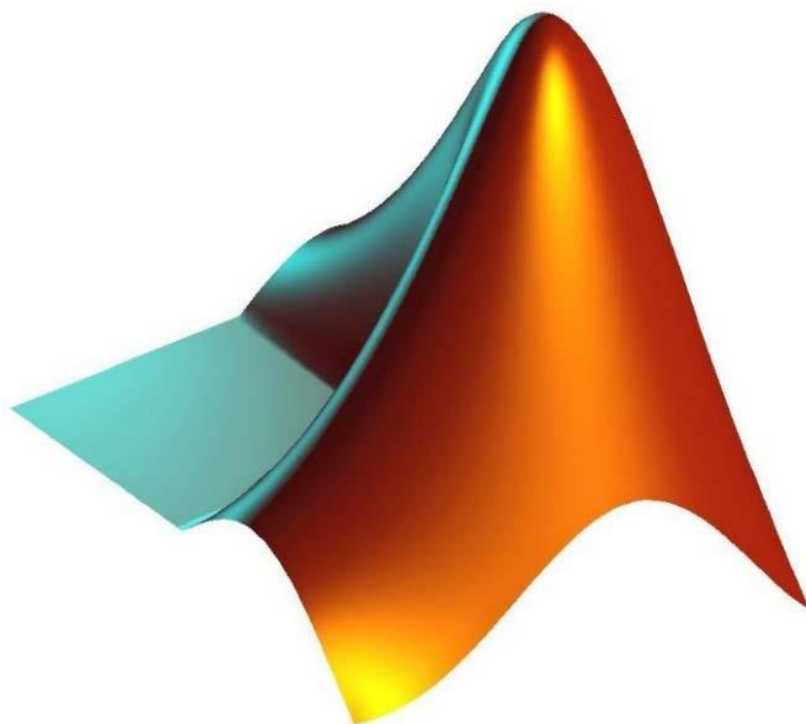


Владимирский государственный университет

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАШИННЫХ
УСТРОЙСТВ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ
И УПРАВЛЕНИЯ В СРЕДЕ MATLAB**

Практикум



Владимир 2025

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАШИННЫХ УСТРОЙСТВ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ В СРЕДЕ MATLAB

Практикум

Электронное издание



Владимир 2025

ISBN 978-5-9984-1756-6

© ВлГУ, 2025

© Лиходеев С. И., 2025

УДК 681.51
ББК 31.27

Автор-составитель С. И. Лиходеев

Рецензенты:

Кандидат технических наук, доцент
доцент кафедры автоматизации, мехатроники и робототехники
Владимирского государственного университета
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых
В. П. Умнов

Кандидат технических наук
зам. директора НПП «Автоматика»
Д. Д. Павлов

Моделирование электромашинных устройств систем автоматизации и управления в среде MATLAB [Электронный ресурс] : практикум / авт.-сост. С. И. Лиходеев ; Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2025. – 132 с. – ISBN 978-5-9984-1756-6. – Электрон. дан. (8,38 Мб). – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Систем. требования: Intel от 1,3 ГГц ; Windows XP/7/8/10 ; Adobe Reader ; дисковод CD-ROM. – Загл. с титул. экрана.

Содержит семь практических работ по основным разделам курсов «Математические модели технических объектов управления» и «Электромашинные устройства систем автоматизации и управления», которые выполняются в среде MATLAB.

Предназначен для студентов, обучающихся по направлениям подготовки 27.03.04, 27.04.03 – Управление в технических системах.

Рекомендовано для формирования профессиональных компетенций в соответствии с ФГОС ВО.

Табл. 9. Ил. 151. Библиогр.: 5 назв.

ISBN 978-5-9984-1756-6

© ВлГУ, 2025
© Лиходеев С. И., 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
Практическое занятие 1. МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЯ.....	5
Практическое занятие 2. ИССЛЕДОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОРМОЗНЫХ РЕЖИМОВ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ	15
Практическое занятие 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА	24
Практическое занятие 4. МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ	34
Практическое занятие 5. МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧИХ И ПУСКОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННОГО ТРЕХФАЗНОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ПОДКЛЮЧЕНИИ К ОДНОФАЗНОЙ СЕТИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА.....	43
Практическое занятие 6. МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ.....	49
Практическое занятие 7. МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕНТИЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ	55
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	62
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	63
ПРИЛОЖЕНИЯ	64

ВВЕДЕНИЕ

Современные вычислительные средства позволяют без особого труда и затрат времени решать сложные задачи управления в технических системах не инженерными методами, а с использованием математических аппаратов любой степени сложности. При этом не требуется помощь программиста для реализации методов и визуализации проводимых исследований. Все это выполняет такая современная математическая система, как MATLAB [1].

В практикуме на различных примерах рассматриваются способы построения имитационных моделей мехатронных систем. Имитационное моделирование – метод исследования, при котором изучаемая система заменяется моделью, с достаточной точностью описывающей реальную систему, для проведения экспериментов с целью проверки, оценки и поддержки конструктивных решений, анализа и динамических характеристик, настройки алгоритмов управления и получения прочей информации о рассматриваемой системе.

Практическое занятие 1

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Цель работы: исследование и расчет характеристик двигателя постоянного тока с независимым и последовательным возбуждением.

Свойства машин постоянного тока в значительной степени определяются способом включения обмотки возбуждения [1]. Краткие теоретические сведения даны в приложении 1.

Машины независимого возбуждения. Обмотка возбуждения питается постоянным током от источника, электрически не связанного с обмоткой якоря. Машины последовательного возбуждения. Обмотка возбуждения и обмотка якоря соединены последовательно. Машины параллельного возбуждения. Обмотка возбуждения и обмотка якоря соединены параллельно.

Рассмотрим моделирование машины независимого возбуждения. Структурная схема двигателя постоянного тока с независимым возбуждением приведена в [4].

Модель для исследования динамических характеристик двигателя постоянного тока (ДПТ) с независимым возбуждением, реализованная в Matlab [2], приведена на рис.1.1.

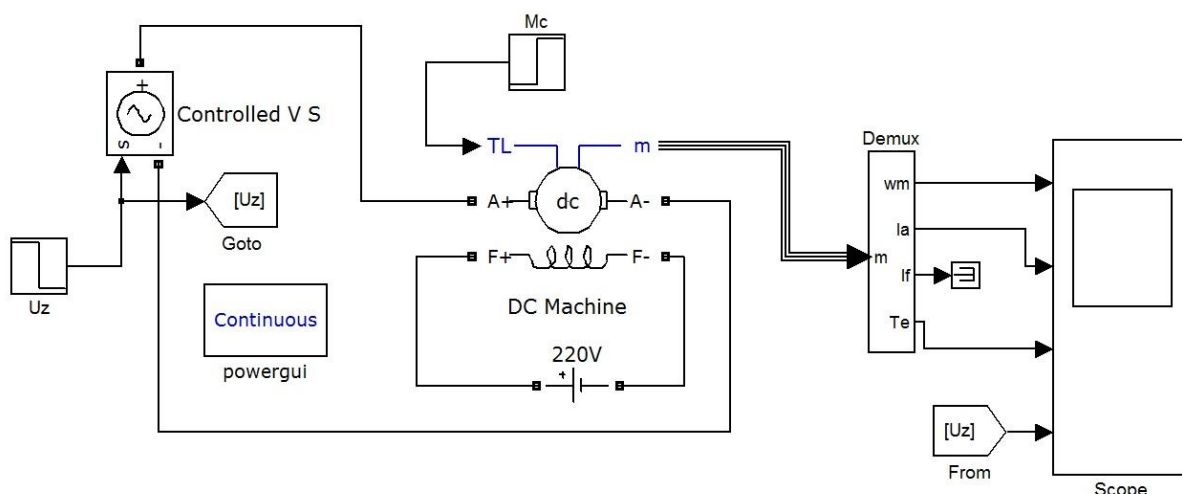


Рис. 1.1. Модель для исследования динамических характеристик ДПТ

В примере приняты следующие значения параметров двигателя (в единицах СИ): $L_{ind}=0.001$, $R_{ind}=0.1$, $J=10$, $c_e=10$, $U=220$. Наброс нагрузки производится в момент времени 0.2 с, величина момента нагрузки равна 2500Нм.

Результаты моделирования пуска двигателя даны на рис. 1.2. Зависимости частоты вращения, тока якоря ротора ДПТ, электромагнитного момента и напряжения, приложенного к ДПТ (ω , I_{ind} , M , U_z) получены с помощью осциллографа.

Временной интервал (0.2 с) соответствует разгону ДПТ до заданной частоты вращения при моменте сопротивления равным нулю. В момент времени 0.2 с напряжение, приложенное к обмотке якоря ДПТ, меняет полярность. Он начинает тормозиться и затем происходит реверс.

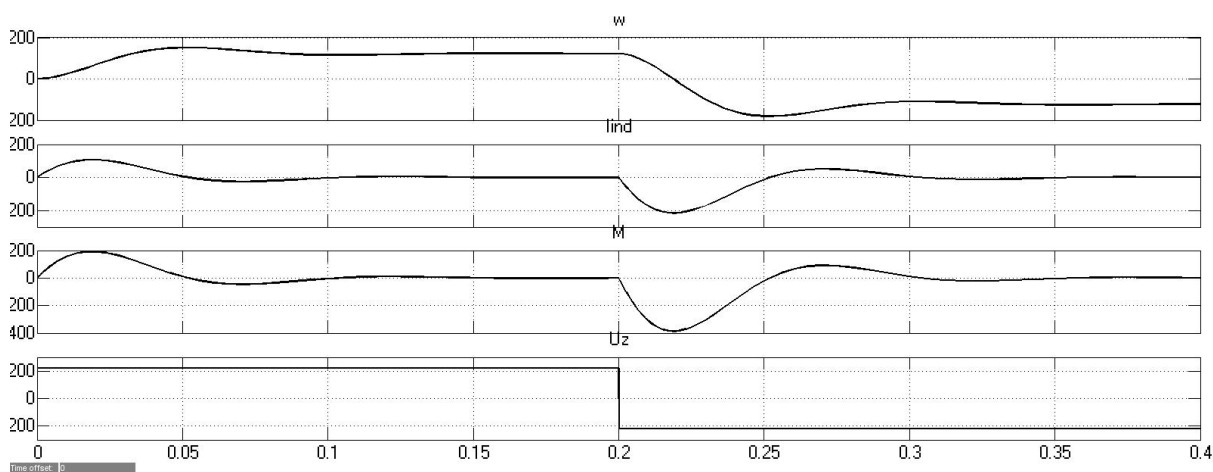


Рис.1.2. Результаты моделирования пуска двигателя

Рассмотрим расчет механических характеристик. Модель для расчета механических характеристик ДПТ, приведена на рис. 1.3.

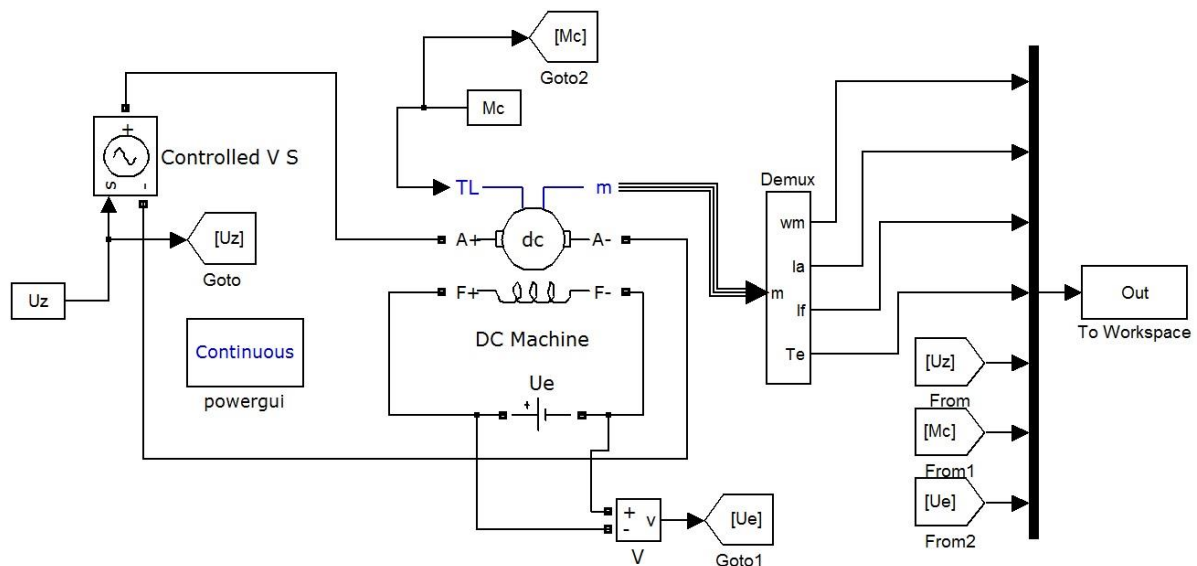


Рис.1.3. Модель для расчета механических характеристик ДПТ

Программа расчета механических характеристик представлена на рисунке 1.4.

Ue=220;

for k1=0:1:2;

Uz=220-25*k1;% величина напряжения, приложенного к якору ДПТ;

for k=0:1:10;

Mc=20*k;% величина момента нагрузки;

sim('MCC2') % команда обращения к модели;

A(k+1,1)=Out(1);% величина скорости;

A(k+1,2)=Out(2);% величина тока якоря;

A(k+1,3)=Out(3);% величина тока возбуждения;

A(k+1,4)=Out(4);% величина электромагнитного момента;

A(k+1,5)=Out(5);% величина напряжения, приложенного к якору ДПТ;

A(k+1,6)=Out(6);% величина момента нагрузки;

A(k+1,7)=Out(7);% величина напряжения возбуждения;

end

plot(A(1:k,6),A(1:k,1),'k')

hold on;% — обеспечивает продолжение вывода графиков в текущее окно;

grid on;%добавляет сетку к текущему графику;

end

Рис.1.4. Программа расчета механических характеристик

Семейство механических характеристик представлено на рис.1.5. Изменение напряжения, подведенного к якорю двигателя при номинальном потоке, является в регулируемом электроприводе постоянного тока основным управляющим воздействием. Как правило, изменение напряжения возможно только в сторону уменьшения по сравнению с номинальным. При изменении напряжения пропорционально изменяется скорость идеального холостого хода двигателя, а наклон механических характеристик при любом уровне напряжения одинаков, поэтому механические характеристики принимают вид параллельных прямых, показанных на рис. 1.5.

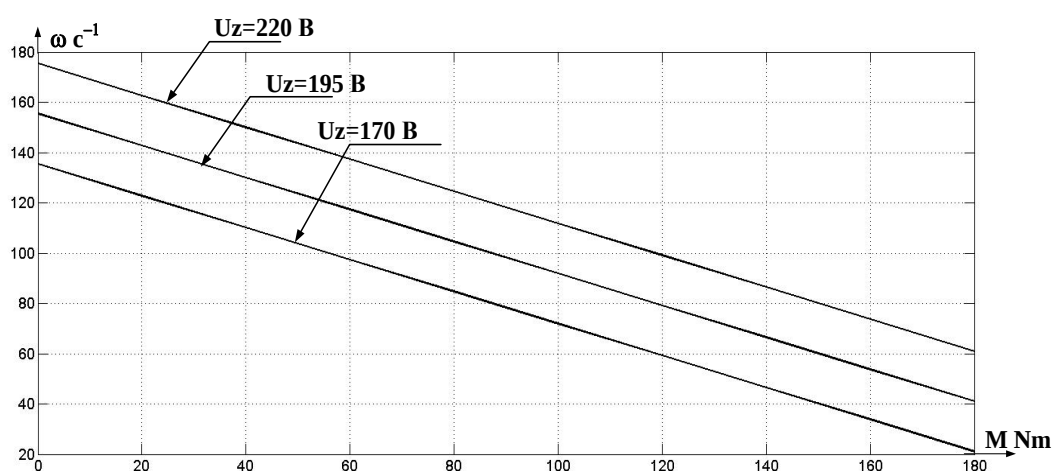


Рис.1.5. Семейство механических характеристик при $U=var$

Программа расчета механических характеристик при уменьшении потока возбуждения представлена на рис. 1.6.

