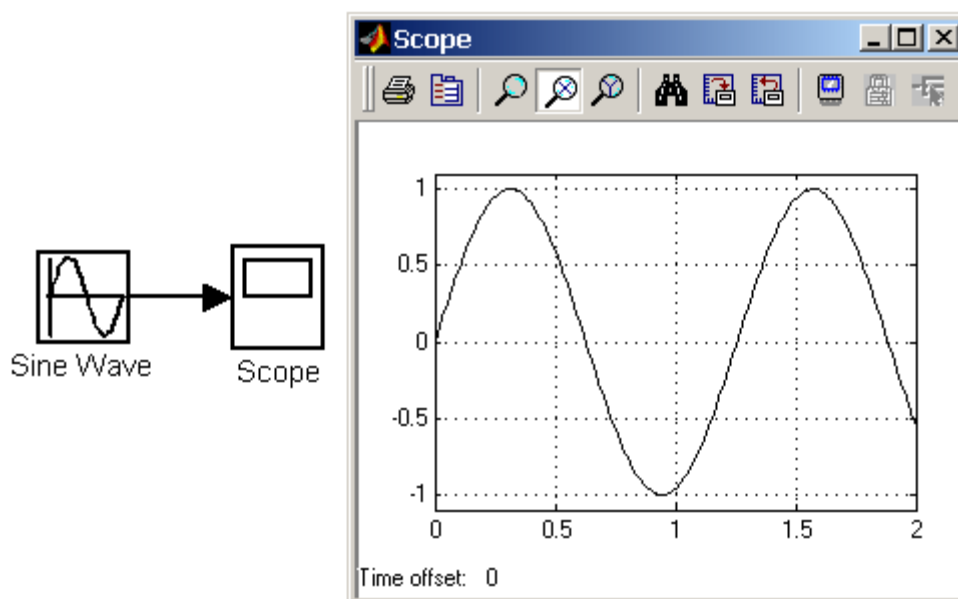


Рис. 23. Осциллограф Scope

Для того чтобы открыть окно просмотра сигналов необходимо выполнить двойной щелчок левой клавишей “мыши” на изображении блока. Это можно сделать на любом этапе расчета (как до начала расчета, так и после него, а также во время расчета). В том случае, если на вход блока поступает векторный сигнал, то кривая для каждого элемента вектора строится отдельным цветом.

Настройка окна осциллографа выполняется с помощью панелей инструментов (рис. 24).

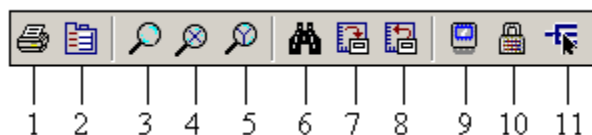


Рис. 24. Панель инструментов блока Scope

Панель инструментов содержит 11 кнопок:




1. Print – печать содержимого окна осциллографа.
2. Parameters – доступ к окну настройки параметров.
3. Zoom – увеличение масштаба по обеим осям.
4. Zoom X-axis – увеличение масштаба по горизонтальной оси.




5. Zoom Y-axis – увеличение масштаба по вертикальной оси.
6. Autoscale – автоматическая установка масштабов по обеим осям.
7. Save current axes settings – сохранение текущих настроек окна.
8. Restore saved axes settings – установка ранее сохраненных настроек окна.
9. Floating scope – перевод осциллографа в “свободный” режим.

10. Lock/Unlock axes selection – закрепить/разорвать связь между текущей координатной системой окна и отображаемым сигналом. Инструмент доступен, если включен режим Floating scope.

11. Signal selection – выбор сигналов для отображения. Инструмент доступен, если включен режим Floating scope.

Изменение масштабов отображаемых графиков можно выполнять несколькими способами:

1. Нажать соответствующую кнопку (,  или ) и щелкнуть один раз левой клавишей “мыши” в нужном месте графика. Произойдет 2,5 кратное увеличение масштаба.

2. Нажать соответствующую кнопку (,  или ) и, нажав левую клавишу “мыши”, с помощью динамической рамки или отрезка указать область графика для увеличенного изображения. Рис. 25 поясняет этот процесс.

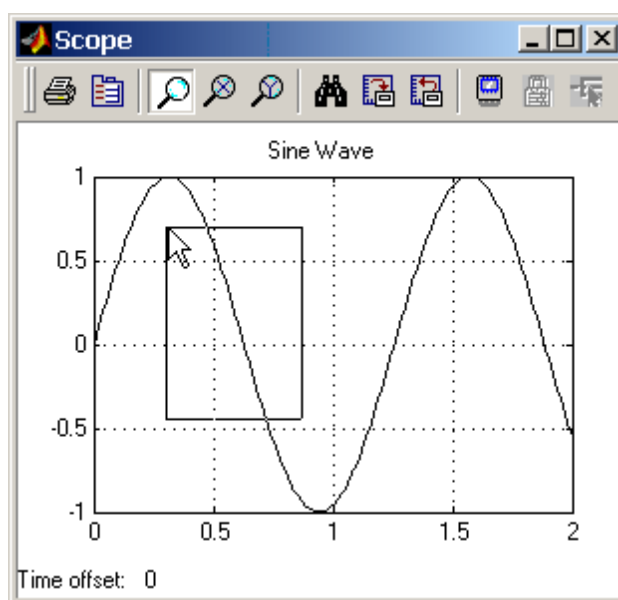


Рис. 25. Увеличение масштаба графика.

3. Щелкнуть правой клавишей “мыши” в окне графиков и, выбрать команду Axes properties... в контекстном меню. Откроется окно свойств графика, в котором с помощью параметров Y-min и Y-max можно указать предельные значения

вертикальной оси. В этом же окне можно указать заголовок графика (Title), заменив выражение %<SignalLabel> в строке ввода. Окно свойств показано на рис. 26.

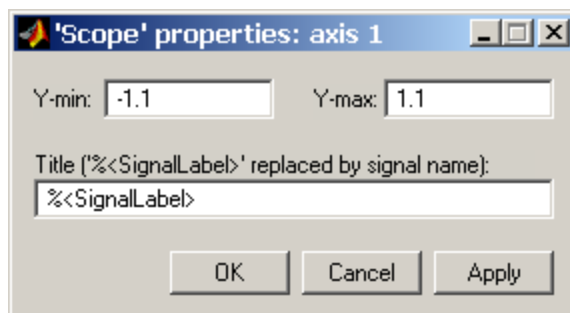



Рис. 26. Окно свойств графика.

Параметры:

Параметры блока устанавливаются в окне 'Scope' parameters, которое открывается с помощью инструмента  (Parameters) панели инструментов. Окно параметров имеет две вкладки:

General – общие параметры.

Data history – параметры сохранения сигналов в рабочей области MATLAB.

Вкладка общих параметров показана на рис. рис. 27.

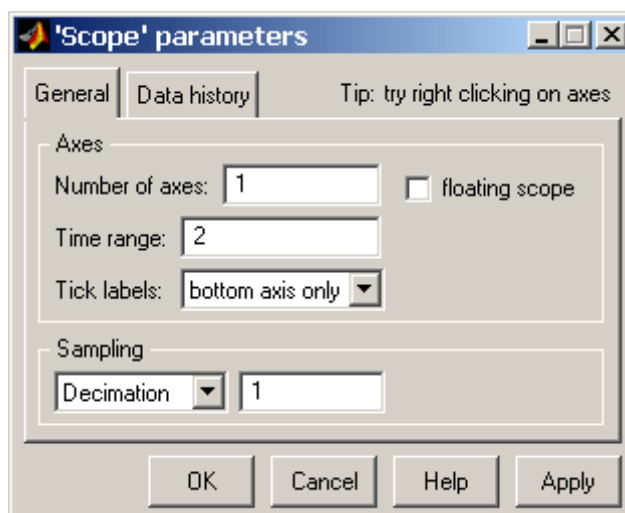


Рис. 27. Вкладка общих параметров General.

На вкладке General задаются следующие параметры:

1. Number of axes — число входов (систем координат) осциллографа. При изменении этого параметра на изображении блока появляются дополнительные входные порты.
2. Time range — величина временного интервала для которого отображаются графики. Если время расчета модели превышает заданное параметром Time range,

то вывод графика производится порциями, при этом интервал отображения каждой порции графика равен заданному значению Time range.

3. Tick labels — вывод/скрытие осей и меток осей. Может принимать три значения (выбираются из списка):

- all – подписи для всех осей,
- none – отсутствие всех осей и подписей к ним,
- bottom axis only – подписи горизонтальной оси только для нижнего графика.

4. Sampling — установка параметров вывода графиков в окне. Задает режим вывода расчетных точек на экран.

5. Floating scope – перевод осциллографа в “свободный” режим (при установленном флажке).

5.9.2.2. Графопостроитель XY Graph

Назначение:

Строит график одного сигнала в функции другого (график вида $Y(X)$).

Параметры:

x-min – минимальное значение сигнала по оси **X**.

x-max – максимальное значение сигнала по оси **X**.

y-min – минимальное значение сигнала по оси **Y**.

y-max – максимальное значение сигнала по оси **Y**.

Sample time – шаг модельного времени.

Блок имеет два входа. Верхний вход предназначен для подачи сигнала, который является аргументом (**X**), нижний – для подачи значений функции (**Y**).

На рис. 28, в качестве примера использования графопостроителя, показано построение фазовой траектории колебательного звена.

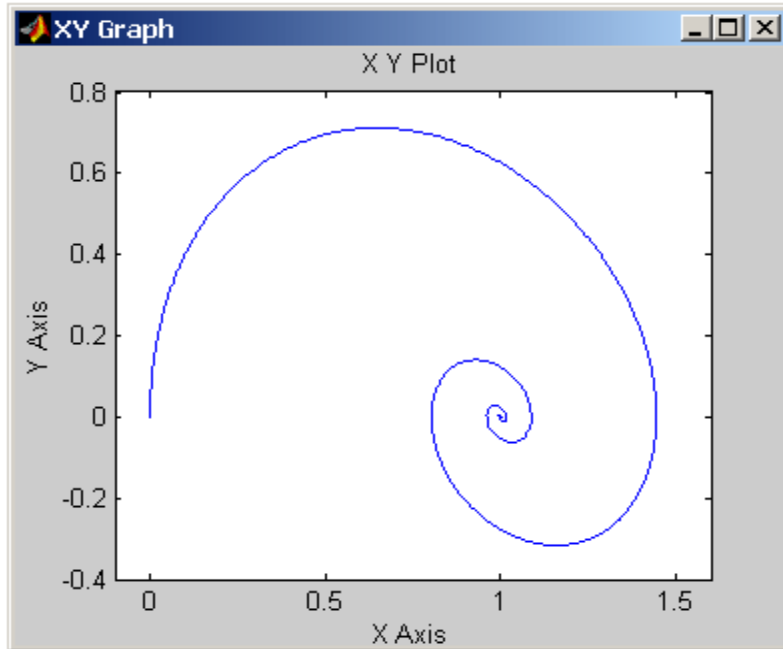
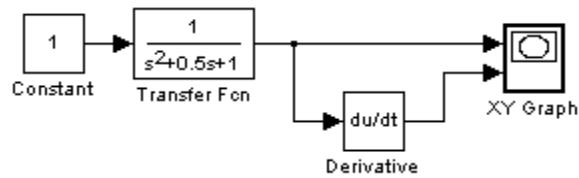


Рис. 28. Пример использования графопостроителя **XY Graph**

5.9.3 Connectors - соединители

5.9.3.1. Заземление

Пиктограмма:

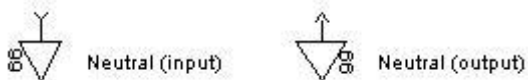


Назначение:

Обеспечивает соединение с землей.

5.9.3.2. Нейтраль

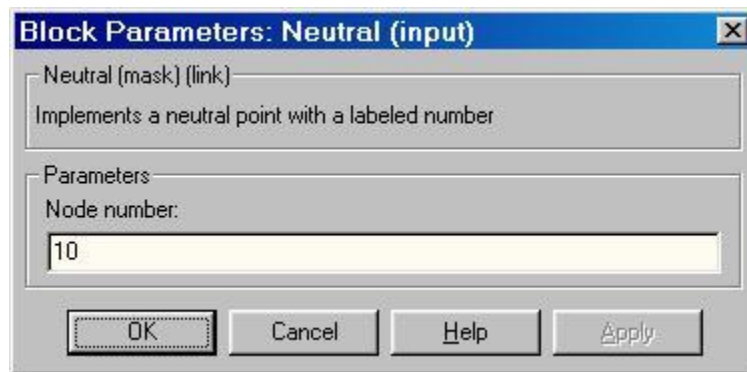
Пиктограмма:



Назначение:

Обеспечивает электрическое соединение между блоками с одинаковыми номерами узлов.

Окно задания параметров:



Параметры блока:

Node number – номер узла.

Блок позволяет соединить между собой далеко отстоящие на схеме электрические узлы без видимых линий связи (проводов). Блок с номером узла равным нулю обеспечивает соединение с землей. Для удобства работы в библиотеке представлены два варианта блока со входным портом - Neutral (input) и с выходным - Neutral (output).

Пример:

На рис. 29 показана схема, использующая блоки Neutral. Два блока с номером узла 10 электрически связаны между собой. Блок Neutral с нулевым номером обеспечивает связь с землей.

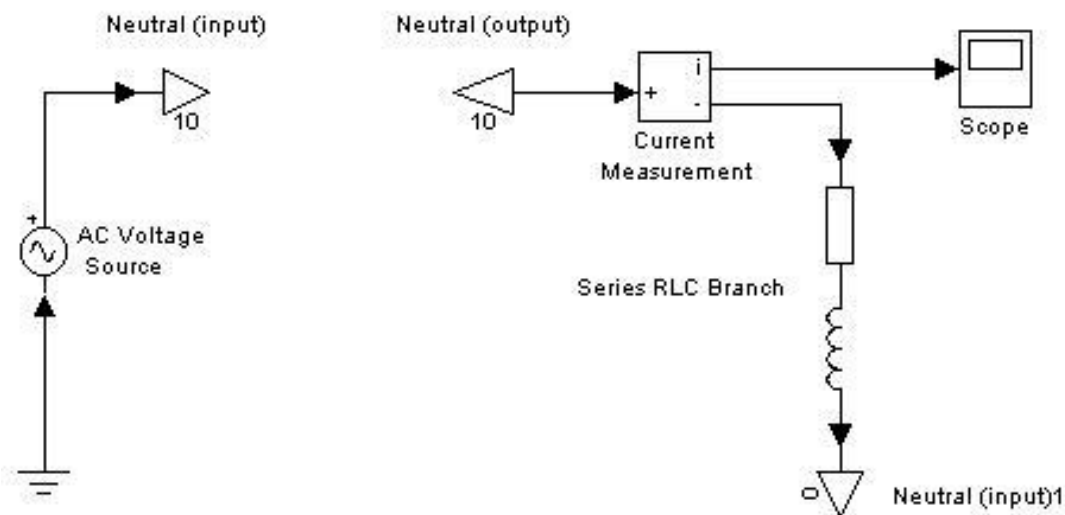


Рис. 29.

5.9.3.3. L-образный соединитель

Пиктограмма:



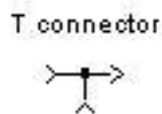
L connector

Назначение:

Выполняет соединение двух входящих линий (проводов).

5.9.3.4. Т-образный соединитель

Пиктограмма:

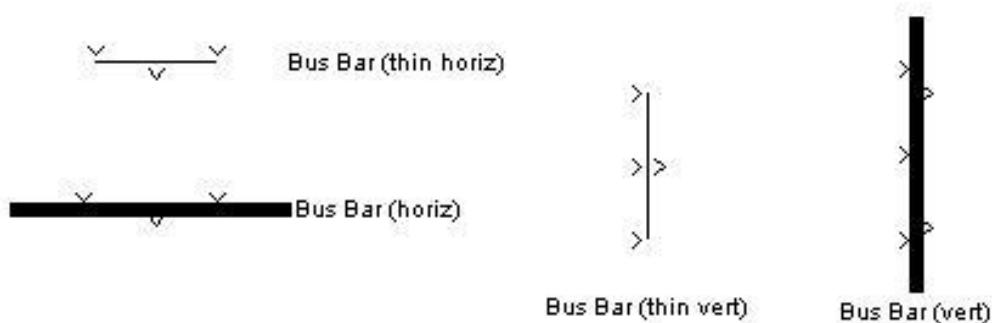


Назначение:

Выполняет объединение двух входящих линий в одну.

5.9.3.5. Шина

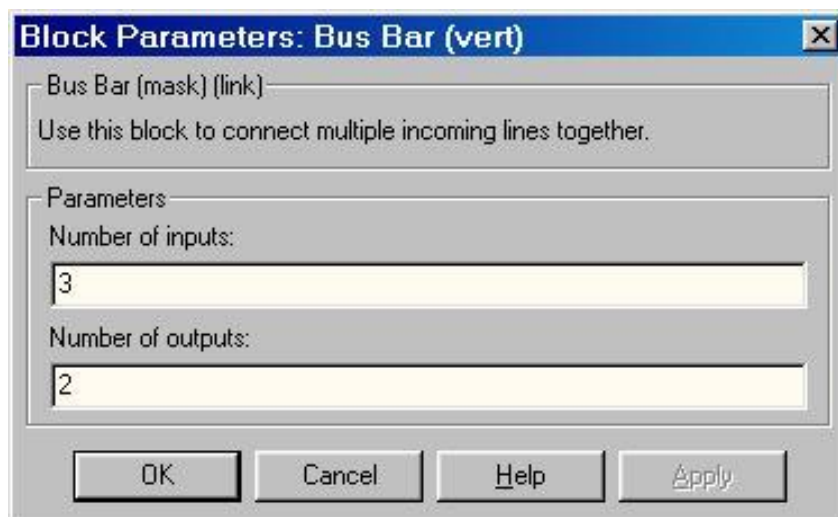
Пиктограмма:



Назначение:

Выполняет объединение нескольких входящих и выходящих линий связи.

Окно задания параметров:



Параметры блока:

Number of inputs – число входов.

Number of outputs – число выходов.

В библиотеке представлено четыре варианта блока - с горизонтальным и вертикальным расположением, а также с тонким и утолщенным изображением.

Пример:

На рис. 30 показана схема с использованием блока Bus Bar. С помощью данных блоков линия связи сначала разделяется на 3 отдельных линии, к которым подключаются элементы схемы, а затем три линии вновь объединяются в одну.

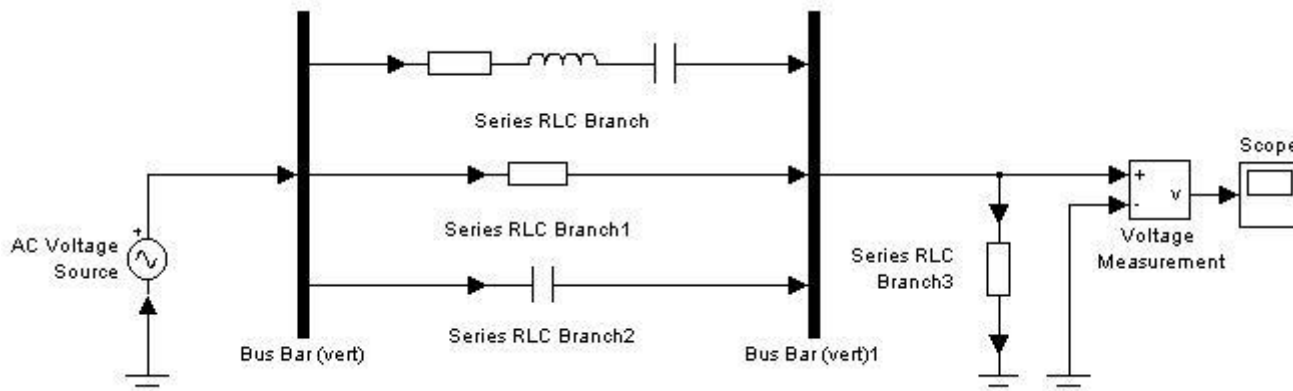
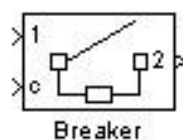


Рис.30.

5.9.3.6. Выключатель переменного тока

Пиктограмма:



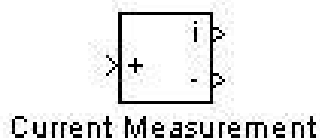
Назначение:

Моделирует устройство включения и выключения цепи переменного тока. Выключатель может управляться внешним входным сигналом или от встроенного таймера. Включение устройства выполняется единичным управляющим сигналом. Команда на выключение дается нулевым уровнем сигнала, при этом выключение устройства осуществляется при уменьшении тока до нуля. Устройство имеет встроенную искрогасящую RC-цепь, включенную параллельно контактам выключателя.

5.9.4 Измерительные и контрольные устройства

5.9.4.1. Измеритель тока

Пиктограмма:



Назначение: Выполняет измерение мгновенного значения тока, протекающего через соединительную линию (провод). Выходным сигналом блока является обычный сигнал Simulink, который может использоваться любым Simulink-блоком.

Пример:

На рис. 31 показана схема, в которой блок Current Measurement используется для измерения тока в последовательном колебательном контуре. Simulink-сигнал, формируемый данным блоком, используется затем для отображения тока на осциллографе. Нулевые начальные условия для расчета схемы задаются с помощью блока Powergui.

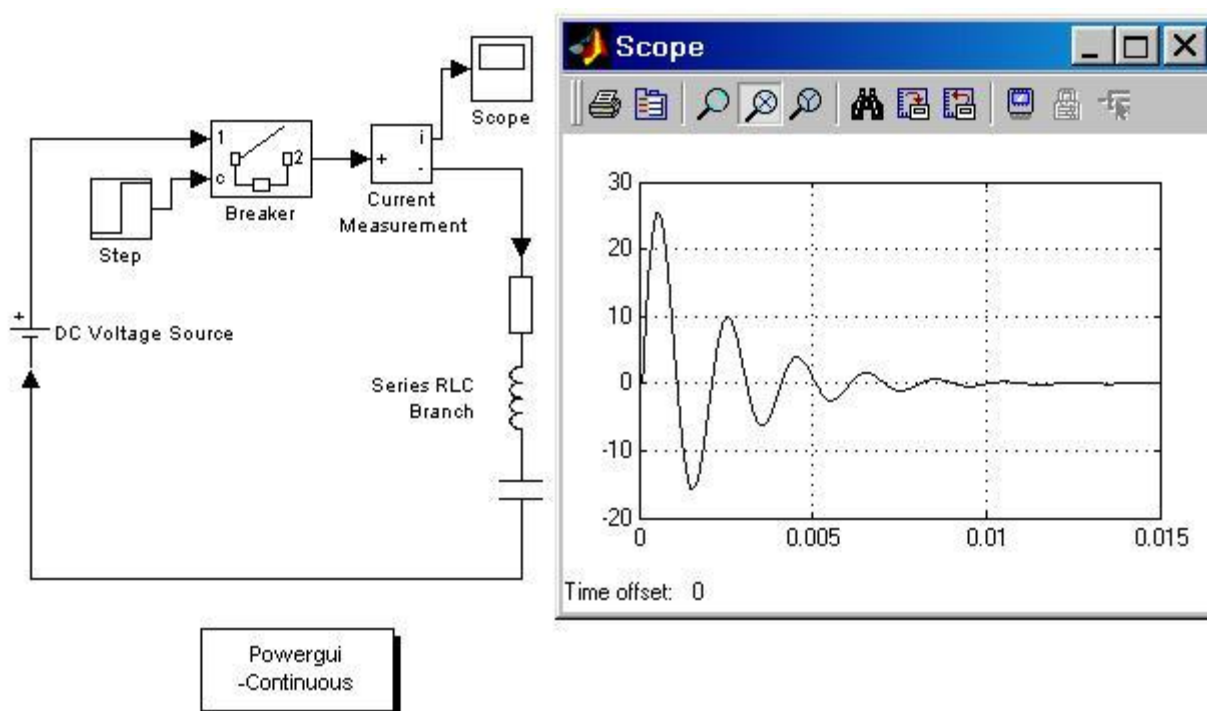
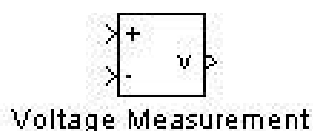


Рис. 31.

5.9.4.2. Измеритель напряжения

Пиктограмма:

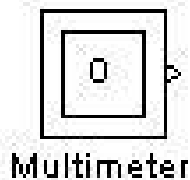


Назначение:

Выполняет измерение мгновенного значения напряжения между двумя узлами схемы. Выходным сигналом блока является обычный сигнал

5.9.4.3. Мультиметр

Пиктограмма:



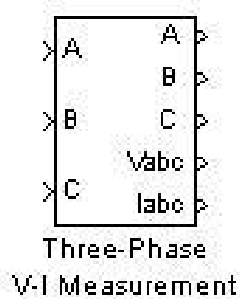
Назначение:

Выполняет измерение токов и напряжений блоков библиотеки SimPowerSystem для которых в их окне диалога установлен параметр Measurements (измеряемые переменные).

Блок может использоваться для измерения напряжений и токов вместо обычных измерителей - Current Measurement и Voltage Measurement.

5.9.4.4. Трехфазный измеритель

Пиктограмма:



Назначение:

Выполняет измерение токов и напряжений в трехфазных цепях.

Пример:

На рис. 32 показана схема включения трехфазного источника напряжения на активно-индуктивную нагрузку.

С помощью блока Three - Phase V - I Measurement измеряются фазные токи и напряжения нагрузки.

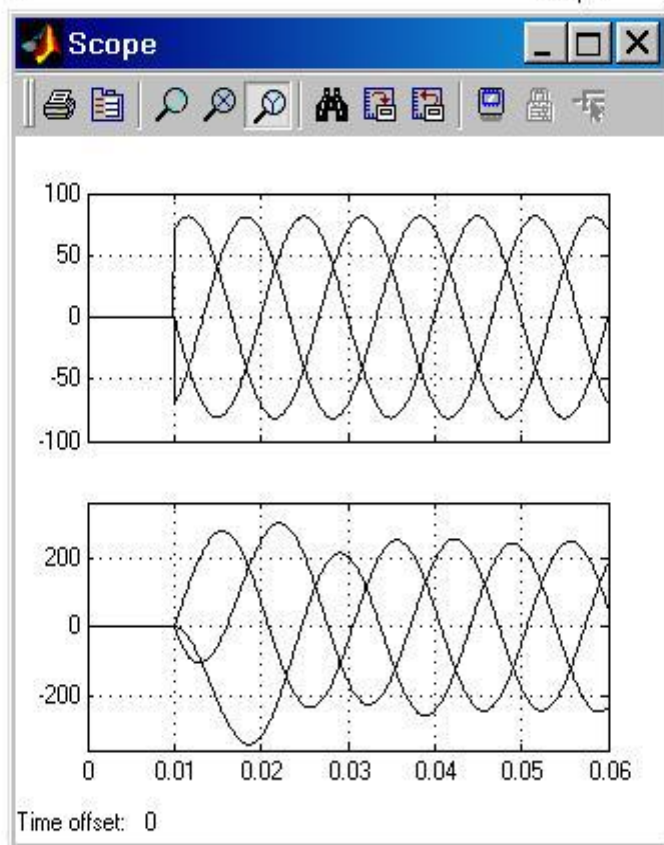
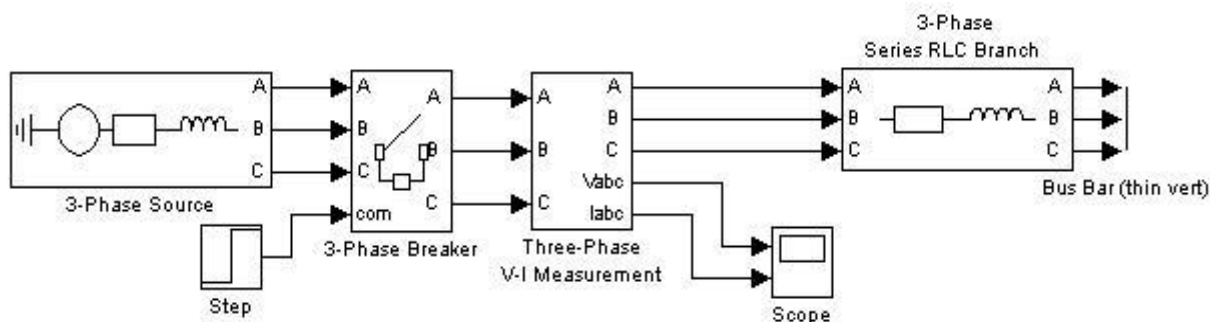
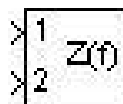


Рис. 32.

5.9.4.5. Измеритель полного сопротивления

Пиктограмма:



Impedance Measurement

Назначение:

Выполняет измерение зависимости полного сопротивления (импеданса) участка электрической цепи от частоты.

5.9.5. Elements - электротехнические элементы

5.9.5.1. Последовательная RLC-цепь

Пиктограмма:



Series RLC Branch

Назначение:

Моделирует последовательное включение резистора, индуктивности и конденсатора.

Окно задания параметров:

Block Parameters: Series RLC Branch

Series RLC Branch (mask) (link)
Implements a series RLC branch.

Parameters

Resistance R (Ohms):
1

Inductance L (H):
1e-03

Capacitance C (F):
1e-06

Measurements: None

OK Cancel Help Apply

Параметры блока:

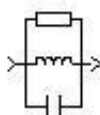
Resistance R (Ohms) – сопротивление (Ом). Величина активного сопротивления. Для исключения резистора из цепи значение сопротивления нужно задать равным нулю. В этом случае на пиктограмме блока резистор отображаться не будет.

Inductance L (H) – индуктивность (Гн). Величина индуктивности.

Capacitance C (F) – емкость (Ф). Величина емкости. Для исключения конденсатора из цепи значение емкости нужно задать равной inf (бесконечность). В этом случае конденсатор на пиктограмме блока показан не будет.

5.9.5.2. Параллельная RLC-цепь

Пиктограмма:

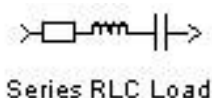


Parallel RLC Branch

Назначение: Моделирует параллельное включение резистора, индуктивности и конденсатора.