$U_z=220$;

for $k_1=0:1:2$;

$U_e=220-30*k_1$; % величина напряжения возбуждения;;

for $k=0:1:10$;

$M_c=20*k$; % величина момента нагрузки;

sim('MCC2') % команда обращения к модели;

$A(k+1,1)=Out(1)$; % величина скорости;

$A(k+1,2)=Out(2)$; % величина тока якоря;

$A(k+1,3)=Out(3)$; % величина тока возбуждения;

$A(k+1,4)=Out(4)$; % величина электромагнитного момента;

```

A(k+1,5)=Out(5);% величина напряжения, приложенного к якору
ДПТ;
A(k+1,6)=Out(6);% величина момента нагрузки;
A(k+1,7)=Out(7);% величина напряжения возбуждения;
end
plot(A(1:k,6),A(1:k,1),'k')
hold on;% — обеспечивает продолжение вывода графиков в теку-
щее окно,
%что позволяет добавлять последующие графики к уже суще-
ствующим;
grid on;%добавляет сетку к текущему графику;
end

```

Рис. 1.6. Программа расчета механических характеристик при уменьшении потока возбуждения

Семейство механических характеристик при уменьшении потока возбуждения представлено на рис.1.7. Изменение потока двигателя Φ в связи с насыщением его магнитной цепи в номинальном режиме практически возможно в сторону уменьшения потока - ослабления поля двигателя. Уменьшение потока вызывает увеличение скорости идеального холостого хода и уменьшение момента короткого замыкания, а ток короткого замыкания при этом не претерпевает изменений. Соответственно наклон статической механической характеристики увеличивается пропорционально квадрату потока.

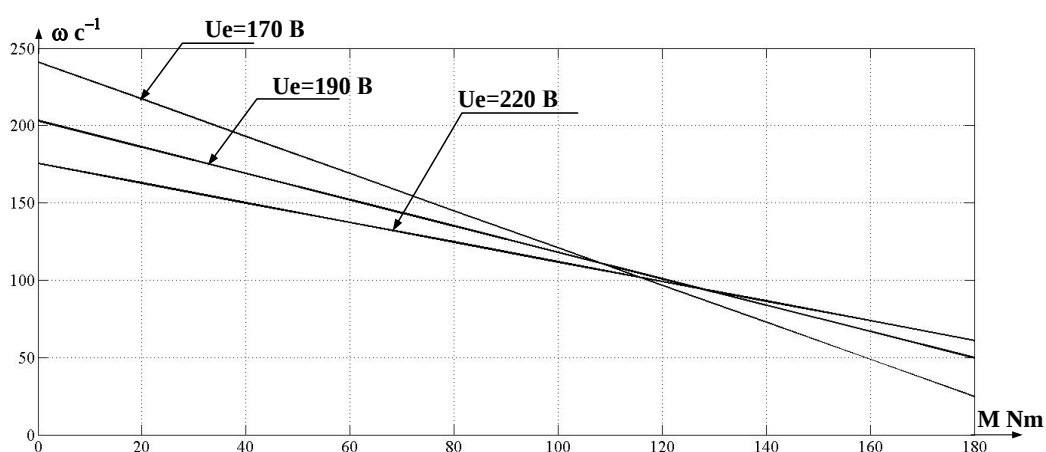


Рис.1.7. Механические характеристик при уменьшении потока возбуждения

Семейство регулировочных характеристик при уменьшении напряжения питания представлено на рис.1.8.

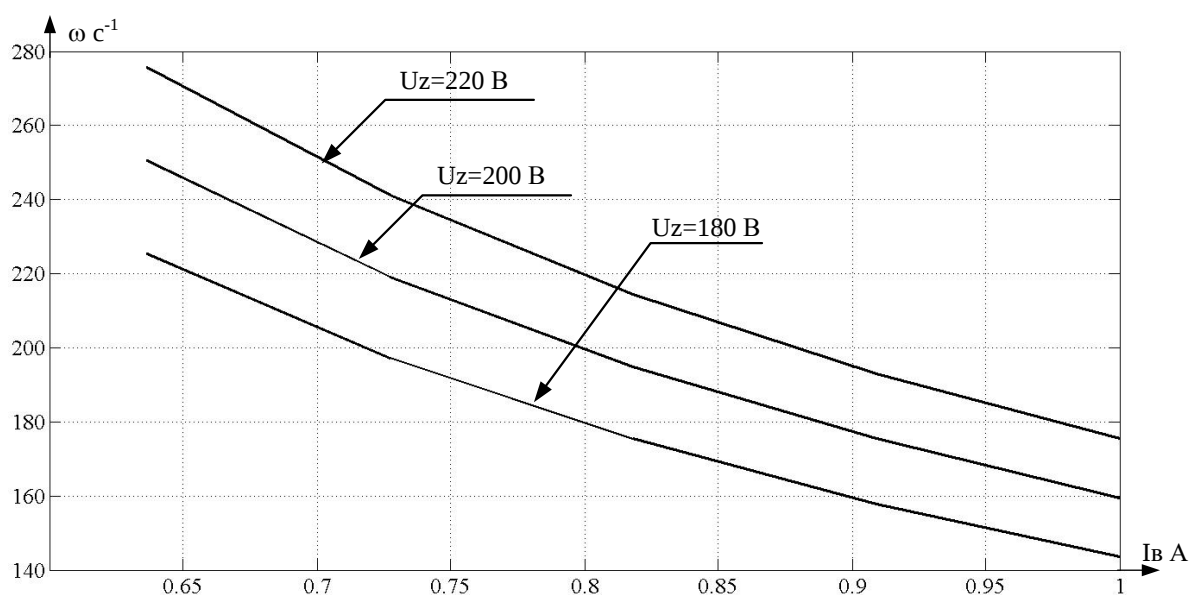


Рис. 1.8. Зависимость скорости двигателя от тока возбуждения

Модель для расчета рабочих характеристик ДПТ, приведена на рисунке 1.9, а программы на рис.1.10.

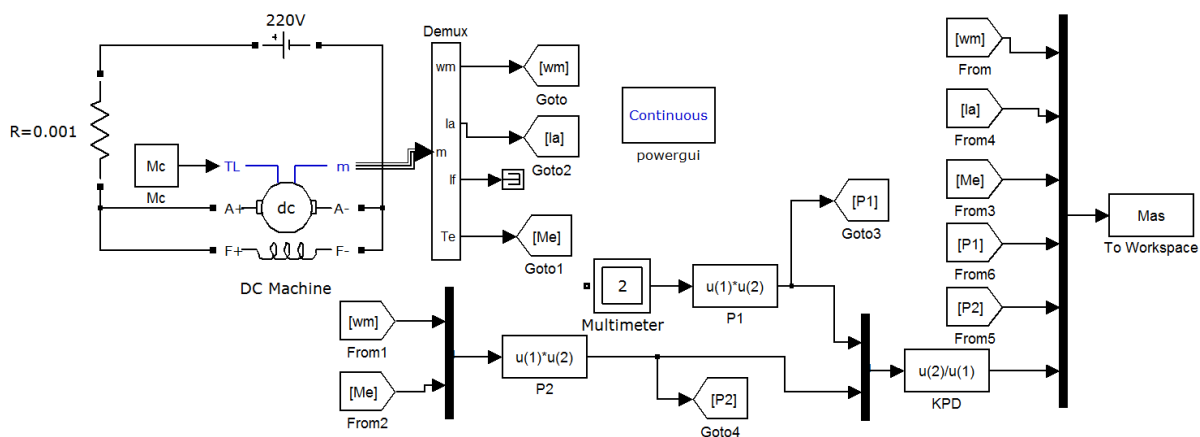


Рис.1.9 Модель для расчета рабочих характеристик ДПТ

```

for k=0:1:100;
    Mc=1*k;% величина момента нагрузки;
    sim('DPTcaract') % команда обращения к модели;
    A(k+1,1)=Mas(1);%w-частота вращения;
    A(k+1,2)=Mas(2);% Ia-ток якоря;
    A(k+1,3)=Mas(3);% Me-Электромагнитный момент;
    A(k+1,4)=Mas(4)*0.01;%P1- потребляемая мощность;
    A(k+1,5)=Mas(5);% P2-мощность на валу двигателя;
    A(k+1,6)=Mas(6)*100;%КПД;
end
plot(A(1:k,5),A(1:k,6),'k',A(1:k,5),A(1:k,3),'k');
hold on;
plot(A(1:k,5),A(1:k,1),'k',A(1:k,5),A(1:k,2),'k',A(1:k,5),A(1:k,4),'k');
hold on;%
grid on

```

Рис. 1.10. Программа расчета рабочих характеристик ДПТ

Рабочие характеристики ДПТ, приведены на рисунке 1.11.

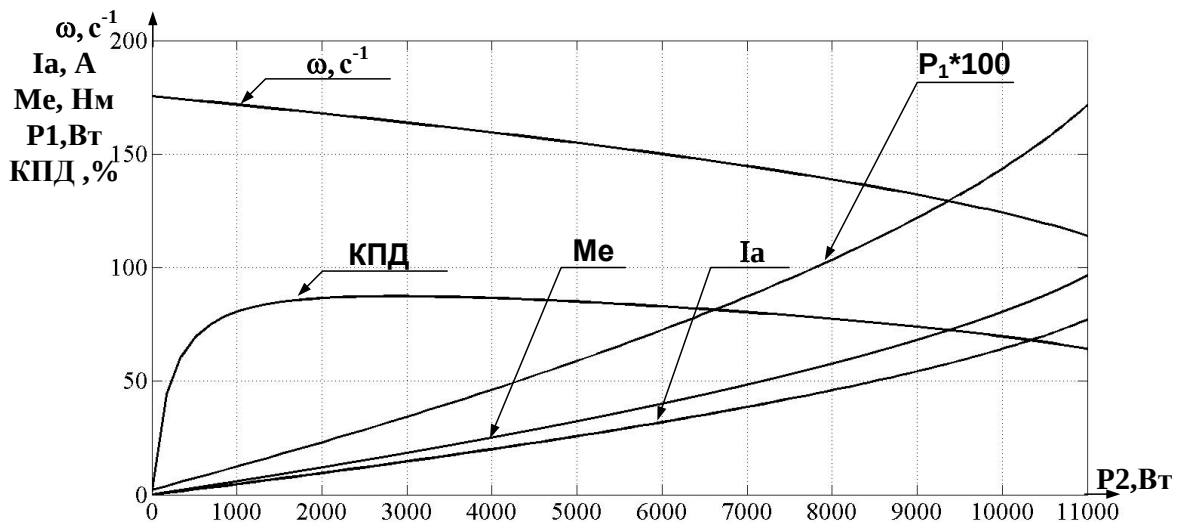


Рис. 1.11. Рабочие характеристик ДПТ

Рассмотрим моделирование двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением

Модель для расчета механических характеристик ДПТ с последовательным возбуждением, приведена на рис. 1.12.

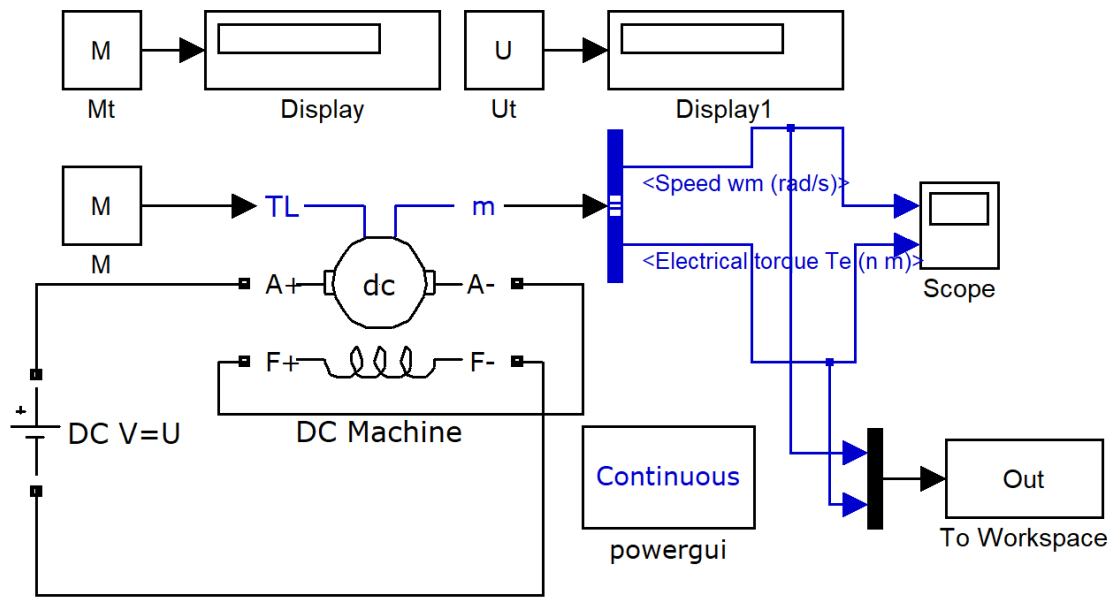


Рис.1.12. Модель для расчета механических характеристик ДПТ с последовательным возбуждением

Программа расчета механических характеристик различных напряжениях питания представлена на рис. 1.13.

```
for k1=0:1:3;
```

```
    U=200-25*k1;% величина напряжения, приложенного к якорю ДПТ;
```

```
    for k=0:1:20;
```

```
        M=0.001+0.1*k;% величина момента нагрузки;
```

```
        sim('DPTES') % команда обращения к модели;
```

```
        A(k+1,1)=Out(1);%величина частоты вращения;
```

```
        A(k+1,2)=Out(2);%величина электромагнитного момента;
```

```
        A(k+1,3)=U;
```

```
    end
```

```
    plot(A(1:k,2),A(1:k,1),'k')
```

```
    hold on;% — обеспечивает продолжение вывода графиков в текущее окно,
```

```
    grid on;%добавляет сетку к текущему графику;
```

```
end
```

Рис. 1.13. Программа расчета механических характеристик при различных значениях напряжения питания

Семейство механических характеристик для ДПТ с последовательным возбуждением при уменьшении напряжения питания представлено на рис.1.14.

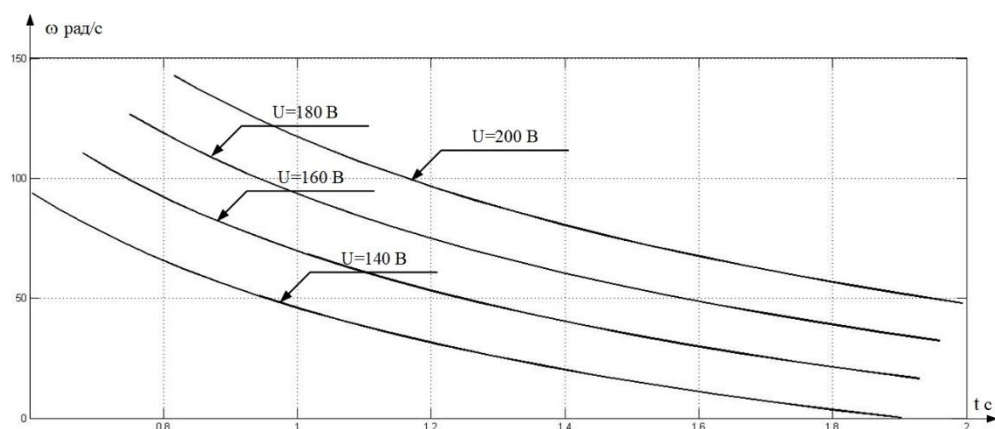


Рис.1.14. Семейство механических характеристик для ДПТ с последовательным возбуждением при уменьшении напряжения питания

Таблица 1.1

Вариант	$P_{ном}$ кВт	$n_{ном}$ об/мин	$M_{ном}$ Н·м	$I_{я}$ А	$U_{я}$ В	$R_{я}$ Ом	$L_{я}$ мГн	L_B Гн	$J \cdot 10^3$ кг·м ²
1	3,7	1750	20,4	16,4	240	0,64	16	1,234	50
2	3,7	1220	29,2	16,2	240	0,49	12	1,800	1000
3	3,7	1750	20,4	19,7	240	2,123	28	0,9483	22,15
4	3,7	1750	20,4	9,5	500	9,21	121,5	1,976	22,15
5	7,5	1750	40,7	37,4	240	0,893	12,16	0,6458	42,51
6	7,5	1750	40,7	18,0	500	3,876	51,77	1,345	42,51
7	14,9	1750	81,4	70,8	240	0,3384	4,895	0,4038	83,21
8	14,9	1750	81,4	34,0	500	1,468	21,24	0,8413	83,21
9	22,4	1750	122,2	103,4	240	0,1871	2,866	0,401	123,9
10	22,4	1750	122,2	49,6	500	0,8123	12,44	0,8355	123,9
11	29,8	1750	162,9	136,0	240	0,1245	2,012	0,369	164,6
12	29,8	1750	162,9	65,3	500	0,54035	8,734	0,7688	164,6
13	37,3	1750	203,6	168,6	240	0,09155	1,558	0,3406	205,3
14	37,3	1750	203,6	81,0	500	0,3975	6,763	0,7096	205,3
15	56,0	1750	305,4	120,1	500	0,2326	4,453	0,5899	307,1
16	74,6	1750	407,2	159,2	500	0,1619	3,442	0,5003	408,9
17	93,3	1750	509,0	198,3	500	0,1233	2,884	0,4365	510,6
18	111,9	1750	610,8	237,5	500	0,0993	2,533	0,387	612,4

1. Порядок выполнения работы

1. Собрать модели, представленные на рис.1.1, 1.3, 1.9, 1.12 и провести необходимые расчеты.
2. Рассчитать рабочие характеристики ДПТ с независимым и последовательным возбуждением.