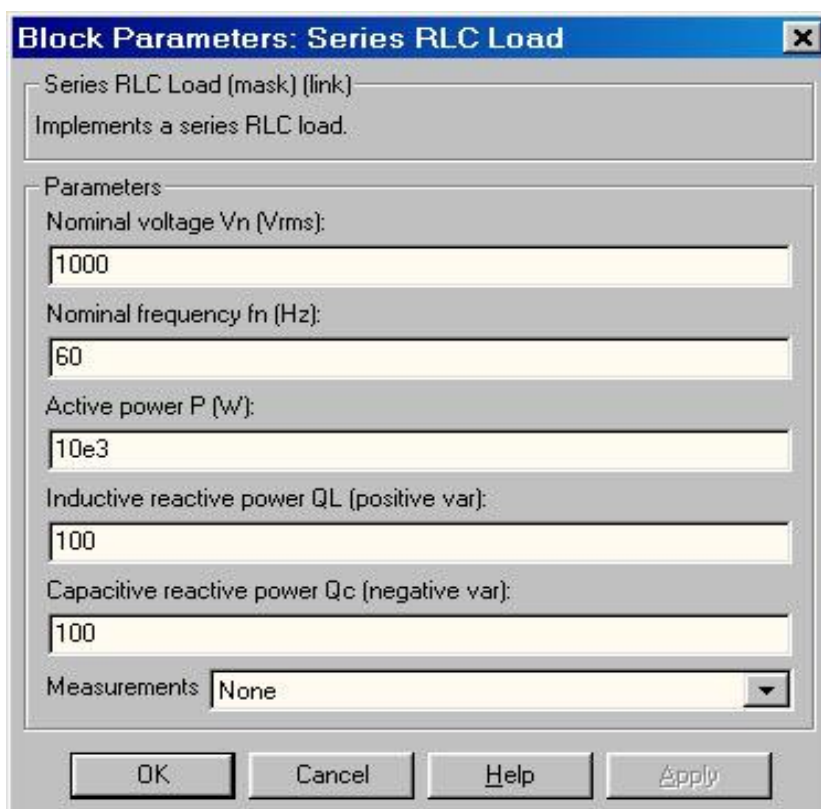
5.9.5.3. Последовательная RLC-нагрузка

Пиктограмма:



Назначение: Моделирует последовательное включение резистора, индуктивности и конденсатора. Параметры цепи задаются через мощности цепи при номинальном напряжении и частоте.

Окно задания параметров:



Параметры блока:

Nominal voltage V_n (Vrms) – номинальное напряжение (В). Значение действующего напряжения цепи, для которого определены мощности элементов.

Nominal frequency f_n (Hz) – номинальная частота (Гц). Значение частоты, для которого определены мощности элементов.

Active power P (W) – активная мощность (Вт).

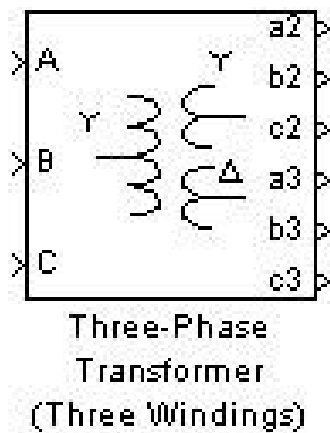
Inductive reactive power Q_L (positive var) – реактивная мощность индуктивности (ВАр)]. Потребляемая индуктивностью реактивная мощность.

Capacitive reactive power Q_C (negative var) – реактивная мощность емкости (ВАр). Отдаваемая конденсатором реактивная мощность. В графе вводится абсолютное значение мощности (без учета знака).

5.9.6. Трансформаторы

5.9.6.1. Трехфазный трехобмоточный трансформатор

Пиктограмма:



Назначение:

Моделирует трехобмоточный трехфазный трансформатор. Модель построена на основе трех однофазных трансформаторов. В модели может учитываться нелинейность характеристики намагничивания материала сердечника.

Окно задания параметров:

Block Parameters: Three-Phase Transformer (T...)

Three-Phase Transformer (Three Windings) (mask) (link)

This block implements a three-phase transformer by using three single-phase transformers. Set the winding connection to 'Yn' when you want to access the neutral point of the Wye (for winding 1 and 3 only).

Parameters

Port Configuration: ABC as input terminals

Nominal power and frequency [Pn(VA) , fn(Hz)]
[250e6 , 60]

Winding 1 (ABC) connection: Y

Winding parameters [V1 Ph-Ph(Vrms) , R1(pu) , L1(pu)]
[735e3 , 0.002 , 0.08]

Winding 2 (abc-2) connection: Y

Winding parameters [V2 Ph-Ph(Vrms) , R2(pu) , L2(pu)]
[315e3 , 0.002 , 0.08]

Winding 3 (abc-3) connection: Delta (D1)

Winding parameters [V3 Ph-Ph(Vrms) , R3(pu) , L3(pu)]
[315e3 , 0.002 , 0.08]

Saturable core

Magnetization resistance Rm(pu):
500

Saturation characteristic (pu) [i1 phi1 ; i2 phi2 ; ...]
[0,0 ; 0.0024,1.2 ; 1.0,1.52]

Simulate hysteresis

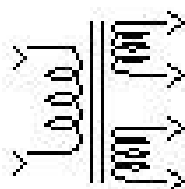
Specify initial fluxes:

Measurements: None

OK Cancel Help Apply

5.9.6.2. Линейный трансформатор

Пиктограмма:



Linear Transformer

Назначение:

Моделирует трех или двух обмоточный однофазный трансформатор. Нелинейность характеристики намагничивания материала сердечника не учитывается. Схема замещения трансформатора показана на рис. 33.

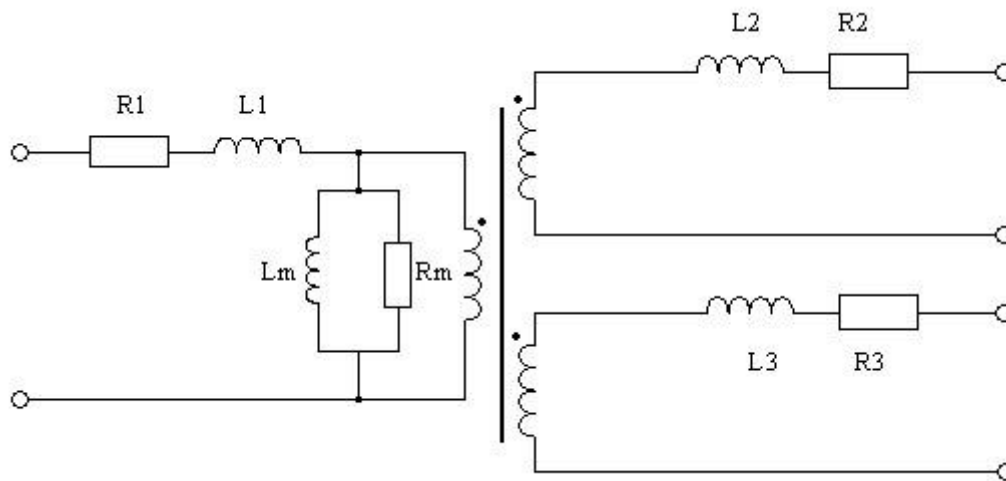


Рис. 33.

Пример:

На рис. 34 показана схема, в которой двухобмоточный линейный трансформатор используется для питания активной нагрузки.

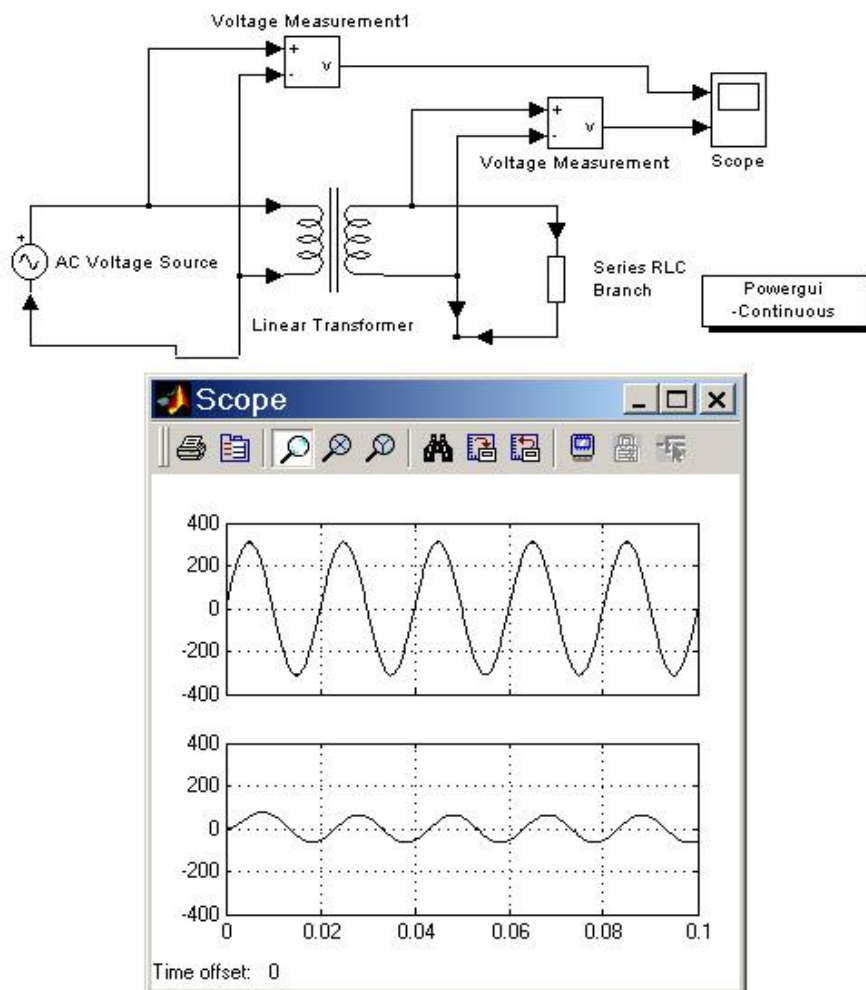
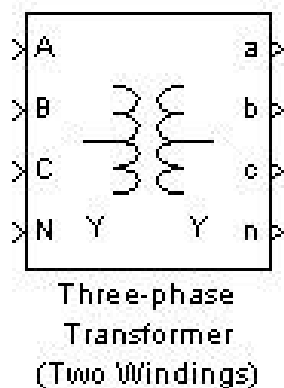


Рис. 34.

5.9.6.3. Трехфазный двухобмоточный трансформатор

Пиктограмма:



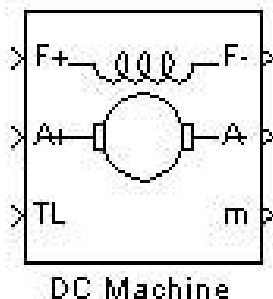
Назначение:

Моделирует двухобмоточный трехфазный трансформатор. Модель построена на основе трех однофазных трансформаторов. В модели может учитываться нелинейность характеристики намагничивания материала сердечника.

5.9.7. Электрические машины

5.9.7.1. Машина постоянного тока

Пиктограмма:



Назначение:

Моделирует электрическую машину постоянного тока

Порты модели A+ и A- являются выводами обмотки якоря машины, а порты F+ и F- представляют собой выводы обмотки возбуждения. Порт TL предназначен для подачи момента сопротивления движению. На выходном потоке m формируется векторный сигнал, состоящий из четырех элементов: скорости, тока якоря, тока возбуждения и электромагнитного момента машины.

Окно задания параметров:

Block Parameters: DC Machine

DC machine (mask) (link)

This block implements a separately excited DC machine. Access is provided to the field connections so that the machine can be used as a shunt-connected or a series-connected DC machine.

Input 1 and output 1 : positive and negative armature terminals
Input 2 and output 2 : positive and negative field terminals
Input 3 : Load torque
Output 3 : Simulink measurement output [w Ia If Te]

Parameters

Armature resistance and inductance [Ra (ohms) La (H)]
[0.6 0.012]

Field resistance and inductance [Rf (ohms) Lf (H)]
[240 120]

Field-armature mutual inductance Laf (H) :
1.8

Total inertia J (kg.m²)
1

Viscous friction coefficient Bm (N.m.s)
0

Coulomb friction torque Tf (N.m)
0

Initial speed (rad/s) :
1

OK Cancel Help Apply

Параметры блока:

Armature resistance and inductance [Ra (ohms) La (H)] – активное сопротивление Ra (Ом) и индуктивность La (Гн) цепи якоря.

Field resistance and inductance [Rf (ohms) Lf (H)] – активное сопротивление Rf (Ом) и индуктивность Lf (Гн) цепи возбуждения.

Field-armature mutual inductance Laf (H) – взаимная индуктивность между цепью якоря и цепью возбуждения двигателя (Гн).

Total inertia J (kg.m²) – момент инерции двигателя J (кг*м²).

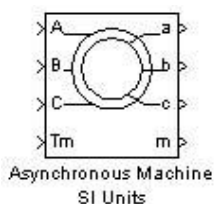
Viscous friction coefficient Bm (N.m.s) – коэффициент вязкого трения Bm (Н*м*s).

Coulomb friction torque Tf (N.m) – реактивный момент сопротивления Tf (Н*м).

Initial speed (rad/s) – начальная угловая скорость вала двигателя (рад/с).

5.9.7.2. Асинхронная машина

Пиктограмма:



Назначение: Моделирует асинхронную электрическую машину в двигательном или генераторном режимах. Режим работы определяется знаком электромагнитного момента машины.

Порты модели A, B и C являются выводами статорной обмотки машины, а порты a, b и c – обмотки ротора машины. Порт Tm предназначен для подачи момента сопротивления движению. На выходном порту m формируется векторный сигнал, состоящий из 21 элемента: токов, потоков и напряжений ротора и статора в неподвижной и вращающейся системах координат, электромагнитного момента, скорости вала, а также его углового положения.

Окно задания параметров:

Block Parameters: Asynchronous Machin... [X]

Asynchronous Machine (mask) (link)

Implements a three-phase asynchronous machine (wound rotor or squirrel cage) modeled in the dq rotor reference frame. Stator and rotor windings are connected in wye to an internal neutral point. Press help for inputs and outputs description.

You can specify initial values for stator and rotor currents. In the Initial conditions parameter you have the possibility to specify the stator current only :

[s() th(deg) isa, isb, isc(p.u.) pha, phb, phc(deg)]:

Or you can choose to enter the stator and the rotor initial currents:

[s() th(deg) isa, isb, isc(p.u.) pha, phb, phc(deg) ira, irb, irc(pu) pha, phb, phc]:

Parameters

Rotor type:

Reference frame:

Nom. power, L-L volt. and freq. [Pn(VA), Vn(Vrms), fn(Hz)]:

[3*746, 220, 60]

Stator [Rs(ohm) Lls(H)]:

[0.435 2.0e-3]

Rotor [Rr'(ohm) Llr'(H)]:

[0.816 2.0e-3]

Mutual inductance Lm (H):

69.31e-3

Inertia, friction factor and pairs of poles [J(kg.m^2) F(N.m.s) p()]:

[0.089 0 2]

Initial conditions (read the details in the description above)

[1.0 0.0,0 0.0,0]

OK Cancel Help Apply

Параметры блока:

Rotor type – тип ротора. Значение параметра выбирается из списка:

- Squirrel-Cage – короткозамкнутый ротор или «беличья клетка»,
- Wound – фазный ротор.