2. Содержание отчёта

1. Наименование и цель работы.
2. Исследуемые схемы в MATLAB.
3. Осциллограммы режимов пуска.
4. Рассчитанные характеристики.
5. Выводы по работе.

3. Контрольные вопросы

1. На чем основан принцип работы двигателя постоянного тока?
2. Как устроен двигатель постоянного тока?
3. В чем состоит особенность пуска двигателя?
4. Для чего используется пусковой резистор и из каких соображений выбирают его сопротивление?
5. Какой вид имеет механическая характеристика двигателя постоянного тока с параллельным (независимым) возбуждением?
6. Какой вид имеют рабочие характеристики двигателя?
7. Как можно регулировать частоту вращения двигателя?
8. Как изменить направление вращения якоря?
9. При каких обстоятельствах двигатель идет "в разнос"?
10. Какими достоинствами обладает двигатель, и каковы его недостатки?
11. Где применяются двигатели с параллельным (независимым) возбуждением?

Практическое занятие 2

ИССЛЕДОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОРМОЗНЫХ РЕЖИМОВ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Цель работы: исследование и моделирование тормозных режимов двигателей постоянного тока независимого возбуждения в Matlab.

Помимо основного (двигательного) режима работы в двигателях постоянного тока независимого (параллельного) возбуждения возможны тормозные режимы [1].

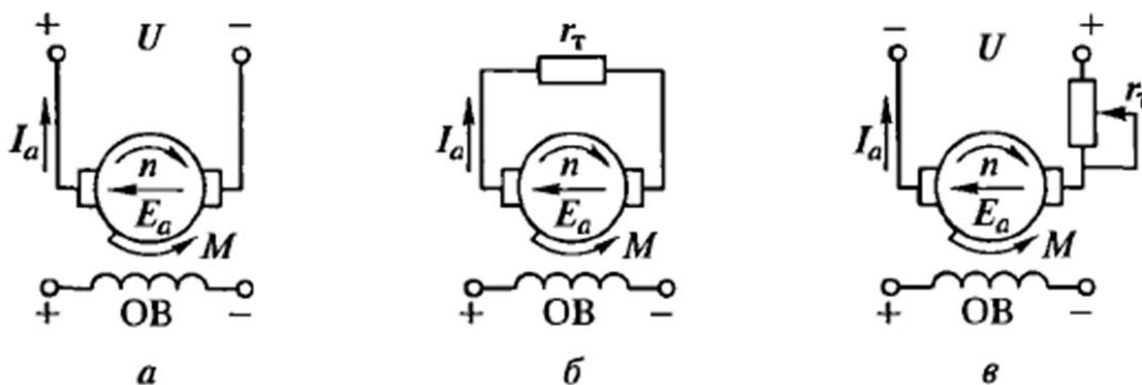


Рис. 2.1. Тормозные режимы двигателя постоянного тока независимого возбуждения: а – генераторный рекуперативный; б – динамический; в – противоключением

Генераторное рекуперативное торможение наступает, когда частота вращения якоря превышает частоту вращения холостого хода n_0 .

В этих условиях ЭДС машины $E_a = C_e \Phi n_0$ превышает напряжение питающей сети ($E_a > U_n$), при этом ток якоря, а следовательно, и электромагнитный момент меняют свое направление на противоположное. В итоге машина постоянного тока переходит в генераторный режим и вырабатываемую при этом электроэнергию отдает в сеть. Электромагнитный момент двигателя становится тормозящим и противодействует внешнему вращающему моменту, создаваемому силами инерции вращающегося с прежней скоростью якоря (рис.2.1а). Этот процесс торможения будет продолжаться до тех пор, пока частота вращения якоря, уменьшаясь, не достигнет значения n_0 .

Таким образом, для перехода двигателя в режим генераторного рекуперативного торможения не требуется изменений в схеме включения двигателя.

Генераторное рекуперативное торможение является наиболее экономичный вид торможения, так как он сопровождается возвратом энергии в сеть. Применение этого способа торможения является эффективным энергосберегающим средством в электроприводе. Он целесообразен в электротранспортных средствах, работа которых связана с частыми остановками и движением под уклон. В этом случае кинетическая энергия движения транспортного средства (трамвай, троллейбус, электропоезд) преобразуется в электрическую энергию и возвращается в сеть.

Возможен способ перевода двигателя в режим генераторного рекуперативного торможения и при установившейся частоте вращения якоря. Для этого необходимо увеличить в двигателе магнитный поток возбуждения, т.е. ток в обмотке возбуждения.

Из выражения ЭДС якоря $E_a = C_e \Phi n_0$ следует, что с ростом магнитного потока возбуждения Φ при неизменной частоте вращения n ЭДС якоря E_a увеличивается, что ведет к уменьшению тока в цепи якоря:

$$I_a = \frac{U - E_a}{r_{яц} + R_{доб}} = \frac{U - C_e \Phi n}{r_{яц} + R_{доб}}$$

При ЭДС $E_a = U$ ток якоря $I_a = 0$, а частота вращения якоря достигает значения $n = n_0$. При дальнейшем увеличении потока возбуждения Φ , а, следовательно, возрастании ЭДС якоря E_a пограничная частота вращения снижается, а частота вращения якоря, оставаясь практически неизменной за счет сил инерции вращающихся частей электропривода, начинает превышать пограничную частоту n_0 . При этом ЭДС якоря превышает напряжение сети и двигатель переходит в режим генераторного рекуперативного торможения.

Необходимость в динамическом торможении возникает в том случае, когда после отключения двигателя от сети его якорь под действием кинетической энергии движущихся масс электропривода продолжает вращаться [1]. Если при этом обмотку якоря, отключив от сети, замкнуть на резистор R_f , то двигатель перейдет в генераторный режим (обмотка возбуждения должна оставаться включенной в сеть). Вырабатываемая при этом электроэнергия не возвращается в сеть, как

это происходит при рекуперативном торможении, а преобразуется в теплоту, которая выделяется в сопротивлении

$$R = r_{яц} + R_f$$

В режиме динамического торможения ЭДС якоря не меняет своего направления, но поскольку якорь отключен от сети ($U = 0$), то ток якоря изменит направление, так как будет создаваться ЭДС E_a

$$I_a = \frac{U - E_a}{R} = \frac{-E_a}{R}$$

т.е. станет отрицательным. В результате электромагнитный момент также изменит направление и станет тормозящим (рис. 2.1, б). Процесс торможения продолжается до полной остановки якоря ($n = 0$).

Рассмотрим торможение противовключением. Допустим, что двигатель работает в основном (двигательном) режиме с номинальной нагрузкой. При отключении двигателя от сети вращающий момент $M = 0$, но якорь двигателя за счет кинетической энергии вращающихся масс электропривода некоторое время будет продолжать вращение, т.е. произойдет выбег двигателя.

Чтобы уменьшить время выбега двигателя, применяют торможение противовключением. С этой целью изменяют полярность напряжения на клеммах обмотки якоря (полярность клемм обмотки возбуждения должна остаться прежней) и напряжение питания обмотки якоря становится отрицательным ($-U$). Но якорь двигателя под действием кинетической энергии вращающихся масс электропривода сохраняет прежнее (положительное) направление вращения, и так как направление магнитного потока не изменилось, то ЭДС якоря E_a также не меняет своего направления и действует согласно напряжению ($-U$), при этом ток якоря создается суммой напряжения сети U и ЭДС якоря E_a (рис. 2.1, в):

$$I_a = \frac{-U - E_a}{r_{яц} + R_{доб}}$$

где, $R_{доб}$ — сопротивление резистора в цепи якоря двигателя.

В этих условиях электромагнитный момент станет отрицательным.

Под действием тормозящего момента $-M_t$, частота вращения якоря уменьшается, достигнув нулевого значения. Если в этот момент цепь якоря не отключить от сети, то произойдет реверсирование дви-

гателя и его якорь под действием момента, который прежде был тормозным, начнет вращение в противоположную сторону. При этом двигатель перейдет в двигательный (основной) режим с отрицательными значениями частоты вращения и вращающего момента. Модель для этого режима представлена на рис.2.2.

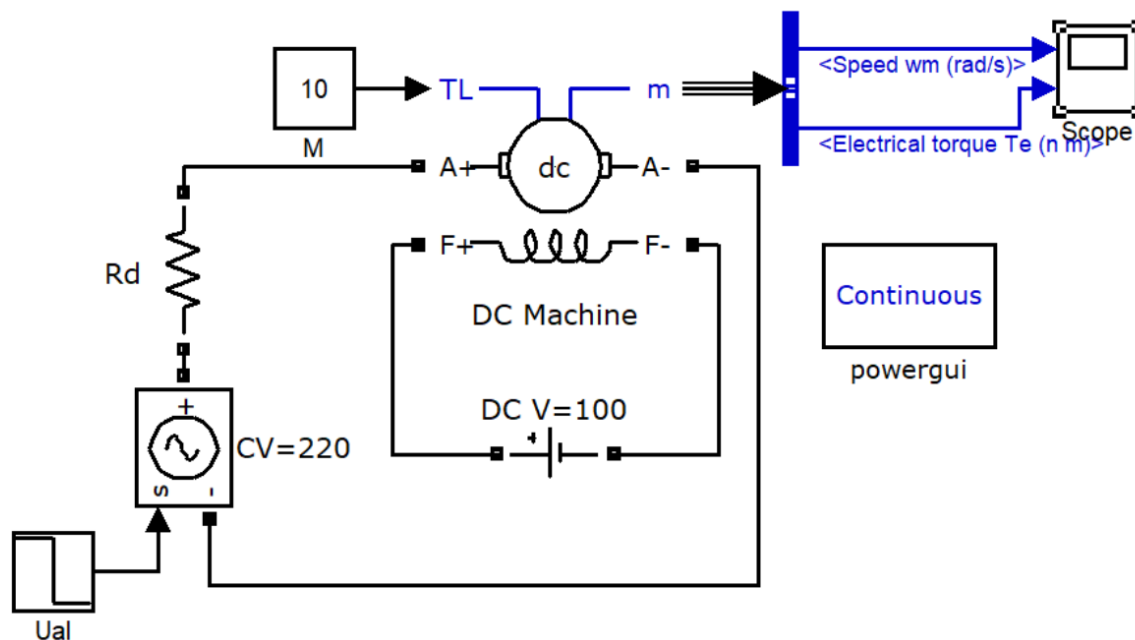


Рис. 2.2. Модель режима торможения противовключением с переходом в двигательный (основной) режим с отрицательными значениями частоты вращения

Результаты моделирования (рис.2.3), показывают, что двигатель перейдет в двигательный (основной) режим с отрицательными значениями частоты вращения и вращающего момента.

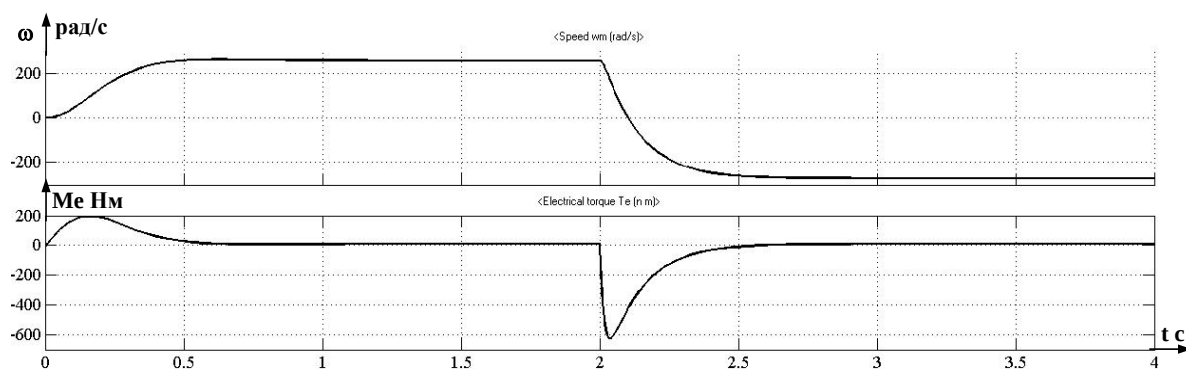


Рис. 2.3. Результаты моделирования режима торможения противовключением

Во избежание нежелательного реверсирования операцию торможения противовключением автоматизируют, чтобы при нулевом значении частоты вращения цепь якоря отключалась от сети.

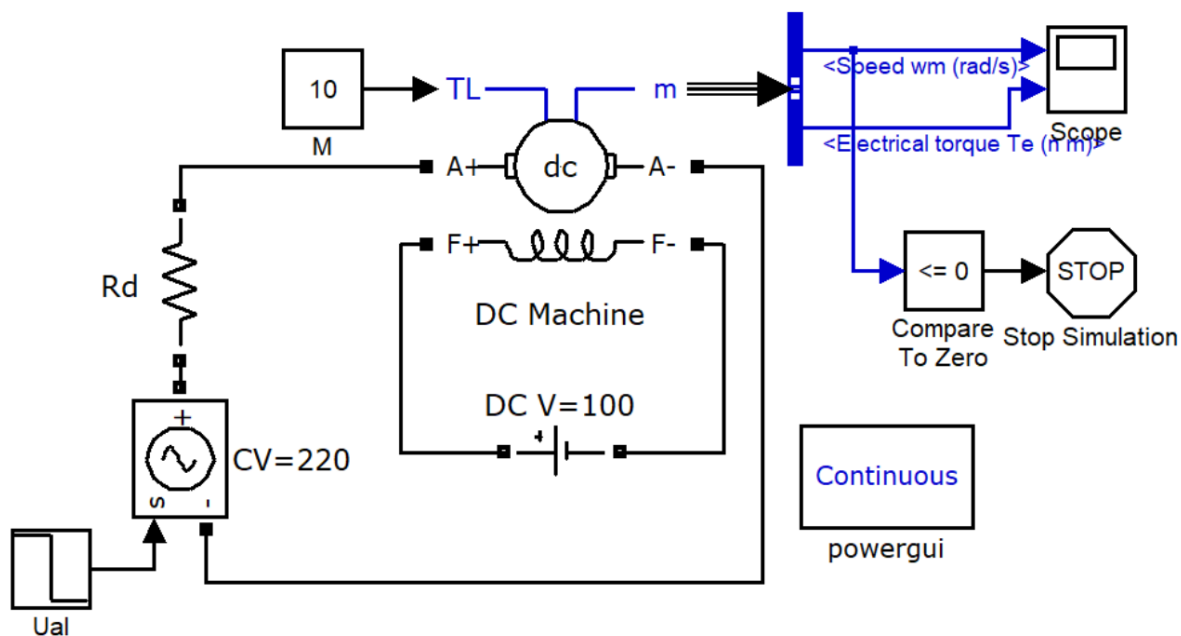


Рис. 2.4. Модель режима торможения противовключением без перехода в двигательный (основной) режим с отрицательными значениями частоты вращения

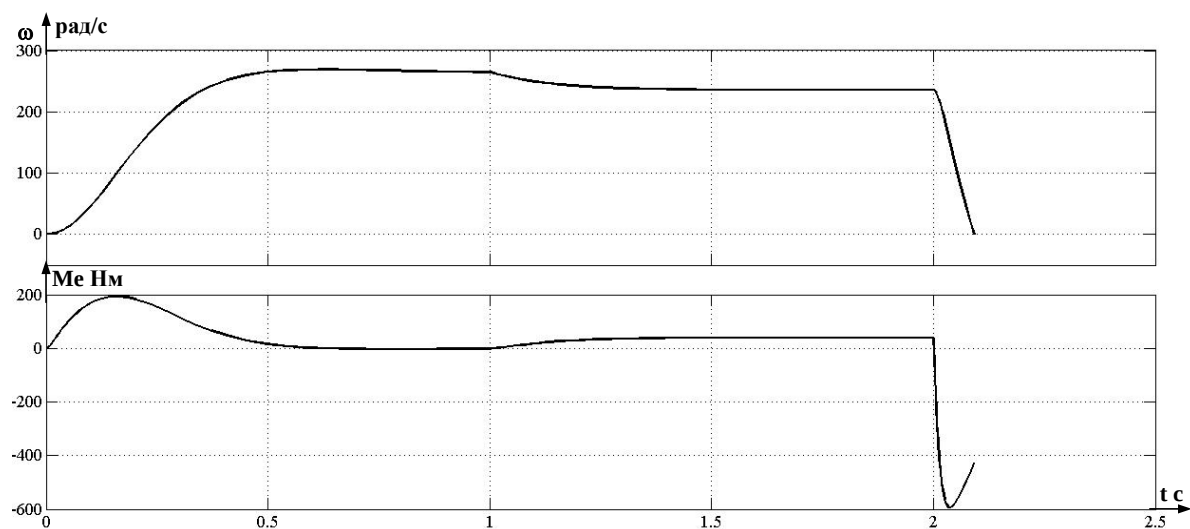


Рис. 2.5. Результаты моделирования режима торможения противовключением

Анализ рисунка 2.5 показывает, что максимальный момент (ток) при торможении противовключением увеличивается примерно в три раза. Для ограничения тока при торможении составим модель с введением дополнительного сопротивления R_f в цепь якоря.