Reference frame – система координат. Значение параметра выбирается из списка:

- Rotor – неподвижная относительно ротора,
- Stationary – неподвижная относительно статора,
- Synchronous – вращающаяся вместе с полем.

Nom. power, L-L volt. and frequency [Pn(VA), Un(V), fn(Hz)] – номинальная мощность Pn (ВА), действующее линейное напряжение Un (В) и номинальная частота fn (Гц).

Stator [Rs(Ohm) Lls(H)] – сопротивление Rs (Ом) и индуктивность Ls (Гн) статора.

Rotor [Rr(Ohm) Llr'(H)] – сопротивление Rs (Ом) индуктивность Ls (Гн) ротора.

Mutual inductance Lm(H) – взаимная индуктивность (Гн).

Inertia, friction factor and pairs of poles [J(kg*m²) F(N*m*s) p] – момент инерции J (кг*м²), коэффициент трения F (Н*м*с) и число пар полюсов p.

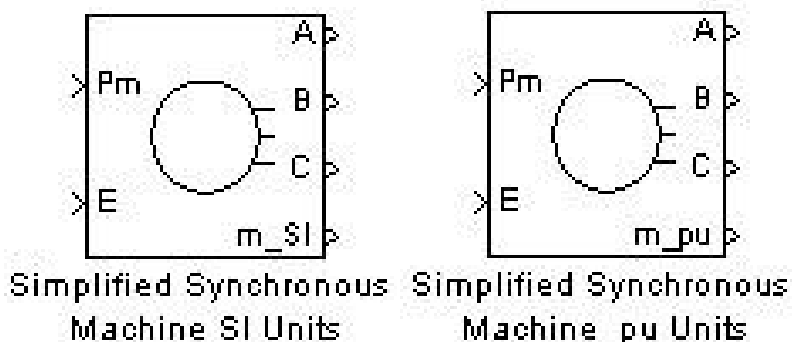
Initial conditions [s, th(deg), isa, sb, isc(A), phA, phB, phC(deg)] – начальные условия].

Параметр задается в виде вектора каждый элемент которого имеет следующие значения:

- s – скольжение,
- th – фаза (град.),
- isa, isb, isc – начальные значения токов статора (А),
- phA, phB, phC – начальные фазы токов статора (град.).

5.9.7.3. Упрощенная модель синхронной машины

Пиктограмма:



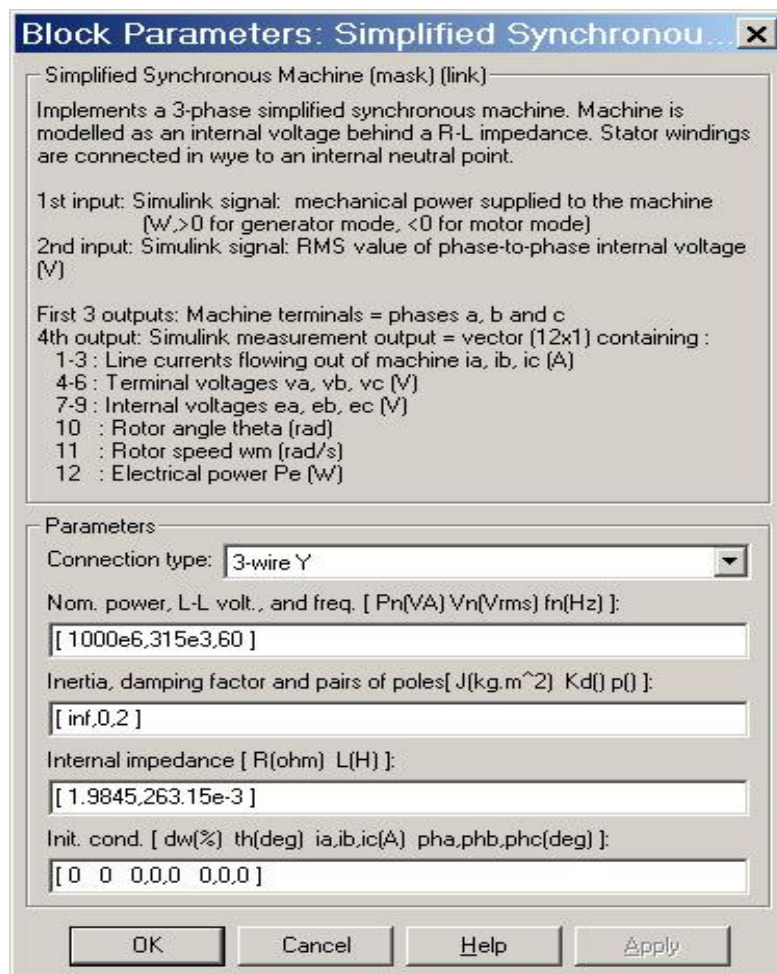
Назначение:

Является упрощенной моделью синхронной машины с неявнополюсным ротором. Модель выполнена в двух вариантах Simplified Synchronous Machine SI Units (параметры машины задаются в системе единиц Си) и Simplified Synchronous Machine pu Units (параметры машины задаются в системе относительных единиц). В зависимости от варианта, входные и выходные переменные машины также измеряются в системе единиц Си или в относительных единицах.

Порты модели A, B и C являются выводами статорной обмотки машины. На выходном порту m_SI (или m_pu) формируется векторный сигнал, состоящий из 12 элементов: токов (isa, isb, isc), напряжений (va, vb, vc) и ЭДС (ea, eb, ec) обмотки статора, углового положения (thetam) и скорости ротора (vm), а также электромагнитная мощность (Pe). Для удобства извлечения переменных машины из выходного вектора измеряемых переменных в библиотеке SimPowerSystems предусмотрен блок Machines Measurement Demux.

Сигнал равный механической мощности на валу машины подается на входной порт Pm, а на входной порт E подается сигнал, задающий действующее значение линейных ЭДС обмотки статора.

Окно задания параметров:



Параметры блока:

Connection type – тип соединения обмотки статора. Значение параметра выбирается из списка:

- 3-wire Y – звезда без нулевого провода,
- 4-wire Y – звезда с нулевым проводом.

Nom. power, L-L volt., and freq. [$P_n(\text{VA})$ $V_n(\text{V}_{\text{rms}})$ $f_n(\text{Hz})$] – номинальная мощность P_n (ВА), действующее линейное напряжение U_n (В) и номинальная частота f_n (Гц).

Inertia, friction factor and pairs of poles [$J(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$ $F(\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s})$ p] – момент инерции J ($\text{кг}\cdot\text{м}^2$), коэффициент трения F ($\text{Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}$) и число пар полюсов p .

Internal impedance [$R(\text{ohm})$, $L(\text{H})$] – активное сопротивление и индуктивность обмотки статора R (Ом) и L (Гн).

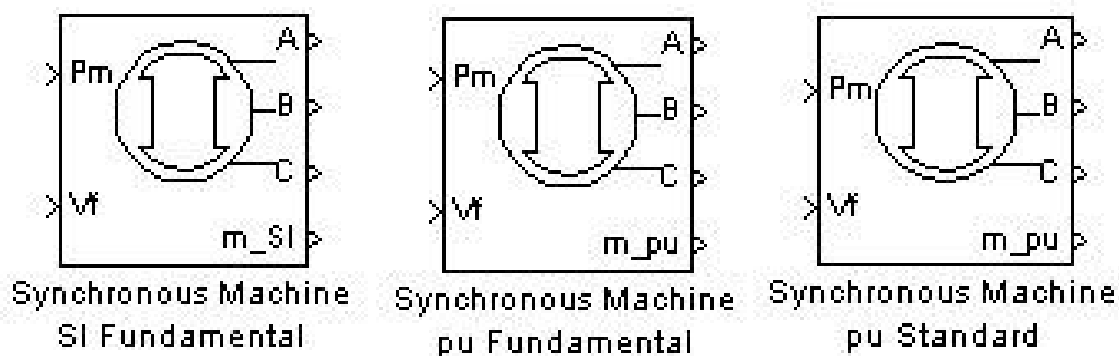
Init. cond. [$d\omega(\%)$, $\theta(\text{deg})$, i_a , i_b , $i_c(\text{A})$, ϕ_a , ϕ_b , $\phi_c(\text{deg})$] – начальные условия.

Параметр задается в виде вектора каждый элемент которого имеет следующие значения:

- $d\omega(\%)$ – отклонение скорости (в %),
- $\theta(\text{deg})$ – угловое положение ротора (град.),
- i_a , i_b , i_c – начальные значения токов статора (А),
- ϕ_a , ϕ_b , ϕ_c – начальные фазы токов статора (град.).

5.9.7.4. Синхронная машина

Пиктограмма:



Назначение:

Является моделью классической синхронной машины с демпферной обмоткой. Модель выполнена в трех вариантах Synchronous Machine SI Fundamental (параметры машины задаются в системе единиц Си), Synchronous Machine pu Fundamental (параметры машины задаются в системе относительных единиц) и Synchronous Machine pu Standard (используются параметры схемы замещения машины в относительных единицах). В зависимости от варианта, входные и

выходные переменные машины также измеряются в системе единиц Си или в относительных единицах.

Порты модели А, В и С являются выводами статорной обмотки машины. На выходном потоку m_SI (или m_pu) формируется векторный сигнал, состоящий из 16 элементов.

Окно задания параметров:

Block Parameters: Synchronous Machine... X

Synchronous Machine (mask) (link)

Implements a 3-phase synchronous machine modelled in the dq rotor reference frame. Stator windings are connected in wye to an internal neutral point. Press help for inputs and outputs description.

Parameters

Rotor type: Salient-pole

Nom. power, volt., freq. and field cur. [Pn(VA) Vn(Vrms) fn(Hz) ifn(A)]:
[187E6 13800 60 1087]

Stator [Rs(ohm) Ll,Lmd,Lmq(H)]:
[2.9069E-03 3.0892E-04 3.2164E-03 9.7153E-04]

Field [Rf(ohm) Llfd'(H)]:
[5.9013E-04 3.0712E-04]

Dampers [Rkd',Llkd' Rkq1',Llkq1'] (R=ohm,L=H):
[1.1900E-02 4.9076E-04 2.0081E-02 1.0365E-03]

Inertia, friction factor and pole pairs [J(kg.m²) F(N.m.s) p()]:
[3.895e6 0 20]

Init. cond. [dw(%) th(deg) ia,ib,ic(A) pha,phb,phc(deg) Vf(V)]:
[0 0 0 0 0 0 0 0 70.3192]

Simulate saturation

Display Vfd which produces nominal Vt

OK Cancel Help Apply

Параметры блока:

Rotor type – тип ротора. Выбирается из списка:

- Salient-pole – явнополюсный ротор,
- Round – неявнополюсный ротор.

Nom. power, volt., freq. and field cur. [$P_n(VA)$ $V_n(V_{rms})$ $f_n(Hz)$ $if_n(A)$] – номинальные полная мощность P_n (ВА), действующее линейное напряжение V_n (В), частота f_n (Гц), ток возбуждения if_n (А).

Stator [$R_s(ohm)$ $L_l, L_{md}, L_{mq}(H)$] – параметры статора: активное сопротивление R_s (Ом), индуктивность рассеяния L_l (Гн), индуктивность по продольной оси L_{md} (Гн), индуктивность по поперечной оси L_{mq} (Гн).

Field [$R_f'(ohm)$ $L_{fd}'(H)$] – приведенные параметры обмотки возбуждения ротора: сопротивление R_f' (Ом) и индуктивность L_{fd}' (Гн)].

Dampers [R_{kd}' , L_{kd}' R_{kq1}' , L_{kq1}' , R_{kq2}' , L_{kq2}'] ($R=ohm, L=H$) – приведенные параметры демпферной обмотки: сопротивление (Ом) и индуктивность (Гн) по продольной и поперечной осям.

Inertia, friction factor and pole pairs [$J(kg.m^2)$ $F(N.m.s)$ $p()$] – момент инерции J ($кг*м^2$), коэффициент трения F ($Н*м*с$) и число пар полюсов p .

Init. cond. [$dw(\%)$, $th(deg)$, ia , ib , $ic(A)$, pha , phb , $phc(deg)$, $V_f(V)$] – начальные условия. Параметр задается в виде вектора каждый элемент которого имеет следующие значения:

- $dw(\%)$ – отклонение скорости (в %),
- $th(deg)$ – угловое положение ротора (град.),
- ia , ib , ic – начальные значения токов статора (А),
- phA , phB , phC – начальные фазы токов статора (град.),
- V_f – напряжение обмотки возбуждения (В).

Simulate saturation – моделировать насыщение. При установленном флажке появляется дополнительное поле Saturation parameters.

Пример:

На рис. 35 показана схема, в которой синхронная машина работает в двигательном режиме. На рисунке приведены графики тока действующего значения статора i_s , скорости вращения вала N , угла нагрузки δ и активной мощности машины P_{eo} .

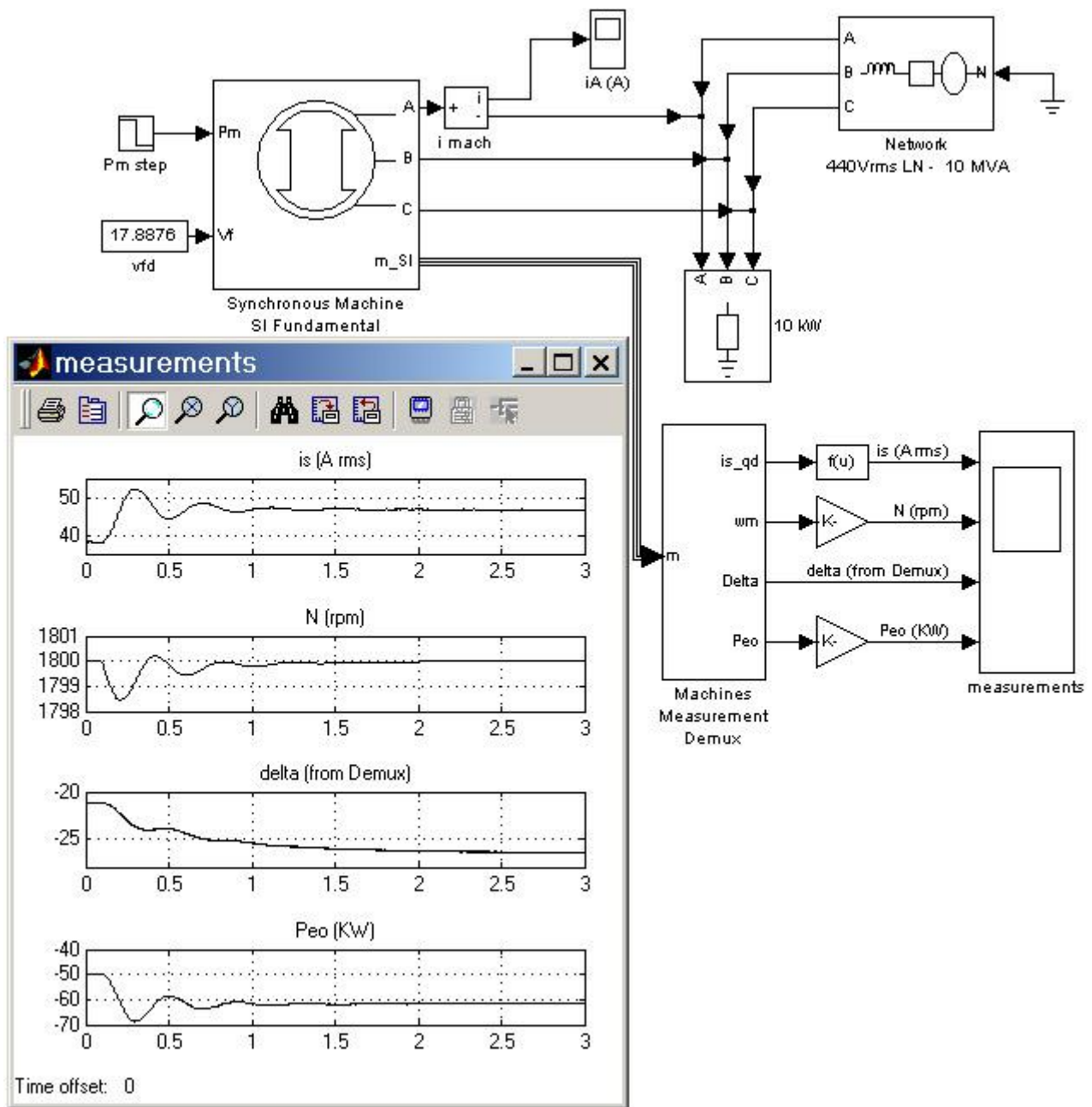
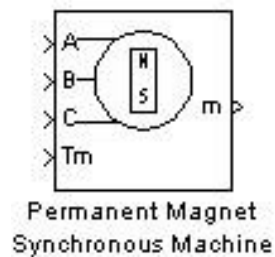


Рис. 35.

5.9.7.5. Синхронная машина с постоянными магнитами

Пиктограмма:

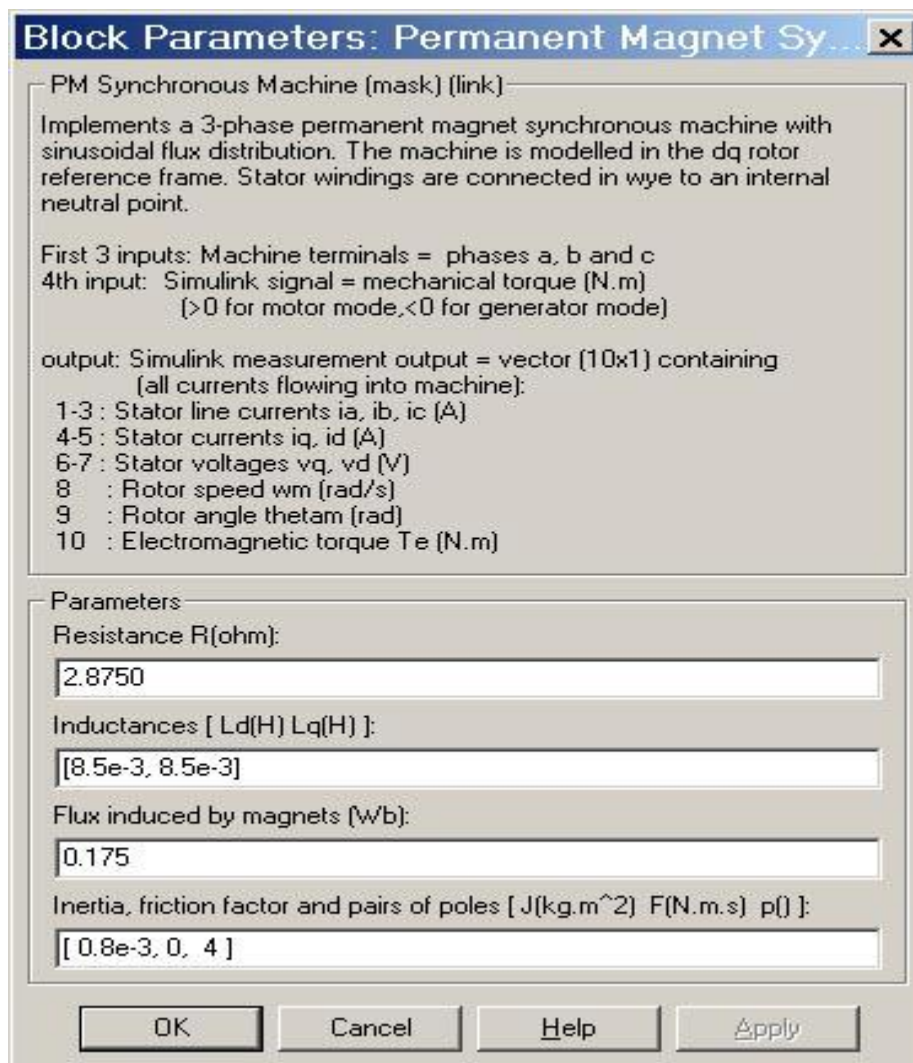


Назначение:

Является моделью классической синхронной машины с постоянными магнитами. В модели не учитывается насыщение магнитной цепи, поскольку такие машины имеют,

как правило, повышенный воздушный зазор. Порты модели А, В и С являются выводами статорной обмотки машины. Входной порт Тm служит для задания момента сопротивления. На выходном порту m формируется векторный сигнал, состоящий из 10 элементов.

Окно задания параметров:



Параметры блока:

Resistance R(ohm) – активное сопротивление статора R (Ом).

Inductances [Ld(H) Lq(H)] – индуктивности статора по продольной и поперечной оси Ld(Ом) и Lq(Ом).

Flux induced by magnets (Wb) – поток возбуждения (Вб).

Inertia, friction factor and pairs of poles [J(kg.m²) F(N.m.s) p()]– момент инерции J (кг*м²), коэффициент трения F (Н*м*с) и число пар полюсов p.

Пример: На рис. 36 показана схема, в которой используется модель синхронной машины с постоянными магнитами в двигательном режиме. Там же приведены

диаграммы токов обмотки статора, скорости и электромагнитного момента при пуске и последующем набросе нагрузки.

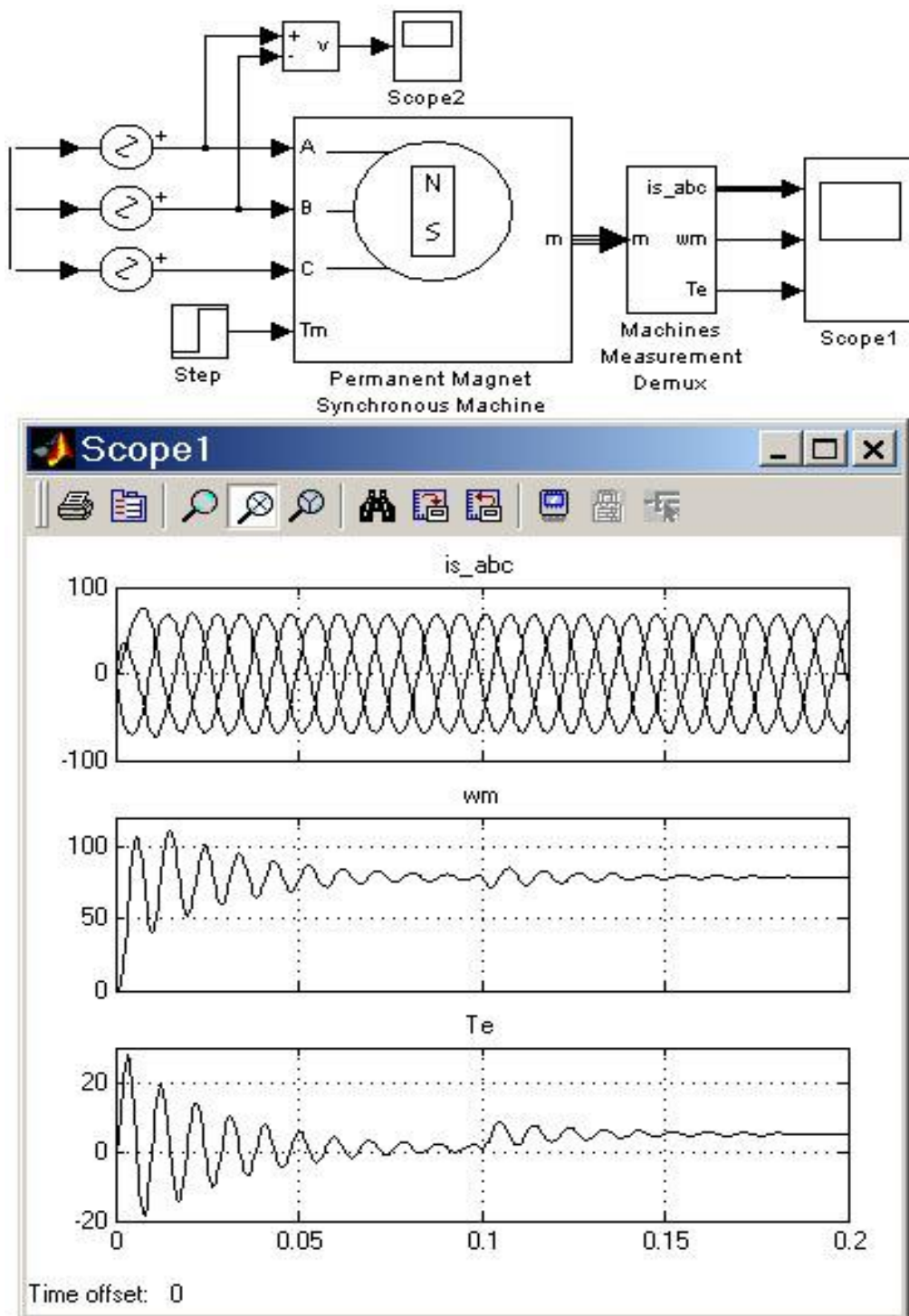


Рис. 36

5.10. Цель практического занятия

Приобретение навыков моделирования электромеханических процессов при проведении лабораторных работ на персональном компьютере с использованием программы MATLAB.

5.11. Порядок выполнения практического задания с использованием программы MATLAB

1. Ознакомиться с кратким описанием основных библиотек виртуальных блоков, используемых при моделировании электромеханических систем.
2. Запустить пакет MATLAB, затем программу Simulink.
3. Выделить основную библиотеку Simulink Library Browser. Поочередно открыть окна разделов библиотеки Simulink: Continuous (линейные блоки), Discrete (дискретные блоки), Functions & Tables (функции и таблицы), Math (блоки математических операций), Nonlinear (нелинейные блоки), Signals & Systems (сигналы и системы), Sinks (регистрирующие устройства), Sources (источники сигналов и воздействий), Subsystems (блоки подсистем). Ознакомиться с элементами разделов, их назначением, условными обозначениями и параметрами, характеризующими эти элементы.
4. Создать новый файл модели, с помощью команды используя кнопку  на панели инструментов. Расположить произвольные блоки в окне модели, но так, чтобы в окне оказались: источник электрической энергии, блок измерения, RLC-цепь, электрическая машина.
5. Выполнить соединения между блоками (см.п. 5.7.6). Поработать с выбранными блоками: добавить текст надписи (см.п. 5.7.1), выполнить копирование, удаление и перемещение объектов (см.п.п. 5.7.2, 5.7.3, 5.7.4, 5.7.5), изменить размеры блоков (см.п. 5.7.7), выполнить форматирование объектов (см.п. 5.7.10).
6. Запустить созданную Simulink–модель (S–модель) на исполнение, наблюдать результаты моделирования. Результаты моделирования показать преподавателю.
7. Для отдельных объектов открыть окна задания параметров, изменить параметры объектов и, вновь запустить S–модель на исполнение. Сравнить результаты моделирования с результатами, полученными при моделировании по п. 5.6.
8. Сохранить модель в файле, закрыть окно модели, окно обозревателя библиотек, а также основное окно пакета MATLAB.

5.12. Контрольные вопросы к практическому занятию по использованию программы MATLAB для моделирования электромеханических процессов в электроприводе

1. Что такое MATLAB и Simulink?
2. Как запустить программу Simulink? Продемонстрировать это действие на компьютере.
3. Пояснить назначение элементов окна обозревателя разделов библиотеки Simulink.
4. Перечислить основные разделы библиотеки Simulink. Открыть на компьютере один из разделов, дать краткую характеристику объектов раздела.
5. Пояснить назначение кнопок на панели инструментов обозревателя разделов библиотек.
6. Пояснить порядок создания нового файла S-модели. Продемонстрировать это действие на компьютере.
7. Как расположить блоки в окне S-модели? Продемонстрировать это действие на компьютере.
8. Как выполнить удаления блока S-модели? Продемонстрировать это действие на компьютере.
9. Как выполнить изменения размеров блока S-модели? Продемонстрировать это действие на компьютере.
10. Как изменить параметры блока S-модели? Продемонстрировать это действие на компьютере.
11. Как выполнить соединение элементов схемы S-модели? Продемонстрировать это действие на компьютере.
12. Пояснить назначение кнопок на панели инструментов окна S-модели.
13. Как выполнить текстовые надписи над объектами S-модели? Продемонстрировать это действие на компьютере.
14. Как выполнить выделение элемента S-модели и изменить его размеры? Продемонстрировать это действие на компьютере.
15. Как выполнить копирование, перемещение и удаление объектов схемы S-модели? Продемонстрировать это действие на компьютере.
16. Что можно выполнить при форматировании объектов S-модели при изменении отображения надписей? Продемонстрировать это действие на компьютере.

17. Что можно выполнить при форматировании объектов S-модели при изменении цветов отображения блоков? Продемонстрировать это действие на компьютере.

18. Что можно выполнить при форматировании объектов S-модели при изменении положения блока и его вида? Продемонстрировать это действие на компьютере.

19. Как выполнить завершение работы по окончании моделирования в приложении Simulink?

20. Пояснить назначение и параметры источника постоянного сигнала из библиотеки блоков Simulink. Поместить этот блок в окне S-модели, открыть окно задания параметров этого блока. Пояснить задаваемые параметры.

21. Пояснить назначение и параметры источника синусоидального сигнала Sine Wave из библиотеки блоков Simulink. Поместить этот блок в окне S-модели, открыть окно задания параметров этого блока. Пояснить задаваемые параметры.

22. Пояснить назначение и параметры генератора ступенчатого сигнала Step из библиотеки блоков Simulink. Поместить этот блок в окне S-модели, открыть окно задания параметров этого блока. Пояснить задаваемые параметры.

23. Пояснить назначение и параметры осциллографа Scope из библиотеки блоков Simulink. Поместить этот блок в окне S-модели, открыть окно задания параметров этого блока. Пояснить задаваемые параметры.

24. Пояснить назначение и параметры шины из библиотеки блоков Simulink. Поместить этот блок в окне S-модели, открыть окно задания параметров этого блока. Пояснить задаваемые параметры.

25. Пояснить назначение и параметры выключателя переменного тока из библиотеки блоков Simulink. Поместить этот блок в окне S-модели, открыть окно задания параметров этого блока. Пояснить задаваемые параметры.