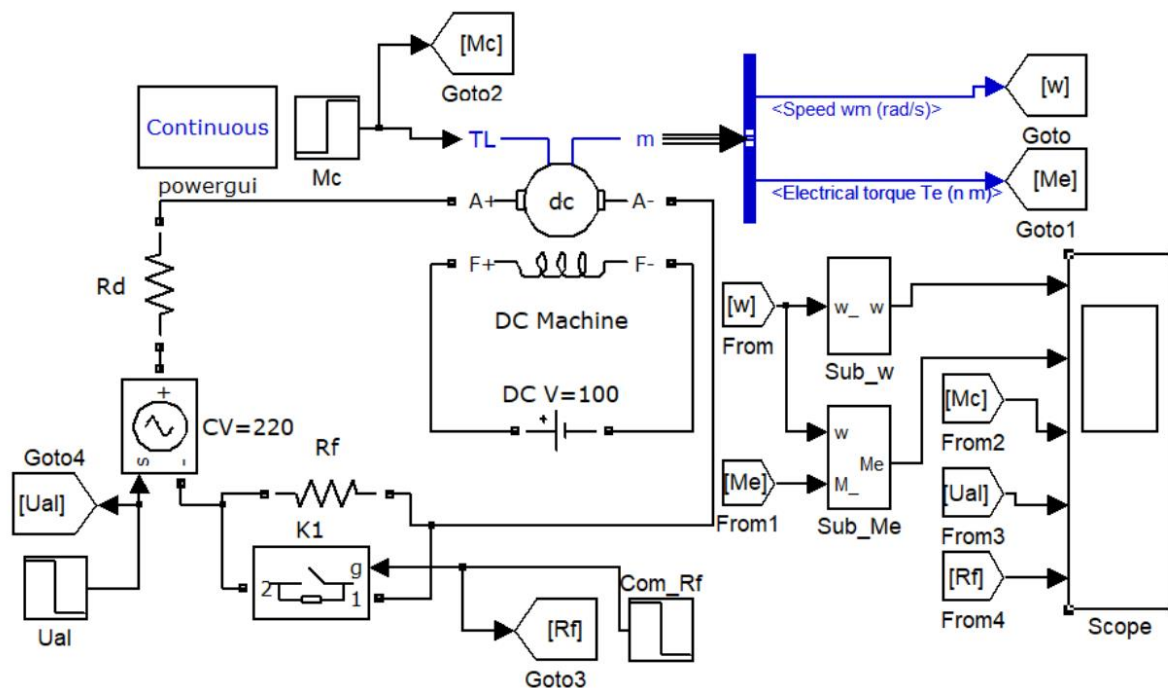


Рис. 2.6 Модель режима торможения противовключением с включением R_f

В модели используются две подсистемы схемы которых, представлены на рисунке 2.7.

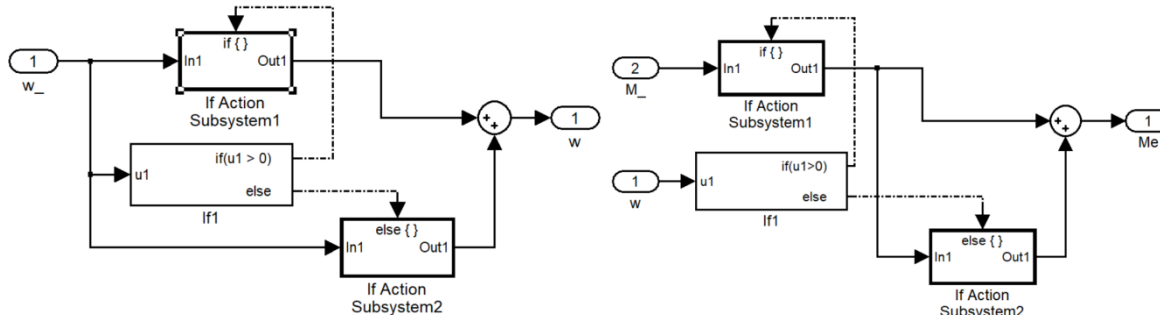


Рис. 2.7 Модели подсистем

Первая подсистема Sub_w осуществляет отключение модели при отрицательной частоте вращения. Вторая Sub_Me обнуляет значение электромагнитного момента при $\omega=0$.

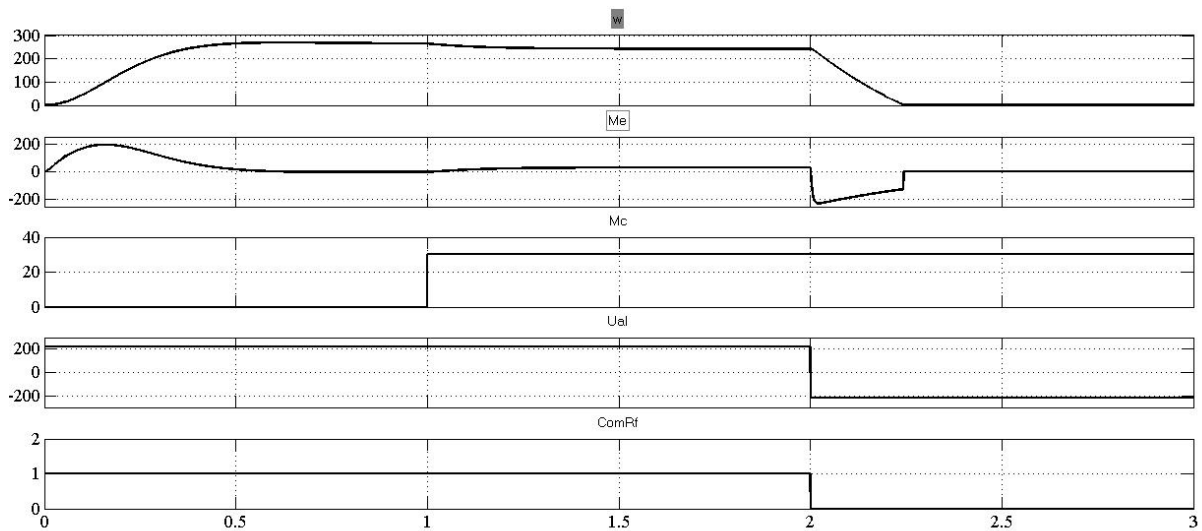


Рис. 2.8. Результаты моделирования режима торможения противовключением с включением R_f

Для исследования влияния величины дополнительного сопротивления R_f на время торможения служит модель, представленная на рис. 2.9.

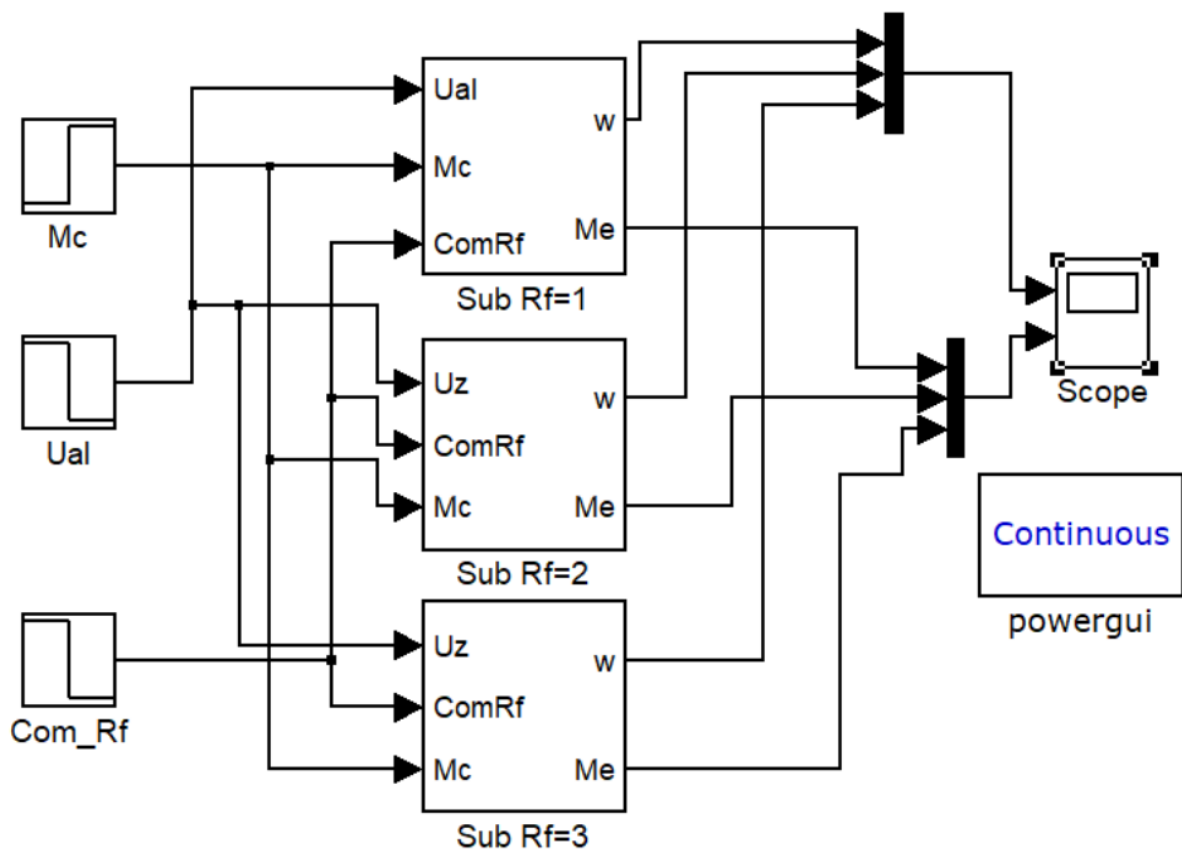


Рис. 2.9. Модель исследования влияния величины дополнительного сопротивления R_f на время торможения

Модель подсистемы «Sub Rf=1» представлена на рис.2.10. Величина $R_f=1$ Ом. В подсистеме «Sub Rf=2» $R_f=2$ Ом, и в подсистеме «Sub Rf=3» $R_f=3$ Ом.

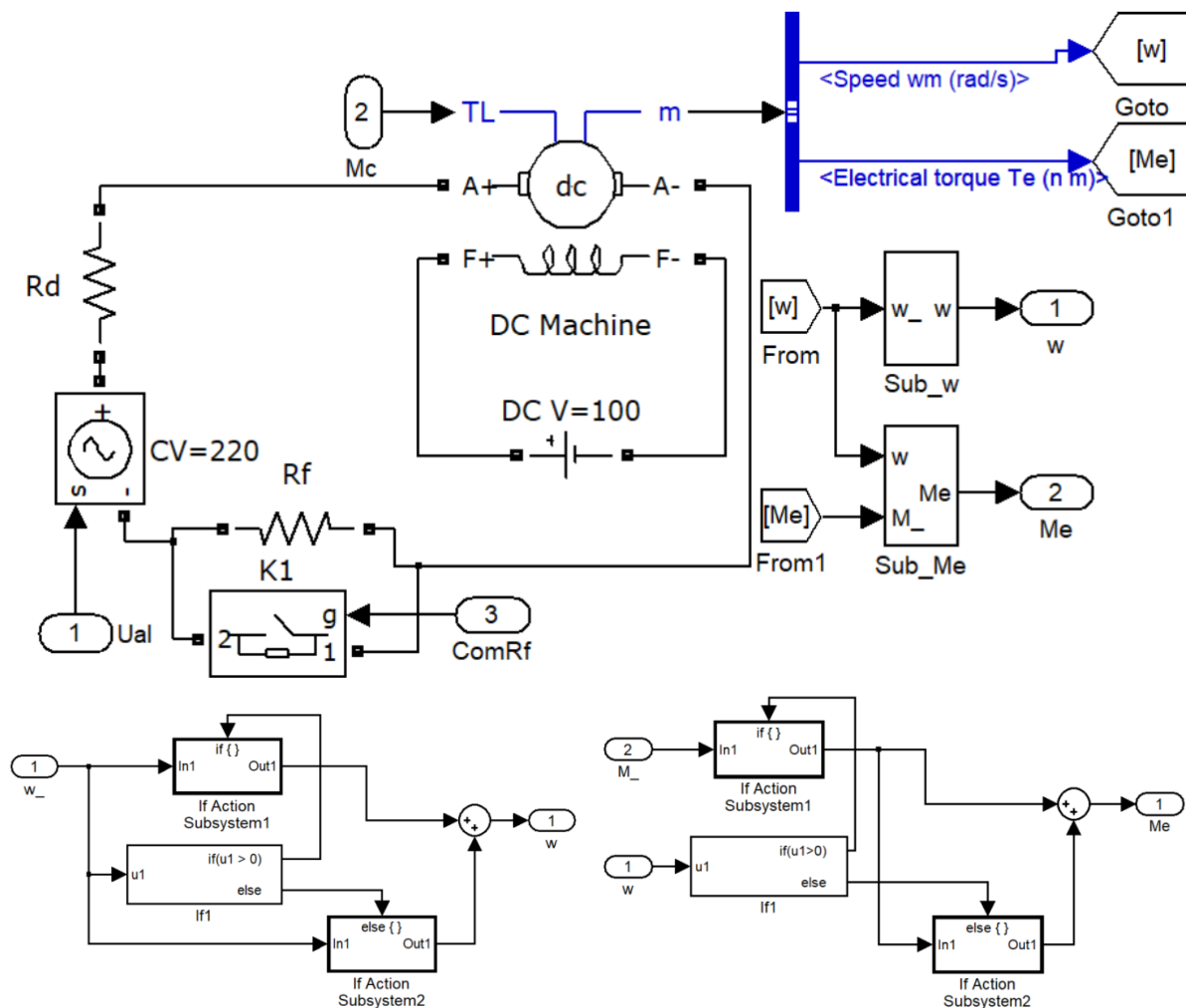


Рис. 2.10. Модель подсистемы для исследования влияния величины дополнительного сопротивления R_f на время торможения

Результаты моделирования представлены на рисунке 2.11.

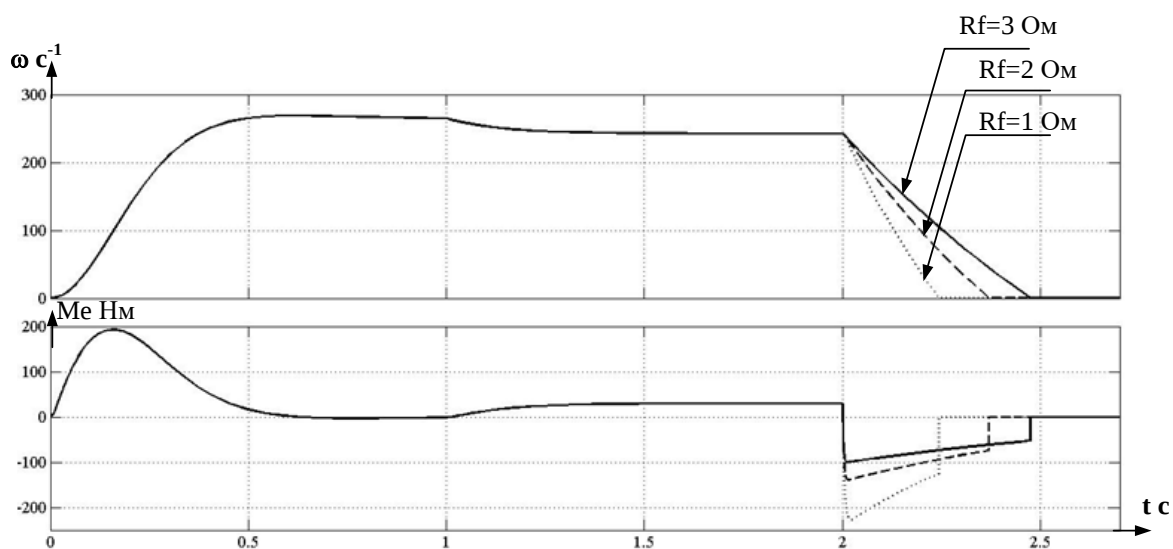


Рис. 2.11. Исследования влияния величины дополнительного сопротивления R_f на время торможения

1. Порядок выполнения работы

1. Собрать и исследовать модели.
2. Провести моделирование.
3. Сделать выводы.