26. Пояснить назначение и параметры измерителя тока из библиотеки блоков Simulink. Поместить этот блок в окне S-модели, открыть окно задания параметров этого блока. Пояснить задаваемые параметры.

27. Пояснить назначение и параметры измерителя напряжения из библиотеки блоков Simulink. Поместить этот блок в окне S-модели, открыть окно задания параметров этого блока. Пояснить задаваемые параметры.

28. Пояснить назначение и параметры мультиметра из библиотеки блоков Simulink. Поместить этот блок в окне S-модели, открыть окно задания параметров этого блока. Пояснить задаваемые параметры.

29. Пояснить назначение и параметры трехфазного измерителя из библиотеки блоков Simulink. Поместить этот блок в окне S-модели, открыть окно задания параметров этого блока. Пояснить задаваемые параметры.

30. Пояснить назначение и параметры последовательной RLC-цепи из библиотеки блоков Simulink. Поместить этот блок в окне S-модели, открыть окно задания параметров этого блока. Пояснить задаваемые параметры.

31. Пояснить назначение и параметры паралельной RLC-цепи из библиотеки блоков Simulink. Поместить этот блок в окне S-модели, открыть окно задания параметров этого блока. Пояснить задаваемые параметры.

32. Пояснить назначение и параметры последовательной RLC-нагрузки из библиотеки блоков Simulink. Поместить этот блок в окне S-модели, открыть окно задания параметров этого блока. Пояснить задаваемые параметры.

33. Пояснить назначение и параметры трехфазного трехобмоточного трансформатора из библиотеки блоков Simulink. Поместить этот блок в окне S-модели, открыть окно задания параметров этого блока. Пояснить задаваемые параметры.

34. Пояснить назначение и параметры линейного трансформатора из библиотеки блоков Simulink. Поместить этот блок в окне S-модели, открыть окно задания параметров этого блока. Пояснить задаваемые параметры.

35. Пояснить назначение и параметры трехфазного двухобмоточного трансформатора из библиотеки блоков Simulink. Поместить этот блок в окне S-модели, открыть окно задания параметров этого блока. Пояснить задаваемые параметры.

36. Пояснить назначение и параметры машины постоянного тока из библиотеки блоков Simulink. Поместить этот блок в окне S-модели, открыть окно задания параметров этого блока. Пояснить задаваемые параметры.

37. Пояснить назначение и параметры асинхронной машины из библиотеки блоков Simulink. Поместить этот блок в окне S-модели, открыть окно задания параметров этого блока. Пояснить задаваемые параметры.

38. Пояснить назначение и параметры синхронной машины с постоянными магнитами из библиотеки блоков Simulink. Поместить этот блок в окне S-модели, открыть окно задания параметров этого блока. Пояснить задаваемые параметры.

39. Пояснить назначение и параметры классической синхронной машины из библиотеки блоков Simulink. Поместить этот блок в окне S-модели, открыть окно задания параметров этого блока. Пояснить задаваемые параметры.

6. Контрольные вопросы для самостоятельного изучения разделов дисциплины «Электрический привод»

1. Что такое электропривод? Дать определение, привести примеры.
2. Какие функции выполняет автоматизированный электропривод (АЭП)?
3. Разобрать структурную схему АЭП.
4. Какую роль в АЭП выполняет электромеханический преобразователь?
5. Определить основные критерии выбора электродвигателя для работы в составе АЭП.
6. Пояснить принцип действия асинхронного двигателя, почему он так называется.
7. В каких случаях преимущественно применяются асинхронные двигатели в качестве приводных.
8. Назовите два основных вида асинхронных двигателей.
9. Пояснить физический смысл КПД для электропривода.
10. Пояснить физический смысл коэффициента мощности для электропривода.
11. Привести и пояснить формулу для расчета номинального тока двигателя переменного тока по номинальным параметрам двигателя.
12. Какие бывают классы изоляции электрических машин. Какой из них имеет наименьшую и наибольшую допустимую температуру нагрева.
13. Какие наиболее распространенные классы изоляции для обмоток электрических двигателей.
14. Какая температура окружающей среды принята за стандартную.
15. Пояснить понятие "самовентиляция двигателя".
16. Привести пример и пояснить нагрузочную диаграмму привода.
17. Перечислить основные критерии выбора мощности электрического двигателя.
18. Нарисовать механическую характеристику асинхронного двигателя, указать на ней критический момент.
19. Дать краткую характеристику трехфазного асинхронного двигателя серии 4А по условному обозначению 4 АС 160 М 6 УЗ.
20. В чем особенность работы крановых двигателей.
21. Дать краткую характеристику кранового двигателя серии 4МТ по условному обозначению 4 МТКФ 100 М4Т1.

22. Определить классификацию типовых режимов работы электродвигателей.
23. Нарисовать и пояснить нагрузочную диаграмму продолжительного режима работы электрического двигателя.
24. Нарисовать и пояснить нагрузочную диаграмму кратковременного режима работы электрического двигателя.
25. Нарисовать и пояснить нагрузочную диаграмму повторно-кратковременного режима работы электрического двигателя.
26. Пояснить проверку двигателя по условиям нагревания методом средних потерь.
27. Пояснить проверку двигателя по условиям нагревания методом эквивалентного тока.
28. Пояснить понятие перегрузочной способности двигателя.
29. Пояснить метод выбора асинхронного двигателя по диаграмме моментов, используя эквивалентный момент.
30. Пояснить метод выбора асинхронного двигателя по диаграмме моментов, используя эквивалентную мощность.
31. Пояснить особенности выбора мощности двигателя при кратковременном режиме работы.
32. Пояснить особенности выбора мощности двигателя при повторно-кратковременном режиме работы.
33. Пояснить понятие относительной продолжительности включения.
34. Перечислить нормированные продолжительности включения для двигателей постоянного тока и асинхронных двигателей с фазным ротором.
35. Перечислить нормированные продолжительности включения для асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором.
36. Как поступают, если фактическая продолжительность включения отличается от нормированной.
37. Привести и пояснить формулу для расчета номинальных потерь активной мощности электрического двигателя.
38. Что такое допустимое число включений в час?
39. Объяснить, почему именно асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором необходимо рассчитывать на допустимое число включений.
40. Нарисовать и разобрать тахограмму рабочего цикла АД.
41. На чем основан расчет допустимого числа включений?

42. Какой режим работы электродвигателя называется номинальным?
43. Почему ухудшаются условия охлаждения электродвигателя при уменьшении его частоты вращения?
44. По какой причине при пуске АД возникает его повышенный нагрев?
45. Из каких составляющих складывается суммарная энергия, отдаваемая АД в окружающую среду?
46. Из каких составляющих складывается суммарная энергия, выделяемая АД за один цикл работы?
47. Что такое электродинамическое торможение?
48. Как осуществляется торможение противовключением?
49. Какой режим работы АЭП называется установившимся?
50. Какой режим работы АЭП называется переходным или неустановившимся?
51. Что такое коэффициент нагрузки АД?
52. Дать понятие момента инерции АЭП, приведенного к валу электродвигателя. По какому принципу осуществляется приведение.
53. Дать понятие момента нагрузки АЭП, приведенного к валу электродвигателя. По какому принципу осуществляется приведение.
54. Что такое синхронная угловая частота вращения АД? Записать формулу, дать необходимые пояснения.
55. Какие потери в электродвигателе называются постоянными, а какие переменными?
56. Что такое критическое скольжение?
57. Записать и объяснить формулу Клосса.
58. Что такое скольжение? Чему оно равно при пуске и торможении противовключением?
59. От чего зависит коэффициент включения АД?
60. Записать и разобрать выражение для определения допустимого числа включений h при полной форме записи.
61. Записать и разобрать выражение для определения допустимого числа включений h при упрощенной форме записи.
62. Записать и разобрать выражение для определения допустимого числа включений h при работе АД в номинальном режиме.
63. Какие мероприятия принимаются для повышения допустимого числа включений АД?

64. Дать определение двигателя единой серии 4АС.
65. В каких режимах применяются АД с повышенным скольжением?
66. Как влияет коэффициент включения АЭП на выбор типоразмера электродвигателя?
67. Как выбирают мощность электродвигателя при учете продолжительности включения АЭП?
68. Объяснить, как и почему влияет увеличение суммарного момента АЭП на допустимое число включений АД.
69. Объяснить, как и почему влияет увеличение коэффициента нагрузки АЭП на допустимое число включений АД.
70. Объяснить, как и почему влияет увеличение коэффициента ухудшения охлаждения на допустимое число включений АД.
71. Перечислить преимущества и недостатки АД с фазным ротором.
72. Перечислить преимущества и недостатки АД с короткозамкнутым ротором.
73. Каким образом в цепь ротора включается добавочное сопротивление?
74. Нарисовать электрическую схему АД с фазным ротором. Указать добавочные сопротивления.
75. Как влияет включение сопротивлений в цепь ротора на вид механических характеристик электродвигателя?
76. Какие характеристики называются искусственными и каким образом их можно получить?
77. Чем отличается АД с фазным ротором с $PВ=40\%$ от АД с $PВ=25\%$?
78. Какой режим работы АЭП и АД принято называть переходным, как влияет включение сопротивлений на характер процесса?
79. Какие параметры резисторов называются номинальными?
80. Какие типы кулачковых контроллеров применяются в АЭП?
81. Какие типы магнитных контроллеров применяются в АЭП?
82. Какие преимущества имеет магнитный контроллер по сравнению с кулачковым?
83. От чего зависит тип применяемого контроллера? Пояснить на примере.
84. Какие типы резисторов применяются в электроприводе?
85. Объяснить конструкцию и характеристики блока БФ6.
86. Объяснить конструкцию и характеристики блока БК12.

87. На чем основан тепловой расчет резисторов при учете реального режима работы АЭП.
88. Что такое расчетный ток резистора и от чего он зависит?
89. Как определяется средняя мощность потерь в резисторах при торможении противотключением? Записать формулу.
90. Как определяется средняя мощность потерь в резисторах при динамическом торможении? Записать формулу.
91. От чего зависит эквивалентный коэффициент полезного действия электропривода?
92. Как определяется величина сопротивления резистора для каждой ступени контроллера?
93. Как определяется расчетное значение тока для каждой ступени контроллера?
94. Какие требования необходимо выполнить при подборе резисторов?
95. Как влияет выбор типа контроллера АЭП на электрическую схему АД?
96. Какой режим работы электропривода называется устойчивым?

7. Список литературы

1. *Г.Б.Онищенко. Электрический привод: учебник для студ. высш. учеб. заведений/ Г.Б.Онищенко. 2-е изд., стер.– М.: Издательский центр «Академия», 2008. –288с.*
2. *Инжиниринг электроприводов и систем автоматизации : учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / М.П.Белов, О.И. Зементов, А.Е. Козярук и др.; под ред. В.А. Новикова, Л.М. Чернигова. – М. : Издательский центр «Академия», 2006. – 368 с.*
3. *Кацман М.М. Справочник по электрическим машинам: Учеб. пособие для студ. образоват. Учреждений сред. проф. образования / – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 480 с.*
4. *С.Г. Герман-Галкин, Г.А. Кардонов "Электрические машины. Лабораторные работы на ПК".- СПб.: КОРОНА принт, 2003. - 256 с.*
5. <http://matlab.exponenta.ru/>

8. Содержание

1. Введение.....	3
2. Выбор асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором для электропривода.....	6
3. Определение допустимой частоты включений асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.....	22
4. Расчет и выбор резисторов для асинхронного двигателя с фазным ротором.....	33
5. Использование программы MATLAB для моделирования электромеханических процессов в электроприводе.....	45
6. Контрольные вопросы для самостоятельного изучения разделов дисциплины «Электрический привод».....	94
7. Список литературы.....	98
8. Содержание.....	99
Приложение 1.....	100
Приложение 2.....	105

·ПРИЛОЖЕНИЕ 1.

Таблица 1.Исходные данные для задачи 1.

Величины	Варианты задания 1														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$M_1, \text{Н} \cdot \text{м}$	10	10	10	10	10	15	15	15	15	15	15	20	20	20	20
$M_2, \text{Н} \cdot \text{м}$	50	45	40	35	30	50	50	50	50	50	55	55	55	55	55
$M_3, \text{Н} \cdot \text{м}$	30	35	40	45	50	25	20	35	35	40	40	45	40	35	40
$t_1, \text{с}$	10	15	15	15	15	15	15	15	15	15	5	5	10	10	15
$t_2, \text{с}$	15	15	15	15	15	10	10	10	10	10	10	10	15	15	15
$t_3, \text{с}$	5	10	10	10	10	5	5	5	5	5	15	20	15	20	25
$t_0, \text{с}$	10	15	15	15	15	20	20	20	20	25	15	15	20	20	25
$n, \text{об/мин}$	735	935	735	935	735	935	735	935	735	935	735	935	735	935	735
k	0,85	0,9	0,85	0,9	0,85	0,9	0,85	0,9	0,85	0,9	0,85	0,9	0,85	0,9	0,85

Продолжение таблицы 1.

Величины	Варианты задачи 1														
	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
$M_1, \text{Н} \cdot \text{м}$	25	25	25	35	35	35	35	40	40	40	45	55	65	65	65
$M_2, \text{Н} \cdot \text{м}$	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
$M_3, \text{Н} \cdot \text{м}$	10	10	15	15	15	20	20	20	25	25	5	5	10	10	15
$t_1, \text{с}$	10	10	10	10	10	10	20	10	20	15	20	20	20	20	20
$t_2, \text{с}$	5	5	5	5	5	10	15	10	15	10	5	5	5	5	5
$t_3, \text{с}$	15	15	15	15	15	20	15	20	15	20	25	25	25	25	25
$t_0, \text{с}$	20	15	10	20	15	15	20	15	20	15	20	25	20	25	20
$n, \text{об/мин}$	935	735	935	735	935	735	935	735	935	735	935	735	935	735	935
k	0,85	0,9	0,85	0,9	0,85	0,9	0,85	0,9	0,85	0,9	0,85	0,9	0,85	0,9	0,85

Таблица 2. Исходные данные для задачи 2.

№ вар-та	Расчетная мощность кВт	n_1 , об/мин	ε , о.е.	J/Д	Мс/Мн	β	Вид торможения
1	1	3000	0,15	1; 2; 3	0,2; 0,5; 0,9	0,2; 0,3; 0,4	Д
2	1,2	3000	0,25	1; 2,5; 4	0,1; 0,7; 0,8	0,2; 0,35; 0,5	П
3	1,1	3000	0,4	2; 3; 5	0,25; 0,6; 0,7	0,3; 0,4; 0,55	Д
4	0,8	3000	0,6	1; 2; 3	0,2; 0,5; 0,9	0,2; 0,3; 0,4	П
5	0,65	1500	0,15	1; 2,5; 4	0,1; 0,7; 0,8	0,2; 0,35; 0,5	Д
6	0,55	1500	0,25	2; 3; 5	0,25; 0,6; 0,7	0,3; 0,4; 0,55	П
7	0,7	1500	0,4	1; 2; 3	0,2; 0,5; 0,9	0,2; 0,3; 0,4	Д
8	0,75	1500	0,6	1; 2,5; 4	0,1; 0,7; 0,8	0,2; 0,35; 0,5	П
9	0,4	1000	0,15	2; 3; 5	0,25; 0,6; 0,7	0,3; 0,4; 0,55	Д
10	0,35	1000	0,25	1; 2; 3	0,2; 0,5; 0,9	0,2; 0,3; 0,4	П
11	0,6	1000	0,4	1; 2,5; 4	0,1; 0,7; 0,8	0,2; 0,35; 0,5	Д
12	0,65	1000	0,6	2; 3; 5	0,25; 0,6; 0,7	0,3; 0,4; 0,55	П
13	0,3	750	0,15	1; 2; 3	0,2; 0,5; 0,9	0,2; 0,3; 0,4	Д
14	0,25	750	0,25	1; 2,5; 4	0,1; 0,7; 0,8	0,2; 0,35; 0,5	П
15	0,4	750	0,4	2; 3; 5	0,25; 0,6; 0,7	0,3; 0,4; 0,55	Д
16	0,45	750	0,6	1; 2; 3	0,2; 0,5; 0,9	0,2; 0,3; 0,4	П
17	1,4	3000	0,15	1; 2,5; 4	0,1; 0,7; 0,8	0,2; 0,35; 0,5	Д
18	1,8	3000	0,25	2; 3; 5	0,25; 0,6; 0,7	0,3; 0,4; 0,55	П
19	2,4	3000	0,4	1; 2; 3	0,2; 0,5; 0,9	0,2; 0,3; 0,4	Д
20	1	3000	0,6	1; 2,5; 4	0,1; 0,7; 0,8	0,2; 0,35; 0,5	П
21	1	1500	0,15	2; 3; 5	0,25; 0,6; 0,7	0,3; 0,4; 0,55	Д
22	0,8	1500	0,25	1; 2; 3	0,2; 0,5; 0,9	0,2; 0,3; 0,4	П
23	1,2	1500	0,4	1; 2,5; 4	0,1; 0,7; 0,8	0,2; 0,35; 0,5	Д
24	1,4	1500	0,6	2; 3; 5	0,25; 0,6; 0,7	0,3; 0,4; 0,55	П
25	1,4	1000	0,15	1; 2; 3	0,2; 0,5; 0,9	0,2; 0,3; 0,4	Д
26	1,2	1000	0,25	1; 2,5; 4	0,1; 0,7; 0,8	0,2; 0,35; 0,5	П
27	1,1	1000	0,4	2; 3; 5	0,25; 0,6; 0,7	0,3; 0,4; 0,55	Д
28	1,25	1000	0,6	1; 2; 3	0,2; 0,5; 0,9	0,2; 0,3; 0,4	П
29	1,3	750	0,15	1; 2,5; 4	0,1; 0,7; 0,8	0,2; 0,35; 0,5	Д
30	1,5	750	0,25	2; 3; 5	0,25; 0,6; 0,7	0,3; 0,4; 0,55	П
31	2	750	0,4	1; 2; 3	0,2; 0,5; 0,9	0,2; 0,3; 0,4	Д
32	2,4	750	0,6	1; 2,5; 4	0,1; 0,7; 0,8	0,2; 0,35; 0,5	П

Продолжение таблицы 2. Исходные данные для задачи 2

№ варианта	Расчетная мощность кВт	n_1 , об/мин	ϵ , о.е.	J/Д	Мс/Мн	β	Вид торможения
33	4,3	3000	0,15	1; 2; 3	0,2; 0,5; 0,9	0,2; 0,3; 0,4	Д
34	4,8	3000	0,25	1; 2,5; 4	0,1; 0,7; 0,8	0,2; 0,35; 0,5	П
35	5,9	3000	0,4	2; 3; 5	0,25; 0,6; 0,7	0,3; 0,4; 0,55	Д
36	5,2	3000	0,6	1; 2; 3	0,2; 0,5; 0,9	0,2; 0,3; 0,4	П
37	3,8	1500	0,15	1; 2,5; 4	0,1; 0,7; 0,8	0,2; 0,35; 0,5	Д
38	4,6	1500	0,25	2; 3; 5	0,25; 0,6; 0,7	0,3; 0,4; 0,55	П
39	10,4	1500	0,4	1; 2; 3	0,2; 0,5; 0,9	0,2; 0,3; 0,4	Д
40	7	1500	0,6	1; 2,5; 4	0,1; 0,7; 0,8	0,2; 0,35; 0,5	П
41	5	1000	0,15	2; 3; 5	0,25; 0,6; 0,7	0,3; 0,4; 0,55	Д
42	7,1	1000	0,25	1; 2; 3	0,2; 0,5; 0,9	0,2; 0,3; 0,4	П
43	8	1000	0,4	1; 2,5; 4	0,1; 0,7; 0,8	0,2; 0,35; 0,5	Д
44	7,2	1000	0,6	2; 3; 5	0,25; 0,6; 0,7	0,3; 0,4; 0,55	П
45	4	750	0,15	1; 2; 3	0,2; 0,5; 0,9	0,2; 0,3; 0,4	Д
46	4,8	750	0,25	1; 2,5; 4	0,1; 0,7; 0,8	0,2; 0,35; 0,5	П
47	11	750	0,4	2; 3; 5	0,25; 0,6; 0,7	0,3; 0,4; 0,55	Д
48	7,3	750	0,6	1; 2; 3	0,2; 0,5; 0,9	0,2; 0,3; 0,4	П
49	7	3000	0,15	1; 2,5; 4	0,1; 0,7; 0,8	0,2; 0,35; 0,5	Д
50	9,1	3000	0,25	2; 3; 5	0,25; 0,6; 0,7	0,3; 0,4; 0,55	П
51	10,1	3000	0,4	1; 2; 3	0,2; 0,5; 0,9	0,2; 0,3; 0,4	Д
52	10	3000	0,6	1; 2,5; 4	0,1; 0,7; 0,8	0,2; 0,35; 0,5	П
53	20,2	1500	0,15	2; 3; 5	0,25; 0,6; 0,7	0,3; 0,4; 0,55	Д
54	12	1500	0,25	1; 2; 3	0,2; 0,5; 0,9	0,2; 0,3; 0,4	П
55	26,5	1500	0,4	1; 2,5; 4	0,1; 0,7; 0,8	0,2; 0,35; 0,5	Д
56	17	1500	0,6	2; 3; 5	0,25; 0,6; 0,7	0,3; 0,4; 0,55	П
57	21	1000	0,15	1; 2; 3	0,2; 0,5; 0,9	0,2; 0,3; 0,4	Д
58	23,2	1000	0,25	1; 2,5; 4	0,1; 0,7; 0,8	0,2; 0,35; 0,5	П
59	17,2	1000	0,4	2; 3; 5	0,25; 0,6; 0,7	0,3; 0,4; 0,55	Д
60	27,3	1000	0,6	1; 2; 3	0,2; 0,5; 0,9	0,2; 0,3; 0,4	П
61	24,1	750	0,15	1; 2,5; 4	0,1; 0,7; 0,8	0,2; 0,35; 0,5	Д
62	28,3	750	0,25	2; 3; 5	0,25; 0,6; 0,7	0,3; 0,4; 0,55	П
63	34	750	0,4	1; 2; 3	0,2; 0,5; 0,9	0,2; 0,3; 0,4	Д
64	27	750	0,6	1; 2,5; 4	0,1; 0,7; 0,8	0,2; 0,35; 0,5	П

Таблица 3. Исходные данные для задачи 3.

№ варианта	P _р , кВт	n _н об/мин	J/J _д , о.е.	M _н /M _с , о.е	Вид тормо-жения	ПВ _н , %	№ варианта	P _р , кВт	n _н об/мин	J/J _д , о.е.	M _н /M _с , о.е	Вид тормо-жения	ПВ _н , %
1	3,4	1200	14	2,2	П	40	31	9,5	840	14	2,2	П	25
2	5,3	1300	11	2,7	Д	40	32	14	860	11	2,7	Д	25
3	7,25	1350	14	2,2	П	40	33	19,5	880	14	2,2	П	25
4	10,3	1300	11	2,7	Д	40	34	27	800	11	2,7	Д	25
5	2	830	14	2,2	П	40	35	6,2	640	14	2,2	П	25
6	2,9	850	11	2,7	Д	40	36	8,5	680	11	2,7	Д	25
7	4,8	840	14	2,2	П	40	37	14,1	660	14	2,2	П	25
8	6,6	860	11	2,7	Д	40	38	19,3	700	11	2,7	Д	25
9	9,7	780	14	2,2	П	40	39	28,1	690	14	2,2	П	25
10	13,8	800	11	2,7	Д	40	40	37,5	680	11	2,7	Д	25
11	20	845	14	2,2	П	40	41	41,5	510	14	2,2	П	25
12	27,5	795	11	2,7	Д	40	42	40	490	11	2,7	Д	25
13	35,5	780	14	2,2	П	40	43	54,5	530	14	2,2	П	25
14	51	880	11	2,7	Д	40	44	3,0	1200	10	2	Д	40
15	103	870	14	2,2	П	40	45	4,7	1300	16	2,6	П	40
16	6,8	650	11	2,7	Д	40	46	6,8	1350	10	2	Д	40
17	9,1	670	14	2,2	П	40	47	9,5	1300	16	2,6	П	40
18	13,7	660	11	2,7	Д	40	48	1,8	830	10	2	Д	40
19	19,5	690	14	2,2	П	40	49	3,4	850	16	2,6	П	40
20	27	660	11	2,7	Д	40	50	5,1	840	10	2	Д	40
21	34,5	630	14	2,2	П	40	51	7,0	860	16	2,6	П	40
22	50	610	11	2,7	Д	40	52	10,3	780	10	2	Д	40
23	71	600	14	2,2	П	40	53	14,2	800	16	2,6	П	40
24	85,3	695	11	2,7	Д	40	54	10	840	10	2	Д	25
25	42	510	14	2,2	П	40	55	14,5	860	16	2,6	П	25
26	56	490	11	2,7	Д	40	56	18	880	10	2	Д	25
27	69	530	14	2,2	П	40	57	25	800	16	2,6	П	25
28	3	850	11	2,7	Д	25	58	5,5	640	10	2	Д	25
29	4,2	830	14	2,2	П	25	59	9,5	680	16	2,6	П	25
30	6,8	810	11	2,7	Д	25	60	13,5	660	10	2	Д	25

Продолжение таблицы 3. Исходные данные для задачи 3.

№ варианта	Р _р , кВт	п об/мин	И/Д, о.е.	М _н /М _с , о.е	Вид тормо- жения	ПВ _н , %	№ варианта	Р _р , кВт	п об/мин	И/Д, о.е.	М _н /М _с , о.е	Вид тормо- жения	ПВ _н , %
61	3,4	1200	13	2,9	Д	40	91	9,5	840	13	2,9	Д	25
62	5,3	1300	15	2,3	П	40	92	14	860	15	2,3	П	25
63	7,25	1350	13	2,9	Д	40	93	19,5	880	13	2,9	Д	25
64	10,3	1300	15	2,3	П	40	94	27	800	15	2,3	П	25
65	2	830	13	2,9	Д	40	95	6,2	640	13	2,9	Д	25
66	2,9	850	15	2,3	П	40	96	8,5	680	15	2,3	П	25
67	4,8	840	13	2,9	Д	40	97	14,1	660	13	2,9	Д	25
68	6,6	860	15	2,3	П	40	98	19,3	700	15	2,3	П	25
69	9,7	780	13	2,9	Д	40	99	28,1	690	13	2,9	Д	25
70	13,8	800	15	2,3	П	40	100	37,5	680	15	2,3	П	25
71	20	845	13	2,9	Д	40	101	41,5	510	13	2,9	Д	25
72	27,5	795	15	2,3	П	40	102	40	490	15	2,3	П	25
73	35,5	780	13	2,9	Д	40	103	54,5	530	13	2,9	Д	25
74	51	880	15	2,3	П	40	104	3,0	1200	16	2,6	П	40
75	103	870	13	2,9	Д	40	105	4,7	1300	10	2	Д	40
76	6,8	650	15	2,3	П	40	106	6,8	1350	16	2,6	П	40
77	9,1	670	13	2,9	Д	40	107	9,5	1300	10	2	Д	40
78	13,7	660	15	2,3	П	40	108	1,8	830	16	2,6	П	40
79	19,5	690	13	2,9	Д	40	109	3,4	850	10	2	Д	40
80	27	660	15	2,3	П	40	110	5,1	840	16	2,6	П	40
81	34,5	630	13	2,9	Д	40	111	7,0	860	10	2	Д	40
82	50	610	15	2,3	П	40	112	10,3	780	16	2,6	П	40
83	71	600	13	2,9	Д	40	113	14,2	800	16	2	Д	40
84	85,3	695	15	2,3	П	40	114	10	840	10	2,6	П	25
85	42	510	13	2,9	Д	40	115	14,5	860	16	2	Д	25
86	56	490	15	2,3	П	40	116	18	880	10	2,6	П	25
87	69	530	13	2,9	Д	40	117	25	800	16	2	Д	25
88	3	850	15	2,3	П	25	118	5,5	640	10	2,6	П	25
89	4,2	830	13	2,9	Д	25	119	9,5	680	16	2	Д	25
90	6,8	810	15	2,3	П	25	120	13,5	660	10	2,6	П	25

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Таблица 1. Значения мощности, кВт, двигателей серии 4А с повышенным скольжением (4АС) при различных ПВ

Типоразмер двигателя	Синхронная частота вращения n_1 , об/мин															
	3000				1500				1000				750			
	Продолжительность включения ПВ _н , %															
	15	25	60	100	15	25	60	100	15	25	60	100	15	25	60	100
4AC71A	1,2	1,06	0,95	0,85	0,8	0,65	0,6	0,6	0,45	0,4	0,4	0,4	-	-	-	-
4AC71B	1,5	1,3	1,1	0,9	1,1	0,9	0,8	0,7	0,8	0,65	0,65	0,5	0,35	0,3	0,3	0,2
4AC80A	2,4	1,9	1,7	1,5	1,6	1,3	1,1	0,95	1	0,9	0,7	0,5	0,55	0,5	0,45	0,35
4AC80B	3,2	2,7	2,2	2	2,1	1,7	1,5	1,3	1,5	1,3	1,1	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4
4AC90LA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,1	0,9	0,8	0,7
4AC90LB	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,4	1,2	1	0,8
4AC90L	4,6	4	3,2	2,7	3,1	2,4	2,2	1,9	2,2	1,8	1,3	1,1	-	-	-	-
4AC100S	5,5	5	4,2	3,6	4	3,7	2,8	2,3	-	-	-	-	-	-	-	-
4AC100L	8	7	5,8	5,3	5,5	5	3,8	3,3	3,1	2,9	2,2	1,8	1,8	1,6	1,5	1,2
4AC112MA	-	-	-	-	-	-	-	-	4,5	3,8	2,8	2,5	3	2,6	1,9	1,5
4AC112MB	11	9,5	7,1	6	8	6,7	5	4,2	5,6	5	3,8	3,2	4,2	3,6	2,5	1,9
4AC132S	-	-	-	-	11,8	9,5	7,5	7,1	8,5	7,5	6	4,5	6	5	3,6	2,6
4AC132M	17	14	11	10	16	14	10,5	9	11	10	7,5	6,3	8,5	7,1	5	3,6
4AC160S	-	-	-	-	22	19	15	13	16	14	11	1	11	10	8	7
4AC160M	-	-	-	-	25	23	18,5	17	21	19	15	13	16	14	11	10
4AC180S	-	-	-	-	26,5	24	20	19	-	-	-	-	-	-	-	-
4AC180M	-	-	-	-	32	30	25	24	22	20	17	16	19	17	14	13
4AC200M	-	-	-	-	42	35	28	26	28	25	20	18	26,5	24	19	16
4AC200L	-	-	-	-	50	47,5	37,5	35	40	33	25	23	-	-	-	-
4AC225M	-	-	-	-	63	55	45	40	40	35	28	25	33,5	30	24	22
4AC250S	-	-	-	-	75	63	53	50	56	45	36	33,5	45	45	30	26,5
4AC250M	-	-	-	-	80	71	60	56	60	53	40	36	-	-	-	-