2. Содержание отчёта

1. Наименование и цель работы.
2. Исследуемые схемы в MATLAB.
3. Рассчитанные характеристики.
4. Выводы по работе.

3. Контрольные вопросы

1. В чем различие двигательного режима от режимов торможения?
2. Как изменить направление момента двигателя?
3. В каких случаях необходимо использовать торможение двигателя?
4. Такой режим торможения энергетически является наиболее выгодным?

Практическое занятие 3

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Цель работы: моделирование и исследование однофазного трансформатора.

Трансформатор — это статический электромагнитный аппарат, предназначенный для преобразования переменного тока одного напряжения в переменный ток другого напряжения той же частоты.

Краткие теоретические сведения даны в приложении 2.

При подключении первичной обмотки силового трансформатора к сети первичный ток i_1 , проходя по её виткам w_1 , возбуждает в сердечнике синусоидальный магнитный поток $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$, где $\omega = 2\pi f$ — угловая частота питающего напряжения u_1 (рис.3.1). Этот поток, пронизывая витки w_1 первичной и витки w_2 вторичной обмоток, наводит в них ЭДС

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt} \text{ и } e_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt}$$

или (для действующих значений):

$$E_1 = 4,44f w_1 \Phi_m \text{ и } E_2 = 4,44f w_2 \Phi_m.$$

С вторичной обмотки снимается напряжение u_2 , которое подаётся к потребителю электрической энергии Z_H .

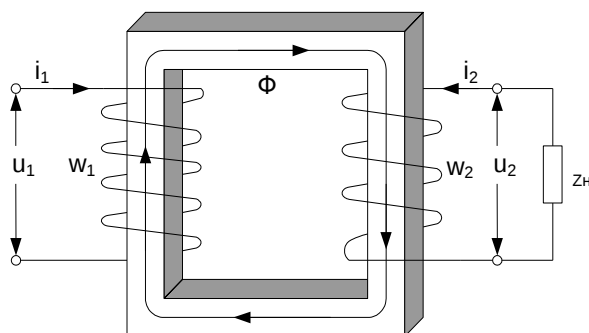


Рис. 3.1. Однофазный трансформатор

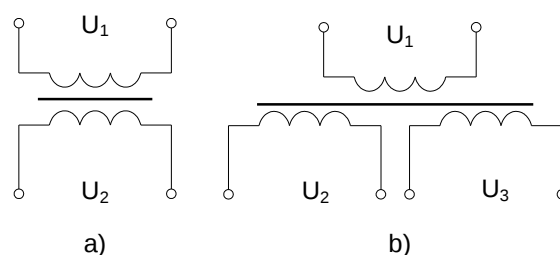


Рис. 3.2. Схемы трансформатора с одной и двумя вторичными обмотками

Схемы трансформатора с одной и двумя вторичными обмотками представлены на рис.3.2.

Ток первичной обмотки трансформатора при отключенной нагрузке ($Z_n = \infty$) является его током холостого хода I_0 . Его выражают в процентах по отношению к номинальному первичному току $I_{1н}$, т. е. $i_0 (\%) = 100I_0/I_{1н}$.

Ток холостого хода $i_0 (\%)$ в силовых трансформаторах составляет (2...5) %, а в маломощных трансформаторах может составить (20...50) % номинального тока $I_{1н}$.

Отношение ЭДС первичной обмотки трансформатора к ЭДС вторичной его обмотки, равное отношению соответствующих чисел витков обмоток, называют *коэффициентом трансформации* трансформатора [1].

$$n = E_1 / E_2 = w_1 / w_2.$$

Для определения коэффициента трансформации n , а также параметров схемы замещения и потерь мощности в трансформаторе проводят опыты холостого хода (опыт ХХ) и опыт короткого замыкания (КЗ) трансформатора.

Потери мощности при ХХ, называемые *потерями в стали* P_0 , которые затрачиваются в основном на нагрев магнитопровода от действия вихревых токов и циклического перемагничивания стали, т. е. $P_0 \approx P_\chi$.

При *опыте* КЗ в отличие от опасного аварийного короткого замыкания трансформатора, возникающего случайно при работе при

напряжении $U_1 = U_{1н}$, к первичной обмотке подводят такое пониженное напряжение $U_1 = U_k$, при котором в его обмотках устанавливаются токи, равные соответствующим номинальным значениям:

Ввиду малости магнитного потока Φ (пропорционального пониженному напряжению U_k) при опыте КЗ и соответственно потерь в стали (а они пропорциональны магнитному потоку в квадрате, т. е. Φ^2) активная мощность, потребляемая трансформатором из сети, идёт в основном на нагрев обмоток, т. е. равна электрическим потерям (называемыми *потерями в меди* P_m) в проводах обмоток:

Зависимость напряжения на зажимах вторичной обмотки при изменяемой нагрузке от тока нагрузки, т. е. $U_2 = f(I_2)$, носит название *внешней характеристики* трансформатора.

1. Порядок выполнения работы

1. Собрать схему, изображенную на рис. 3.3. Настройка блоков схемы показана на рис. 3.4 – 3.7. Выбрать параметры трансформатора в таблице 3.1.

Таблица 3.1

Номер варианта	Тип трансфор- матора	S_n , кВ·А	$U_{1н}$, В	$U_{2н}$, В	i_0 , %	u_k , %	P_0^* , Вт	P_m^* , Вт
1	ОСМ-0,1	0,100	220	12	24	9,0	1	3
2	ОСМ-0,1	0,100	220	24	24	9,0	1	3
3	ОСМ-0,1	0,100	220	42	24	9,0	1	3
4	ОСМ-0,16	0,160	220	12	23	7,0	1,5	4,2
5	ОСМ-0,16	0,160	220	24	23	7,0	1,5	4,2
6	ОСМ-0,16	0,160	220	36	23	7,0	1,5	4,2

Номер варианта	Тип трансфор- матора	S_n , кВ·А	U_{1n} , В	U_{2n} , В	i_0 , %	u_k , %	P_0^* , Вт	P_M^* , Вт
7	ОСМ-0,16	0,160	220	48	23	7,0	1,5	4,2
8	ОСМ-0,25	0,250	220	24	22	5,5	2,2	6,0
9	ОСМ-0,25	0,250	220	36	22	5,5	2,2	6,0
10	ОСМ-0,25	0,250	220	48	22	5,5	2,2	6,0
11	ОСМ-0,4	0,400	220	12	20	4,5	3,2	7,5
12	ОСМ-0,4	0,400	220	24	20	4,5	3,2	7,5
13	ОСМ-0,4	0,400	220	36	20	4,5	3,2	7,5
14	ОСМ-0,4	0,400	220	48	20	4,5	3,2	7,5
15	ОСМ-0,63	0,630	220	36	19	3,5	5,0	12
16	ОСМ-1,0	1,000	220	36	18	2,75	7,0	16
17	ОСМ-0,1	0,100	380	12	24	9,0	1	3
18	ОСМ-0,1	0,100	380	36	24	9,0	1	3
19	ОСМ-0,25	0,250	380	36	22	5,5	2,2	6,0
20	ОСМ-0,25	0,250	380	48	22	5,5	2,2	6,0
*) Условно-расчётные значения								

Провести расчёт параметров трансформатора по методике, приведенной ниже:

$$w_1 = U_{1n} / (4,44 f B_m S_m) - \text{число витков первичной обмотки},$$

где $S_m \approx k \cdot 0,8d^2$ (м²) – площадь поперечного сечения сердечника. $f = 50$ Гц – частота напряжения сети; $B_m \approx 1,3$ Тл – рекомендованная магнитная индукция в магнитопроводе (при мощности $S_n < 18$ кВ·А); $k \approx 0,75$ – коэффициент заполнения железом магнитопровода; $d \approx 0,055 \sqrt[4]{S_n}$ (м) – диаметр стержня; S_n – номинальная мощность трансформатора в кВ·А;

$R_1 \approx R_k/2$ – активное сопротивление первичной обмотки,

где $R_k = P_m / I_{1H}^2$; $I_{1H} = S_n / U_{1H}$

$L_1 = X_1 / \omega$ – индуктивность рассеяния первичной обмотки,

где $X_1 \approx X_k/2$; $X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2}$; $Z_k = U_k / I_{1H}$; $U_k = u_k U_{1H} / 100$;

$w_2 = w_1 / n$ – число витков вторичной обмотки,

где $n = U_{1H} / U_{2H}$;

$R_2 \approx R_k / (2n^2)$ – активное сопротивление вторичной обмотки;

$L_2 = X_2 / (\omega \cdot n^2)$ – индуктивность рассеяния вторичной обмотки.

Модель исследования трансформатора, дана на рис.3.3.

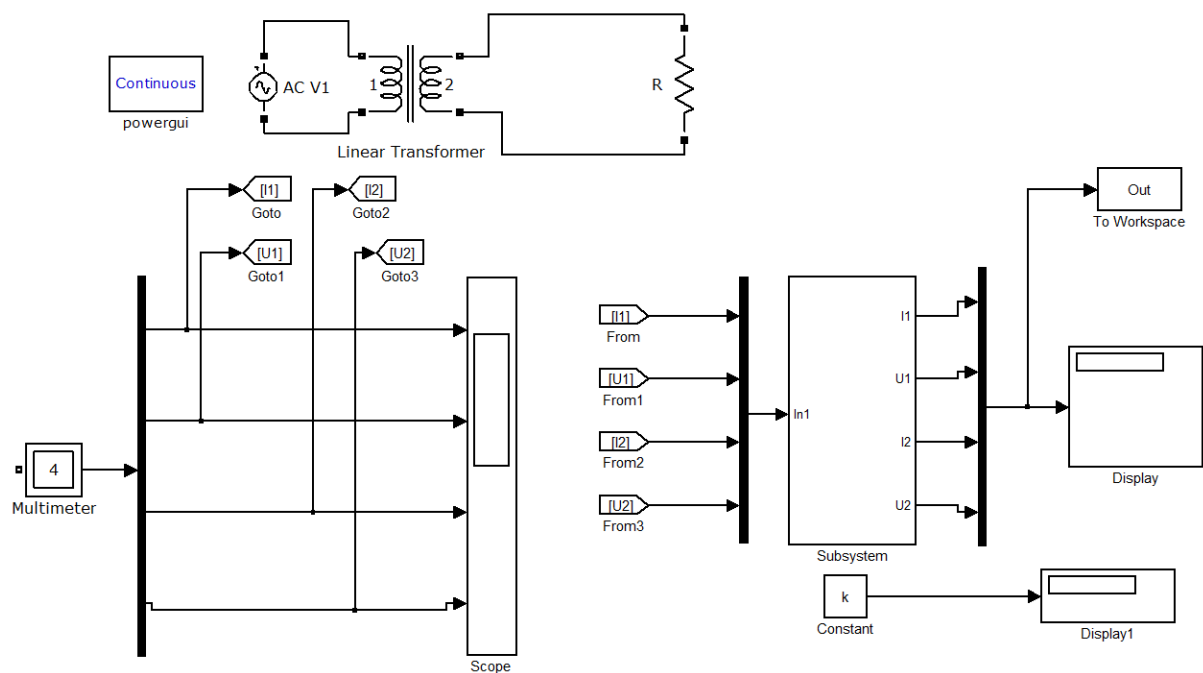


Рис. 3.3. Модель исследования трансформатора

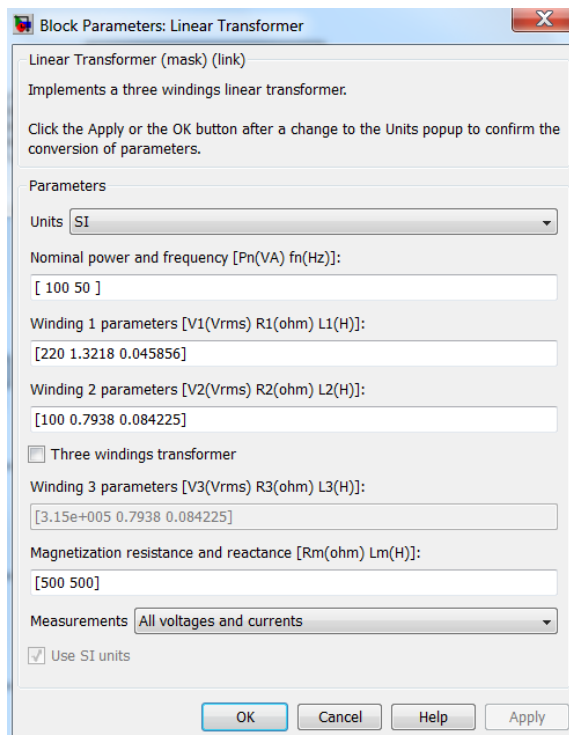


Рис. 3.4. Настройка трансформатора

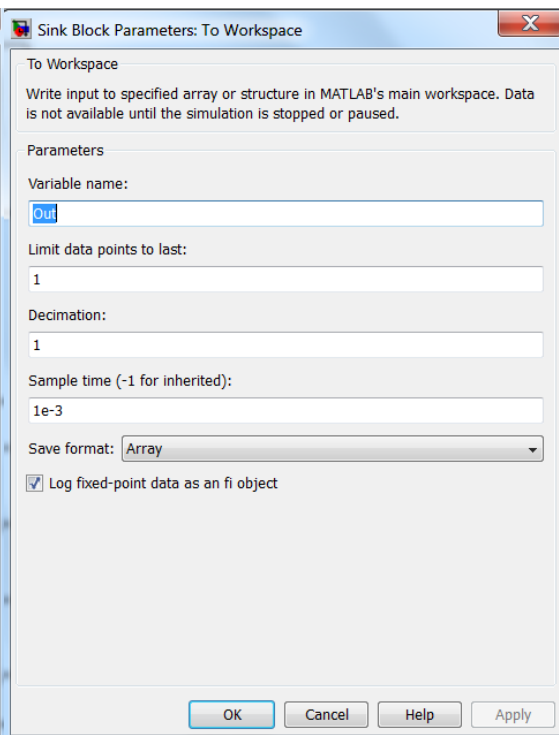


Рис. 3.5. Настройка блока To Workspace

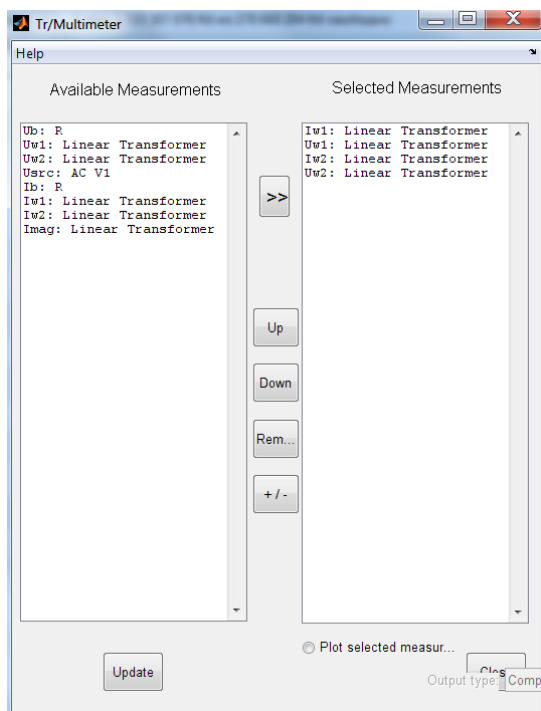


Рис. 3.6. Настройка блока Multimeter

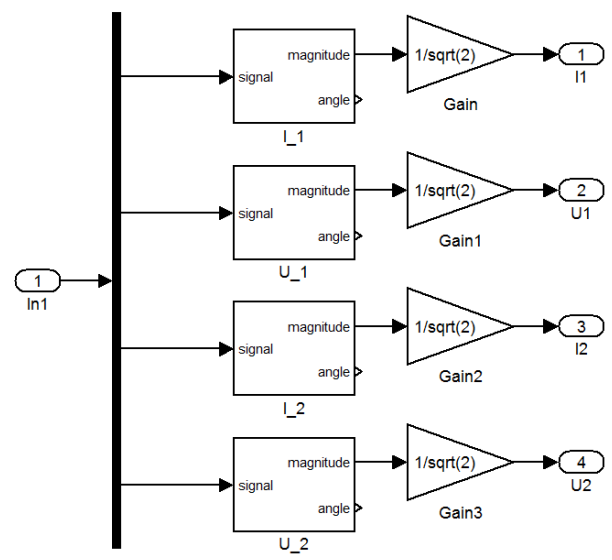


Рис. 3.7. Настройка блока Subsystem

Для расчёта внешней характеристики трансформатора необходимо собрать модель, представленную на рис. 3.8 и программу, листинг которой, дан на рис. 3.9.

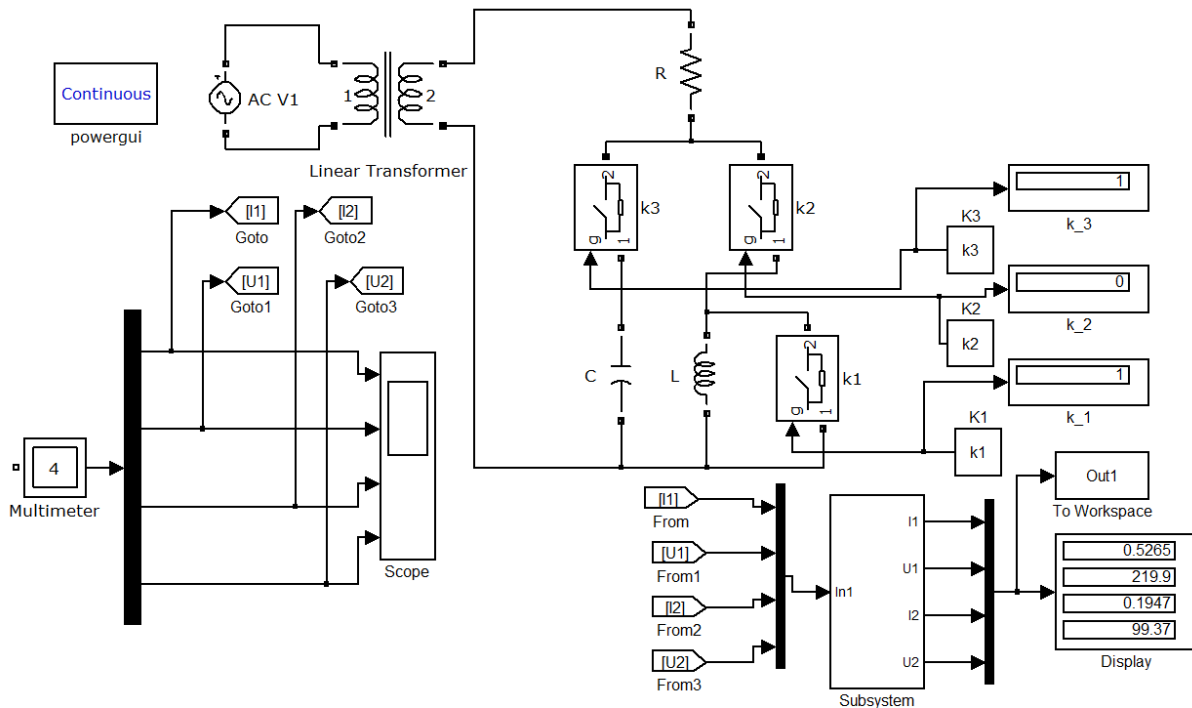


Рис. 3.8. Модель для расчёта внешней характеристики трансформатора

```

for m=0:1:2;
    if m==0 k1=1;k2=1;k3=0;% расчет для активной нагрузки
    else
        if m==1 k1=0;k2=1;k3=0; % расчет для активно-индуктивной нагрузки
        else
            if m==2 k1=1;k2=0;k3=1; % расчет для активно-емкостной нагрузки
            end
        end
    end
end
for k=0:1:50;
    R=10+10*k;
    sim('Tr1222')

```

```

A(k+1,1)=Out1(1);
A(k+1,2)=Out1(2);
A(k+1,3)=Out1(3);
A(k+1,4)=Out1(4);
end
plot(A(1:k,3),A(1:k,4),'k')
    hold on;
    grid on;
end

```

Рис. 3.9. Листинг программы, для расчета внешней характеристики

Комбинация значений k_1 , k_2 и k_3 даны в таблице 3.2.

Рассчитанные внешние характеристики трансформатора для разного типа нагрузки представлены на рис 3.10.

Таблица 3.2

k_1	k_2	k_3	Нагрузка
1	1	0	R
0	1	0	RL
1	0	1	RC

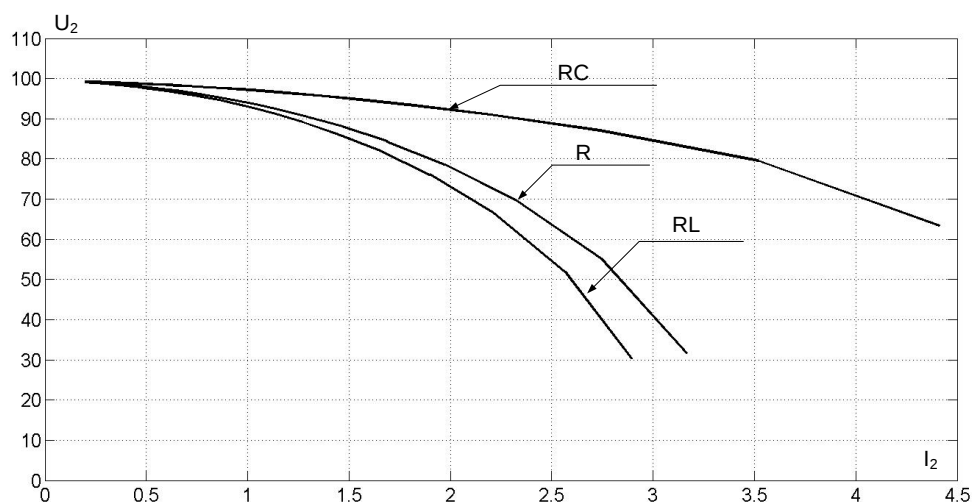


Рис. 3.10. Внешние характеристики трансформатора

1. Порядок выполнения работы

1. Провести опыт ХХ трансформатора. Рассчитать и занести в таблицу параметры ХХ трансформатора.

Установлено		Измерено				Вычислено					
$U_{1н},$	$f,$	$U_{1н},$	$U_{20},$	$I_0,$	$P,$	n	$i_0,$	$Z_0,$	$R_0,$	$X_0,$	$P_0,$
В	Гц	В	В	А	Вт		%	Ом	Ом	Ом	Вт
	50										

Рассчитать указанные параметры ХХ трансформатора.

2. Провести опыт КЗ трансформатора.

Установить ЭДС источника напряжения E такую, чтобы ток во вторичной обмотке трансформатора был равен номинальному. Данные измерений занести в таблицу;

Установлено		Измерено				Вычислено				
$E = U_k,$	$U_k,$	$I_{1н},$	$I_{2н},$	$P,$	$u_k,$	$Z_k,$	$R_k,$	$X_k,$	$P_m,$	
В	В	А	А	Вт	%	Ом	Ом	Ом	Вт	

Рассчитать указанные параметры КЗ трансформатора.

3. Снять внешние характеристики $U_2(I_2)$ трансформатора при резистивной, индуктивной и ёмкостной нагрузках при токах 0; 0,25; 0,5; 0,75; 1,0; 1,25 $I_{2н}$ ($I_{2н} \approx nI_{1н}$).

4. Начертить упрощенную Т-образную схему замещения нагруженного трансформатора. Рассчитать и построить векторные диаграммы нагруженного трансформатора при токе $I_1 = I_{1н}$ и нагрузках R , L и C .

2. Содержание отчёта

1. Наименование и цель работы.
2. Расчёт параметров модели трансформатора.
3. Результаты измерений и расчётов.
4. Упрощенная схема замещения трансформатора, его векторные диаграммы при нагрузках R , L и C и графики внешних характеристик.
5. Выводы по работе.

3. Контрольные вопросы

1. Укажите формулы расчёта коэффициента трансформации n трансформатора.
2. Как вычислить КПД трансформаторов?
3. Каким потерям мощности, в основном, соответствует показание ваттметра при опыте КЗ трансформатора?
4. Можно ли с помощью трансформатора изменить величину и частоту выходного напряжения?
5. Какие потери мощности определяют с помощью ваттметра, включенного в первичную цепь трансформатора при разомкнутой вторичной цепи?
6. Как проводится опыт холостого хода и короткого замыкания трансформатора.

Практическое занятие 4 МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Цель работы: исследование и расчет характеристик асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

Краткие теоретические сведения даны в приложении 3.

На рис.4.1 представлена модель для проведения исследования режима пуска асинхронного двигателя.

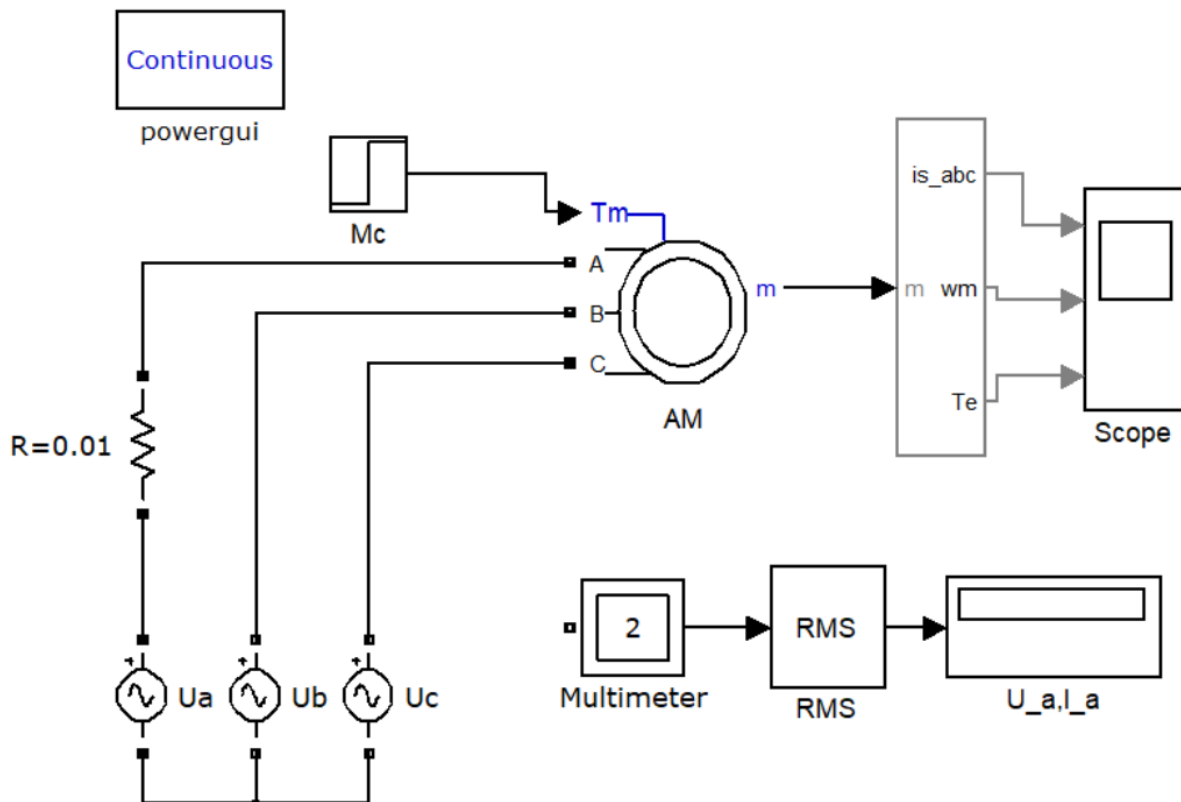


Рис. 4.1. Модель для проведения исследования режима пуска асинхронного двигателя

Данная модель содержит следующие блоки:

- источник переменного трехфазного напряжения U_a , U_b , U_c ;
- датчик тока $R = 0,01$ Ом;
- исследуемая трехфазная асинхронная машина АМ;
- блок RMS для вычисления действующих значений напряжения и тока фазы А;

- блок “Multimeter” для измерения значений напряжения и тока фазы А;
- Осциллограф.

Параметры асинхронного двигателя представлены на рис.4.2.

Asynchronous Machine (mask) (link)

Implements a three-phase asynchronous machine (wound rotor, squirrel cage or double squirrel cage) modeled in a selectable dq reference frame (rotor, stator, or synchronous). Stator and rotor windings are connected in wye to an internal neutral point.

Configuration Parameters Advanced

Nominal power, voltage (line-line), and frequency [Pn(VA), Vn(Vrms), fn(Hz)]

[3730 380 50]

Stator resistance and inductance [Rs(ohm) Lls(H)]:

[1.115 0.005974]

Rotor resistance and inductance [Rr'(ohm) Llr'(H)]:

[1.083 0.005974]

Mutual inductance Lm (H):

0.2037

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

[0.04 0 2]

Initial conditions

[1 0 0 0 0 0 0]

Рис. 4.2. Окно параметров асинхронного двигателя

Окно настройки параметров измерения переменных асинхронного двигателя показано на рис.4.3. В выпадающем меню поля «Machine type» задается тип машины. Флажками выбираются переменные для измерения.

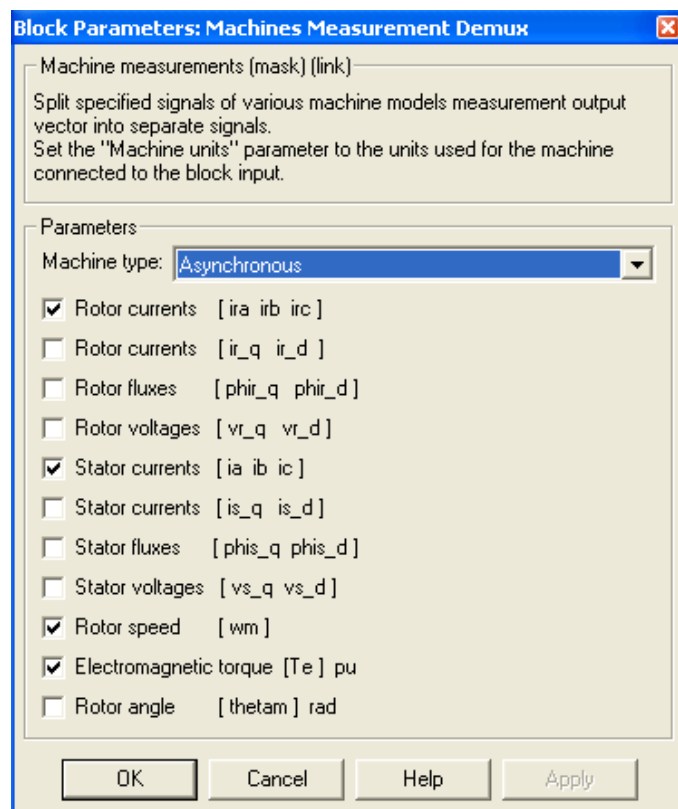


Рис. 4.3. Окно настройки параметров блока измерения

Результаты моделирования представлены на рис.4.4.

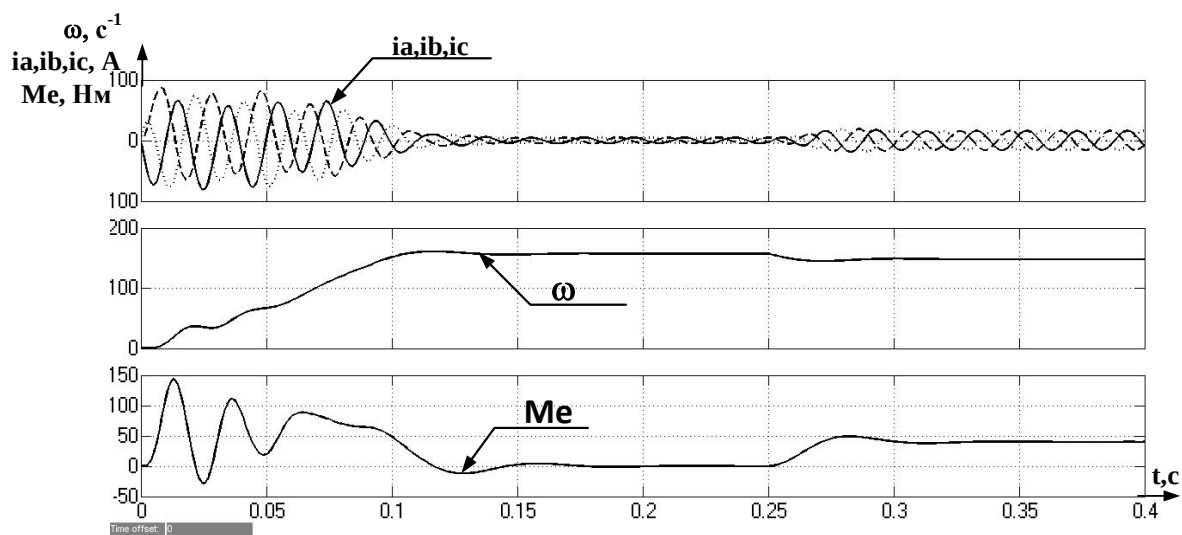


Рис. 4.4. Результаты моделирования процесса пуска

Модель для расчета рабочих характеристик асинхронного двигателя, приведена на рис.4.5.