Таблица 2. Технические данные двигателей серии 4А с повышенным скольжением (4АС) при $P_{ВН}=40\%$

Тип	Мощность, кВт	Частота вращения, об/мин	Ток статора, А	КПД η , %	$\cos\varphi$, о.е.	$\frac{M_p}{M_n}$	$\frac{M_{max}}{M_n}$	Момент инерции, 10^{-2} кг*м ²
1	2	3	4	5	6	7	8	9
<i>$n_1 = 3000$ об/мин</i>								
4AC71A2Y3	1	2700	2,4	72	0,87	2	2,2	0,098
4AC71B2Y3	1,2	2700	3	72	0,83	2	2,2	0,105
4AC80A2Y3	1,9	2745	4,4	75	0,87	2	2,2	0,18
4AC80B2Y3	2,5	2745	5,7	76	0,87	2	2,2	0,212
4AC90L2Y3	3,5	2775	7,7	80	0,86	2	2,2	0,35
4AC100S2Y3	4,8	2805	10,3	82	0,86	2	2,2	0,59
4AC100L2Y3	6,3	2805	13,4	82	0,86	2	2,2	0,75
4AC112M2Y3	8	2850	17,2	84	0,84	2	2,4	1
4AC132M2Y3	11	2840	24	84	0,89	2	2,4	1,25
<i>$n_1 = 1500$ об/мин</i>								
4AC71A4Y3	0,6	1350	1,8	68	0,73	2	2,2	0,13
4AC71B4Y3	0,8	1350	2,4	68,5	0,75	2	2,2	0,14
4AC80A4Y3	1,3	1358	3,5	68,5	0,82	2	2,2	0,32
4AC80B4Y3	1,7	1335	4,5	70	0,82	2	2,2	0,33
4AC90L4Y3	2,4	1360	5,9	76	0,82	2	2,2	0,56
4AC100S4Y3	3,2	1395	7,8	76,5	0,82	2	2,2	0,87
4AC100L4Y3	4,25	1395	10,1	78	0,82	2	2,2	1,12
4AC112M4Y3	5,6	1395	13	79	0,83	2	2,2	1,66
4AC132S4Y3	8,5	1395	18,4	82,5	0,85	2,6	2,8	2,83
4AC132M4Y3	11,8	1410	25	84	0,85	2	2,2	4
4AC160S4Y3	17	1425	33,3	84,5	0,86	2	2,2	10,25
4AC160M4Y3	20	1432	37,6	87	0,87	2	2,2	12,75
4AC180S4Y3	21	1418	40,3	86	0,92	2	2,2	19
4AC180M4Y3	26,5	1440	50	88,5	0,91	2	2,2	23,25
4AC200M4Y3	31,5	1410	59,4	87,5	0,92	2	2,2	37
4AC200L4Y3	40	1410	73,5	89	0,93	2	2,2	47
4AC225M4Y3	50	1395	94,3	87,5	0,92	2	2,2	64
4AC250S4Y3	56	1380	106	87,5	0,92	2	2,2	102
4AC250M4Y3	63	1365	118	87	0,93	2	2,2	1,17

Продолжение таблицы 2.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
n ₁ = 1000 об/мин								
4AC71A6Y3	0,4	920	1,4	62,5	0,7	2	2,1	0,17
4AC71B6Y3	0,63	920	2,2	65	0,7	2	2,1	0,2
4AC80A6Y3	0,8	860	2,9	61	0,68	2	2,1	0,25
4AC80B6Y3	1,2	860	3,7	66,5	0,73	2	2,1	0,35
4AC90L6Y3	1,7	900	5	71	0,72	1,9	2,1	0,73
4AC100L6Y3	2,6	920	6,9	75	0,76	1,9	2,1	1,31
4AC112MA6Y3	3,2	910	9,1	72	0,74	1,9	2,1	1,72
4AC112MB6Y3	4,2	910	10,8	75	0,79	1,9	2,1	2,11
4AC132S6Y3	6,3	940	15,1	79	0,8	1,9	2,1	4
4AC132M6Y3	8,5	940	20,2	80	0,8	1,9	2,1	5,75
4AC160S6Y3	12	940	26	82,5	0,85	1,9	2,1	14,25
4AC160M6Y3	16	940	36,1	84	0,85	1,9	2,1	18,25
4AC180M6Y3	19	940	39,9	84,5	0,9	1,9	2,1	22
4AC200M6Y3	22	910	43,5	83,5	0,92	1,9	2,1	40
4AC200L6Y3	28	920	54,6	85,5	0,91	1,9	2,1	45
4AC225M6Y3	33,5	880	69	81	0,91	1,9	2,1	74
4AC250S6Y3	40	950	75,8	89	0,9	1,9	2,1	116
4AC250M6Y3	45	950	90	86,5	0,88	1,9	2,1	126
n ₁ = 750 об/мин								
4AC71B8Y3	0,3	670	1,5	50	0,61	1,9	2	0,185
4AC80A8Y3	0,45	660	2,1	53,5	0,61	1,9	2	0,34
4AC80B8Y3	0,6	660	2,5	58	0,63	1,9	2	0,41
4AC90LA8Y3	0,9	660	3,4	61	0,65	1,8	2	0,68
4AC90LB8Y3	1,2	660	4,4	65	0,64	1,8	2	0,86
4AC100L8Y3	1,6	675	5,7	69	0,63	1,8	2	1,3
4AC112MA8Y3	2,2	670	7,56	68	0,65	1,8	2	1,75
4AC112MB8Y3	3,2	670	9,66	72	0,7	1,8	2	2,4
4AC132S8Y3	4,5	690	12,9	76	0,7	1,8	2	4,25
4AC132M8Y3	6	690	16,9	77	0,7	1,8	2	5,8
4AC160S8Y3	9	690	21	81,5	0,8	1,8	2	13,75
4AC160M8Y3	12,5	688	29,2	82,5	0,79	1,8	2	17
4AC180M8Y3	15	700	32	83,5	0,83	1,8	2	25
4AC200M8Y3	20	690	43	83,5	0,85	1,8	2	40
4AC225M8Y3	26,5	675	57,3	83	0,85	1,8	2	74
4AC250S8Y3	36	694	76	85	0,85	1,8	2	113

Таблица 3. Технические данные электродвигателей с фазным ротором, в режиме $P_{вн}=40\%$, 380 В, 50 Гц.

Тип	Число полюсов	Мощность, кВт	Частота вращения, об/мин	Ток статора, А	КПД η , о.е.	Ток ротора, А	Напряжение ротора, В	Момент инерции, кг·м ²
4MTF(H)112L4	4	3,7	1370	10,5	0,84	12	203	0,05
4MTF(H)112LB4	4	5,5	1390	15	0,85	17	221	0,07
4MTF(H)132L4	4	7,5	1400	19	0,854	19,8	258	0,085
4MTF(H)132LB4	4	11	1410	28	0,857	41	179	0,09
4MTF(H)112L6	6	2,2	910	7,2	0,82	11	144	0,065
4MTF(H)112LB6	6	3,7	900	11,2	0,825	13,8	190	0,075
4MTF(H)132L6	6	5,5	915	14,8	0,825	18,3	213	0,12
4MTF(H)132LB6	6	7,5	935	18,2	0,83	20,7	242	0,14
4MTF(H)160L6	6	11	910	32	0,832	41	179	0,26
4MTF(H)160LB6	6	15	930	39	0,83	48	213	0,31
4MTF(H)200L6	6	22	935	55	0,84	60	235	0,6
4MTF(H)200LB6	6	30	935	75	0,85	73	235	0,71
4MTF(H)225M6	6	37	965	78	0,875	77	293	0,93
4MTH225L6	6	55	970	115	0,88	115	290	1,05
4MTH280S6	6	75	970	142	0,9	178	270	3,33
4MTH280M6	6	110	975	205	0,905	160	420	4,13
4MTF(H)160L8	8	7,5	695	25	0,82	22	227	0,26
4MTF(H)160LB8	8	11	705	38	0,83	39	185	0,32
4MTF(H)200L8	8	15	710	42	0,832	48,8	206	0,65
4MTH200LB8	8	22	715	57	0,83	59	541	0,77
4MTH225M8	8	30	720	74,6	0,845	71	252	1,1
4MTH225L8	8	37	725	87,4	0,87	79	302	1,46
4MTH280S8	8	55	720	112	0,875	170	196	4,33
4MTH280M8	8	75	725	154	0,885	165	227	5,23
4MTH280L8	8	90	730	179	0,9	162	355	6,33
4MTH355S8	8	132	710	270	0,92	245	331	10,23
4MTH355M8	8	160	715	320	0,925	238	420	12,83
4MTH355L8	8	200	730	400	0,93	255	533	15,04
4MTH280S10	10	45	576	103	0,89	146	181	4,35
4MTH280M10	10	60	580	124	0,895	135	239	5,25
4MTH280L10	10	75	582	166	0,9	142	308	6,35
4MTH355S10	10	110	584	266	0,905	250	272	10,26
4MTH355M10	10	132	585	315	0,91	250	327	12,86
4MTH355L10	10	160	586	392	0,92	245	408	15,08

Таблица 4. Технические данные электродвигателей с фазным ротором, в режиме $P_{вн}=25\%$, 380 В, 50 Гц.

Тип	Число полюсов	Мощность, кВт	Частота вращения, об/мин	Ток статора, А	КПД η , о.е.	Ток ротора, А	Напряжение ротора, В	Момент инерции, кг·м ²
4MTF(H)112L6	6	3,5	905	10	0,71	13,5	180	0,065
4MTF(H)112LB6	6	5	920	14	0,715	16,7	205	0,075
4MTF(H)132L6	6	7,5	935	20	0,712	19,5	255	0,12
4MTF(H)132LB6	6	11	950	28	0,728	41	173	0,14
4MTF(H)160L6	6	16	960	38	0,73	50	205	0,26
4MTF(H)160LB6	6	22	965	52	0,731	62	225	0,31
4MTF(H)200L6	6	30	970	67	0,741	72	260	0,6
4MTF(H)132L8	8	7,5	695	20,5	0,7	20	252	0,22
4MTF(H)160L8	8	11	710	31	0,72	43,5	167	0,26
4MTF(H)160LB8	8	16	710	42,5	0,728	50	205	0,32
4MTF(H)200L8	8	22	715	58	0,734	59	237	0,65
4MTF(H)200LB8	8	30	720	74	0,735	67	280	0,77
4MTH225M8	8	40	725	97	0,744	77	320	1,1
4MTH225L10	10	45	575	115	0,77	155	185	1,15
4MTH280S10	10	60	578	145	0,792	153	245	4,35
4MTH280M10	10	80	580	190	0,795	155	320	5,25
4MTH280L10	10	100	584	255	0,805	230	275	6,35
4MTH355S10	10	125	587	320	0,81	235	345	10,26
4MTH355M10	10	160	587	395	0,822	235	420	12,86

Таблица 5. Сопротивления и токи ступеней резисторов для электроприводов

Ступени	Тип магнитного контроллера					
	ТА, К	ТСА, КС	ТСД	ТА, К	ТСА, КС	ТСД
	Ток ротора не более 60 А			Ток ротора не более 160 А		
P1-P4	$\frac{15}{83}$	-	$\frac{6,5}{83}$	$\frac{5}{83}$	$\frac{5}{83}$	$\frac{5}{83}$
P4-P7	$\frac{20}{59}$	-	$\frac{13}{59}$	$\frac{10}{59}$	$\frac{10}{59}$	$\frac{10}{59}$
P7-P10	$\frac{40}{50}$	-	$\frac{26}{50}$	$\frac{20}{50}$	$\frac{20}{59}$	$\frac{20}{59}$
P10-P13	$\frac{120}{21}$	-	$\frac{90}{30}$	$\frac{40}{42}$	$\frac{27}{50}$	$\frac{27}{50}$
P13-P16	-	-	-	$\frac{120}{21}$	$\frac{76}{42}$	$\frac{76}{42}$
P16-P19	-	-	-	-	$\frac{72}{30}$	-

П р и м е ч а н и е: В числителе указаны относительные значения сопротивлений, %; в знаменателе – токовая нагрузка, %.

Таблица 6. Нормализованные блоки резисторов типа БФ6 ИРАК

Каталожный номер	Ток продолжит. режима, А	Общее сопротивление, Ом	Сопротивления ступеней, Ом								Число выводных зажимов
			1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	
434332.004-01	228	0,115	0,0215	0,017	0,017	0,0215	0,019	0,019	-	-	7
434332.004-02	204	0,142	0,026	0,0215	0,0215	0,026	0,0235	0,0235	-	-	7
434332.004-03	160	0,216	0,036	0,036	0,036	0,036	0,036	0,036	-	-	7
434332.004-04	128	0,37	0,0615	0,0615	0,0615	0,0615	0,0615	0,0615	-	-	7
434332.004-05	114	0,474	0,079	0,079	0,079	0,079	0,079	0,079	-	-	7
434332.004-06	102	0,58	0,096	0,096	0,096	0,096	0,096	0,096	-	-	7
434332.004-07	80	0,88	0,146	0,146	0,146	0,146	0,146	0,146	-	-	7
434332.004-08	64	1,5	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	-	-	7
434332.004-09	57	1,92	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	-	-	7
434332.004-10	51	2,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	-	-	7
434332.004-11	40	3,5	0,44	0,435	0,435	0,44	0,44	0,435	0,435	0,44	9
434332.004-12	36	4,8	0,6	0,596	0,596	0,6	0,6	0,596	0,596	0,6	9

Таблица 7. Нормализованные блоки резисторов типа БК12 ИРАК.

Каталожный номер	Ток продолжит. режима, А	Общее сопротивление, Ом	Сопротивление ступеней, Ом						Число выводных зажимов
			1-2, 2-3	3-4, 4-5	5-6, 6-7	7-8, 8-9	9-10,10-11	11-12	
434331.003-01	8,5	52,8	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	8,8	12
434331.003-02	21,2	8,4	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	1,4	12
434331.003-03	18,3	11,7	0,975	0,975	0,975	0,975	0,975	1,95	12
434331.003-04	14,5	17,4	1,45	1,45	1,45	1,45	1,45	2,9	12
434331.003-05	13	23,4	1,95	1,95	1,95	1,95	1,95	3,9	12
434331.003-06	2,8	33,6	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	5,6	12