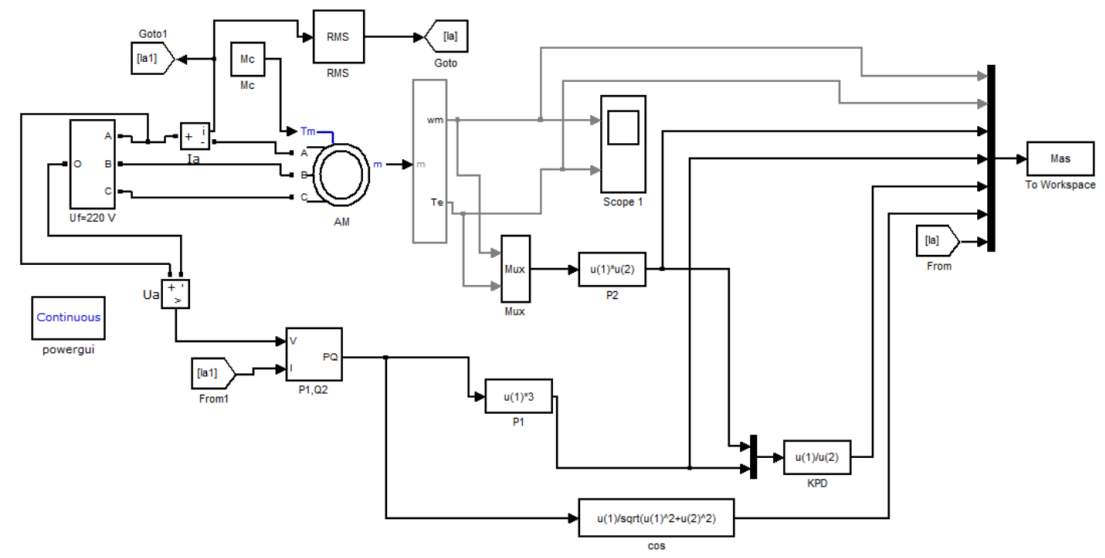


Рис. 4.5. Модель для расчета рабочих характеристик

Программа расчета рабочих характеристик представлена на рис.4.6.

for k=0:1:45;

 Mc=1*(k+1);% величина момента нагрузки;

 sim('ADcarac') % команда обращения к модели;

 A(k+1,1)=Mas(1);% w-частота вращения;

 A(k+1,2)=Mas(2);% Me-Электромагнитный момент;

 A(k+1,3)=Mas(3);% P2-мощность на валу двигателя;

 A(k+1,4)=Mas(4)*0.01;%P1- потребляемая мощность;

 A(k+1,5)=Mas(5)*100;%КПД;

 A(k+1,6)=Mas(6)*100;%cos;

 A(k+1,7)=Mas(7);% Ia-ток в фазе A обмотки двигателя;

end

plot(A(1:k,3),A(1:k,1),'k',A(1:k,3),A(1:k,2),'k',A(1:k,3),A(1:k,7),'k');

hold on;

plot(A(1:k,3),A(1:k,4),'k',A(1:k,3),A(1:k,5),'k',A(1:k,3),A(1:k,6),'k');

hold on;

grid on;

Рис. 4.6. Программа расчета рабочих характеристик

Рабочие характеристики асинхронного двигателя (рис.4.7) показывают зависимость его эксплуатационных параметров от мощности на валу P_2 . К этим параметрам относят ток I_a , активную мощность P_1 , КПД, частоту вращения ротора и коэффициент мощности двигателя.

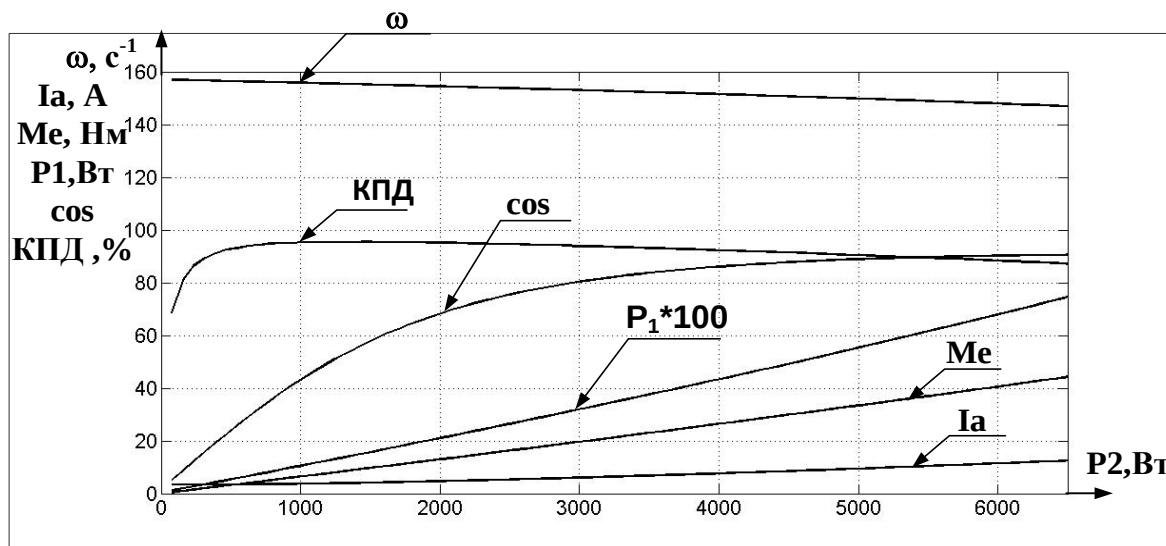


Рис. 4.7. Рабочие характеристики асинхронного двигателя

Модель для расчета механических характеристик дана на рисунке 4.8.

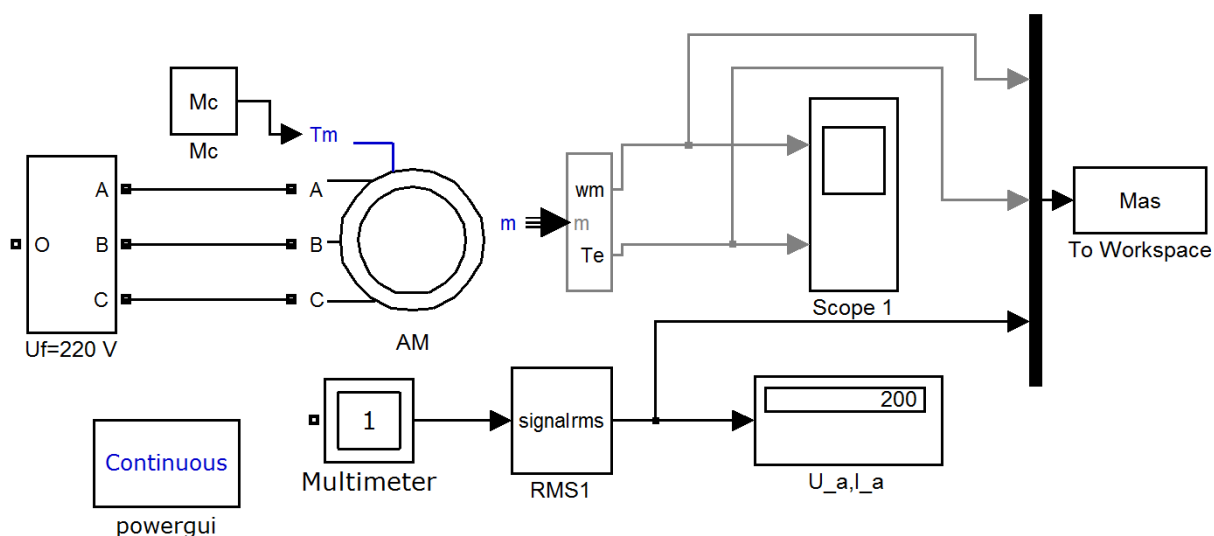


Рис. 4.8. Модель для расчета механических характеристик

Программа расчета механических характеристик асинхронного двигателя представлена на рис.4.9.

```
for k1=0:1:2;

    U=220-k1*10; );% U-напряжение в фазах статорной обмотки двигателя;

    for k=0:1:79;

        Mc=0.5*(k+1);% величина момента нагрузки;

        sim('ADcaracM') % команда обращения к модели;

        A(k+1,1)=Mas(1);% w-частота вращения;

        A(k+1,2)=Mas(2);% Me-Электромагнитный момент;

        A(k+1,3)=Mas(3);% Ua-напряжение в фазе A обмотки двигателя;

    end

    plot(A(1:k,2),A(1:k,1),'k');

    hold on;

end

grid on;
```

Рис. 4.9. Программа расчета механических характеристик

Механические характеристики асинхронного двигателя для разных величин напряжения питания представлены на рис.4.10.

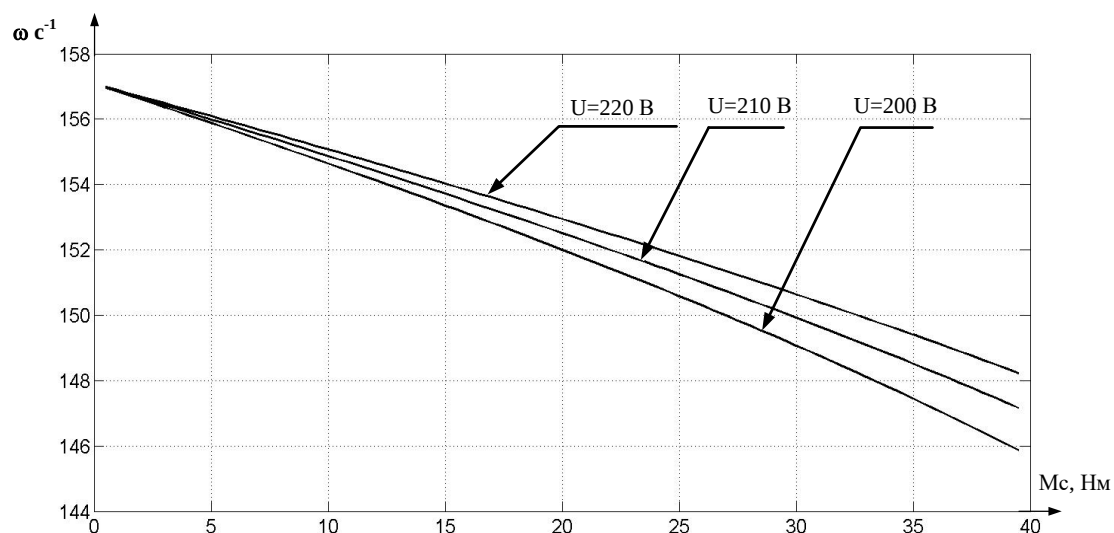


Рис. 4.10. Механическая характеристика асинхронного двигателя при $U=var$

Рассмотрим построение механических характеристик асинхронного двигателя при выполнении условия $U/f=const$. Модель представлена на рисунке 4.11.

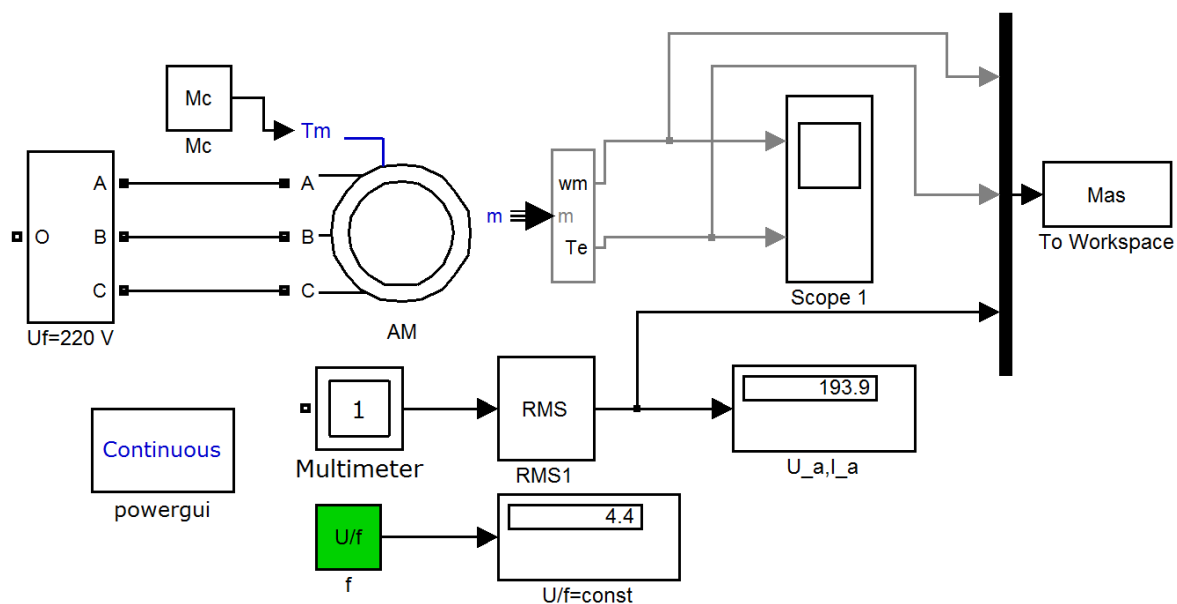


Рис. 4.11. Модель для расчета механических характеристик АД при выполнении условия $U/f=const$

В блоках модели (рис. 4.11) U_f , AM , $RMS1$ вместо частоты 50 Гц необходимо поставить переменную f . Программа расчета механических характеристик при выполнении условия $U/f=\text{const}$ представлена на рис. 4.12.

```
for k1=0:1:2;
    U=220-k1*10;
    f=U/4.4;
    for k=0:1:99;
        Mc=0.5*(k+1);% величина момента нагрузки;
        sim('ADcaracMF') % команда обращения к модели;
        A(k+1,1)=Mas(1);%  $\omega$ -частота вращения;
        A(k+1,2)=Mas(2);%  $M_e$ -Электромагнитный момент;
        A(k+1,3)=Mas(3);%  $U_a$ -напряжение в фазе А обмотки двигателя;
    end
    plot(A(1:k,2),A(1:k,1),'k');
    hold on;
end
grid on;
```

Рис. 4.12. Программа расчета механических характеристик при $U/f=4.4$

При изменении частоты (f) тока значение максимального вращающего момента будет постоянным, а механическая характеристика двигателя- жесткой (рис 4.13) при выполнении условия $U/f=\text{const}$.

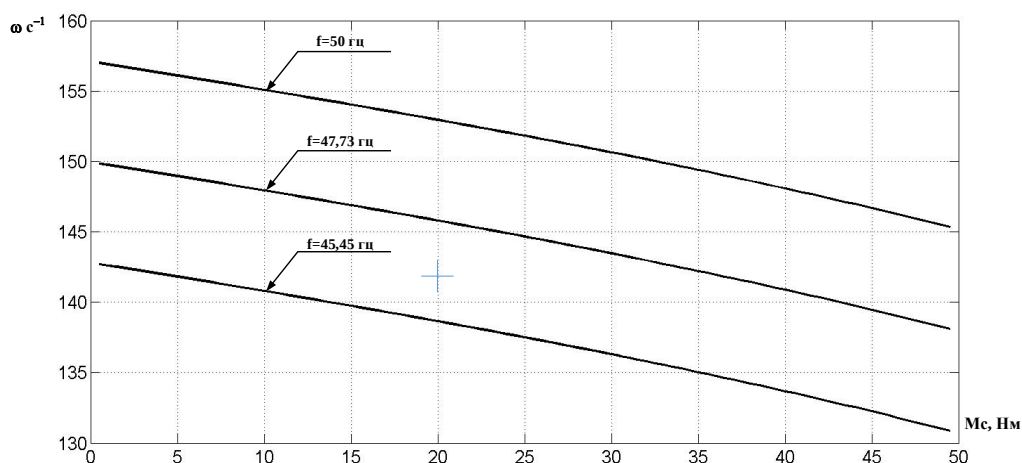


Рис. 4.13. Механических характеристик при выполнении условия $U/f=4.4$; $U=220$ В

1. Порядок выполнения работы

1. Собрать и исследовать рассмотренные модели
2. Провести расчет характеристик системы
3. Сделать выводы.

2. Содержание отчёта

1. Наименование и цель работы.
2. Исследуемые схемы в MATLAB.
3. Рассчитанные характеристики.
4. Выводы по работе.

3. Контрольные вопросы

1. В чем различие статических и динамических характеристик асинхронного двигателя?
2. Назовите преимущества и недостатки асинхронного двигателя.
3. С какой целью в АД проводят регулирование частоты вращения при выполнении условия $U/f=\text{const}$?
4. Какие потери имеются в асинхронном двигателе?
5. Какие потери определяются при опыте по исследованию холостого хода?
6. Как определяются потери в обмотках статора и ротора?
7. Что такое добавочные потери?
8. Учитываются ли магнитные потери ротора при скольжениях $0 < S < S_H$?
9. Что обозначает термин постоянные и переменные потери?

Практическое занятие 5

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧИХ И ПУСКОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННОГО ТРЕХФАЗНОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ПОДКЛЮЧЕНИИ К ОДНОФАЗНОЙ СЕТИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Краткие теоретические сведения даны в приложении 4.

В практике часто возникает необходимость за неимением однофазного двигателя включать трехфазный двигатель в однофазную сеть. Можно использовать следующие схемы (Рис.5.1), которые обеспечивают мощности до 75 % номинальной мощности трехфазной машины. Схема включения в однофазную сеть трёхфазного асинхронного двигателя с обмотками статора, соединёнными по схеме «звезда» (а) или «треугольник» (б) даны на рис. 5.1.

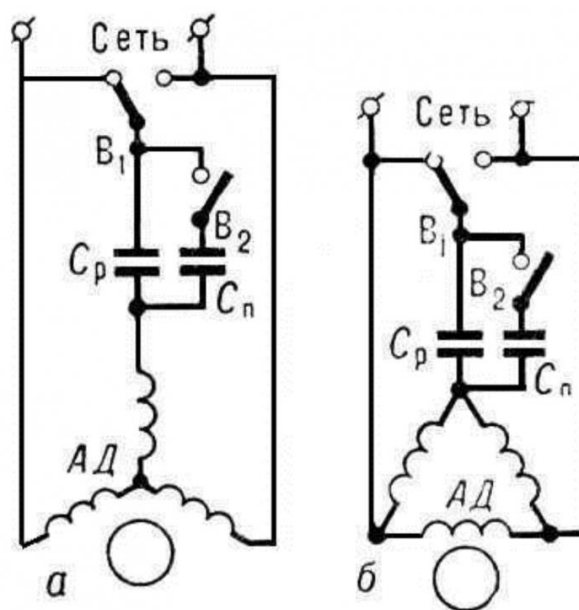


Рис. 5.1. Схема включения в однофазную сеть трёхфазного асинхронного Двигателя

В1 и В2 — выключатели;
Ср — рабочий конденсатор;
Сп — пусковой конденсатор;
АД — асинхронный электродвигатель.

В случае, когда трехфазный электродвигатель необходимо подключить к однофазной сети, существует два возможных варианта

подключения: «звезда» и «треугольник», причем наиболее предпочтительным во многих случаях является вариант «треугольник». Приблизительный расчет для данного типа соединения производится по следующей формуле:

$C_{\text{раб.}} = k \cdot I_{\text{ф}} / U_{\text{сети}}$, где:

k – коэффициент, зависящий от соединения обмоток.

$I_{\text{ф}}$ – номинальный фазный ток электродвигателя АД.

$U_{\text{сети}}$ – напряжение однофазной сети.

Для схемы соединения «Звезда» $k=2800$, для схемы соединения «Треугольник» $k=4800$. Для определения пусковой емкости $C_{\text{пуск.}}$ исходят из пускового момента. В случае если пуск двигателя происходит без нагрузки, пусковая емкость не требуется. Для получения пускового момента, близкого к номинальному, достаточно иметь пусковую емкость, определяемую соотношением:

$$C_{\text{пуск}} = (2.5 - 3) C_{\text{раб.}}$$

Рабочее напряжение конденсаторов должно быть в 1,5 раза выше напряжения сети. Однофазные электрические машины (асинхронные) момент не теряют. Однако пусковой момент у них достаточно низок. Это обстоятельство нужно учитывать при проектировании. При использовании конденсаторов в качестве пусковых и/или рабочих для пуска трехфазных двигателей придется смириться с потерей момента и мощности.

Модель для исследования пусковых характеристик асинхронного трехфазного двигателя при подключении к однофазной сети переменного тока дана на рис 5.2.

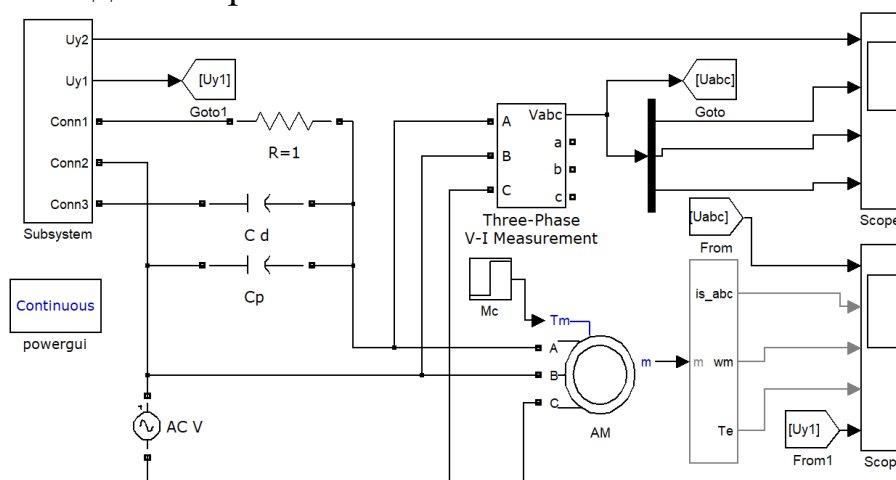


Рис. 5.2. Модель для исследования пусковых характеристик асинхронного трехфазного двигателя

Настройка модели «Subsystem» показана на рис 5.2а и 5.2б

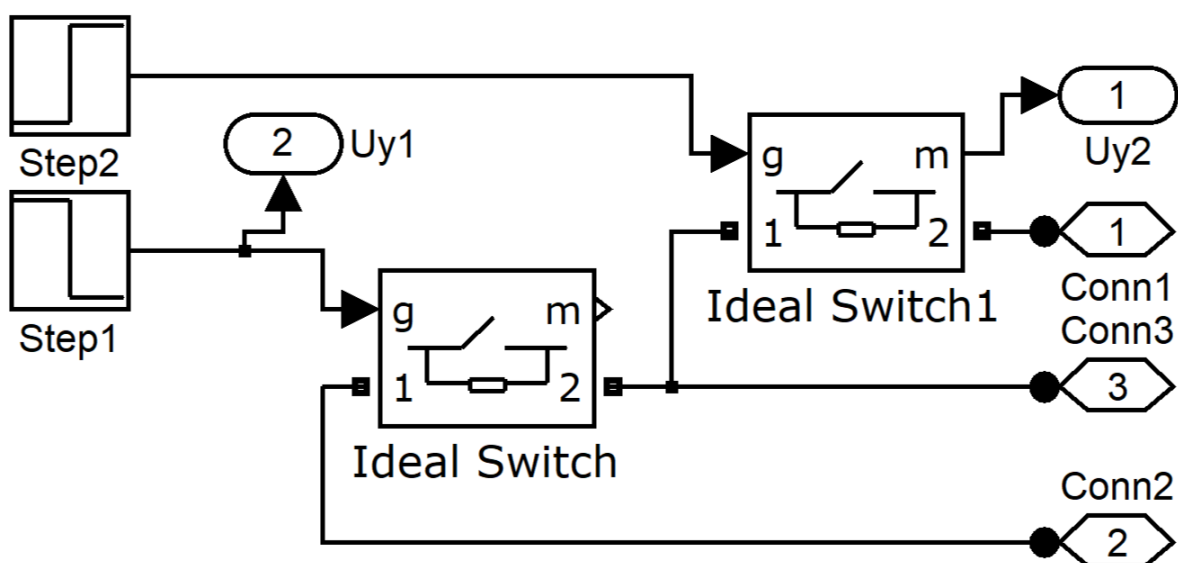


Рис. 5.2а. Модель Subsystem

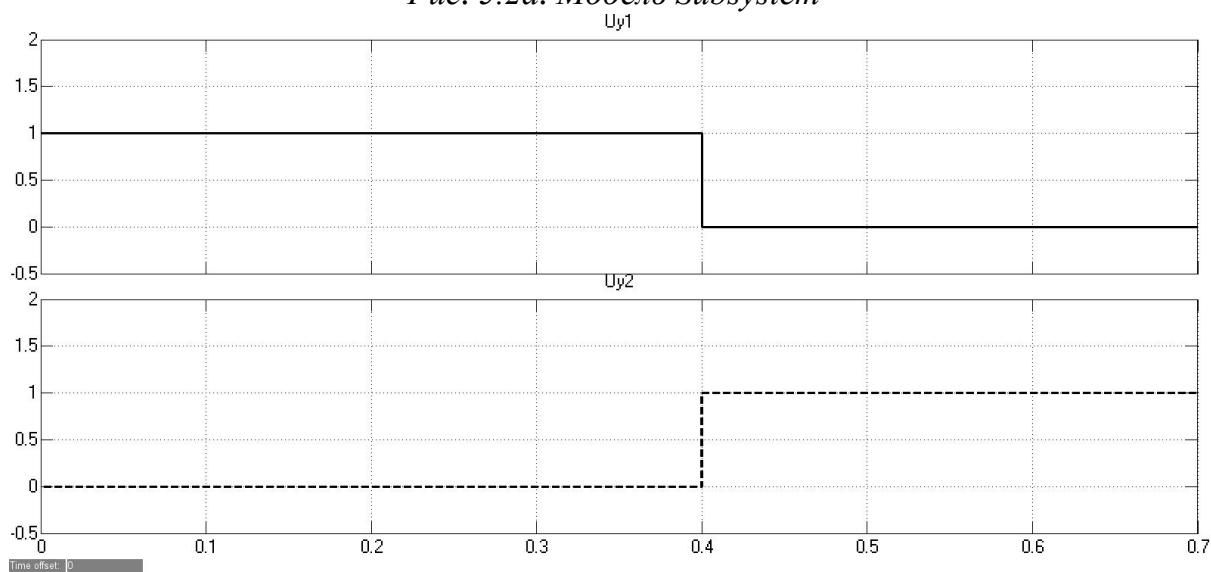


Рис. 5.2б. Сигналы управления подключением пусковой (C_d) и рабочей (C_p) емкости

Пусковые характеристики асинхронного трехфазного двигателя представлены на рис 5.3. Отключение пусковой емкости происходит в момент времени 0.4 секунды. В это же время она подключается для разряда к активному сопротивлению R ($R = 1 \text{ Ом}$). При $t = 0.6$ секунды происходит изменение момента сопротивления с нуля до 50 Нм.

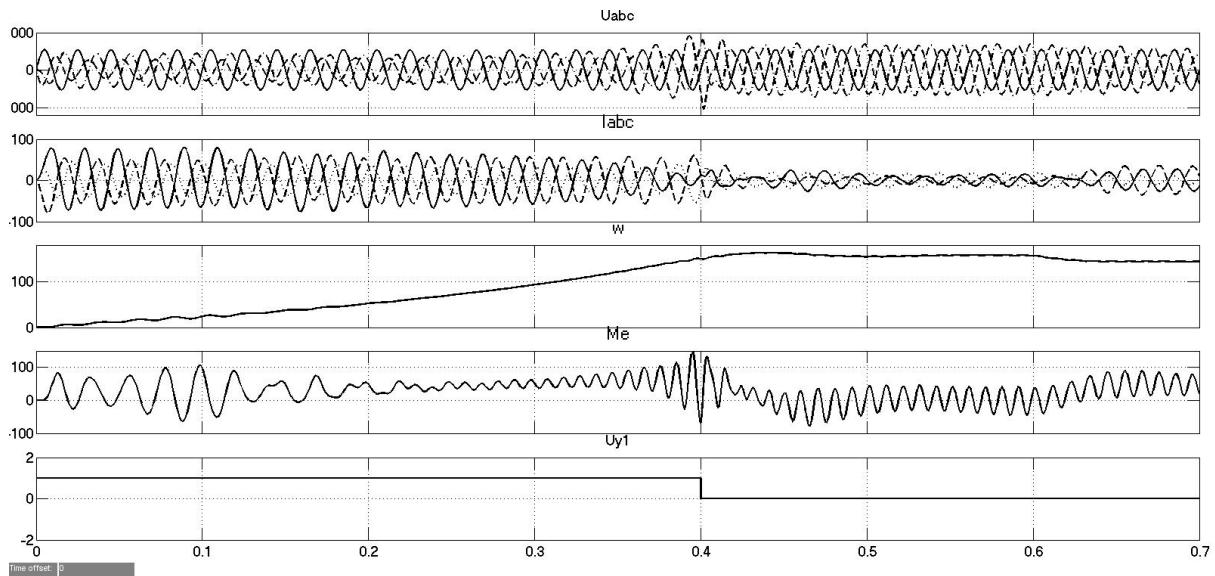


Рис. 5.3. Пусковые характеристики асинхронного трехфазного двигателя

Для расчета рабочих характеристик асинхронного двигателя была разработана модель и программа, представленные на рис 5.4 и 5.5.

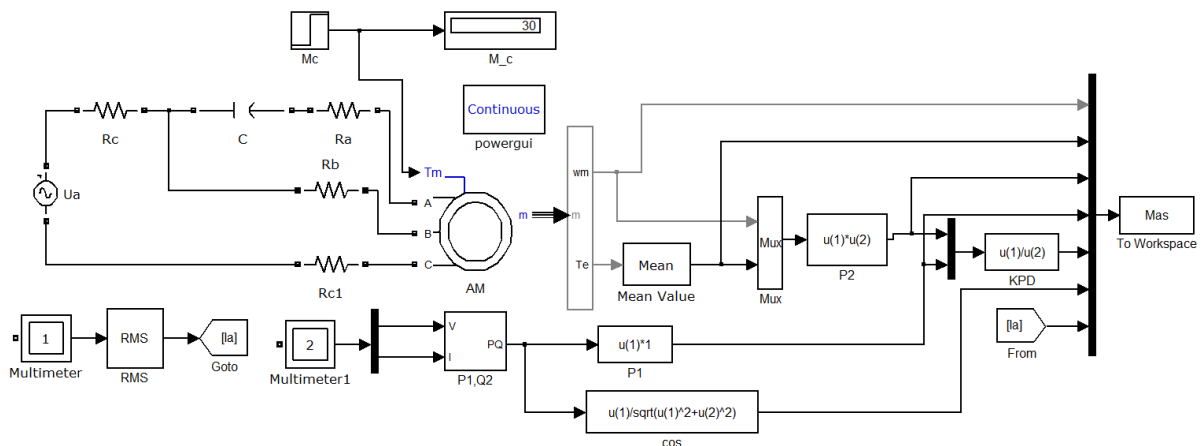


Рис. 5.4. Модель для исследование рабочих характеристик асинхронного трехфазного двигателя

```

for k=0:1:20;
    Mc=1.5*k;% величина момента нагрузки;
    sim('ADcarac2ph') % команда обращения к модели;
    A(k+1,1)=Mas(1)*0.1;% частота вращения ротора;
    A(k+1,2)=Mas(2);% Электромагнитный момент;

```

```

    A(k+1,3)=Mas(3);% Мощность на валу двигателя;
    A(k+1,4)=Mas(4)*0.01;% потребляемая активная мощность;
    A(k+1,5)=Mas(5)*100;% КПД
    A(k+1,6)=Mas(6)*100;% cos
    A(k+1,7)=Mas(7);%ток статора;
end
plot(A(1:k,3),A(1:k,7),'k-.');
hold on;
plot(A(1:k,3),A(1:k,5),'r:');
hold on;
plot(A(1:k,3),A(1:k,1),'c',A(1:k,3),A(1:k,4),'g',
A(1:k,3),A(1:k,2),'m');
hold on;% — обеспечивает продолжение вывода графиков в текущее окно,
        %что позволяет добавлять последующие графики к уже существующим;
grid on;%добавляет сетку к текущему графику;

```

Рис. 5.5. Программа для расчета рабочих характеристик асинхронного трехфазного двигателя

Рассчитанные рабочие характеристики асинхронного трехфазного двигателя при подключении к однофазной сети переменного тока даны на рисунке 5.6.

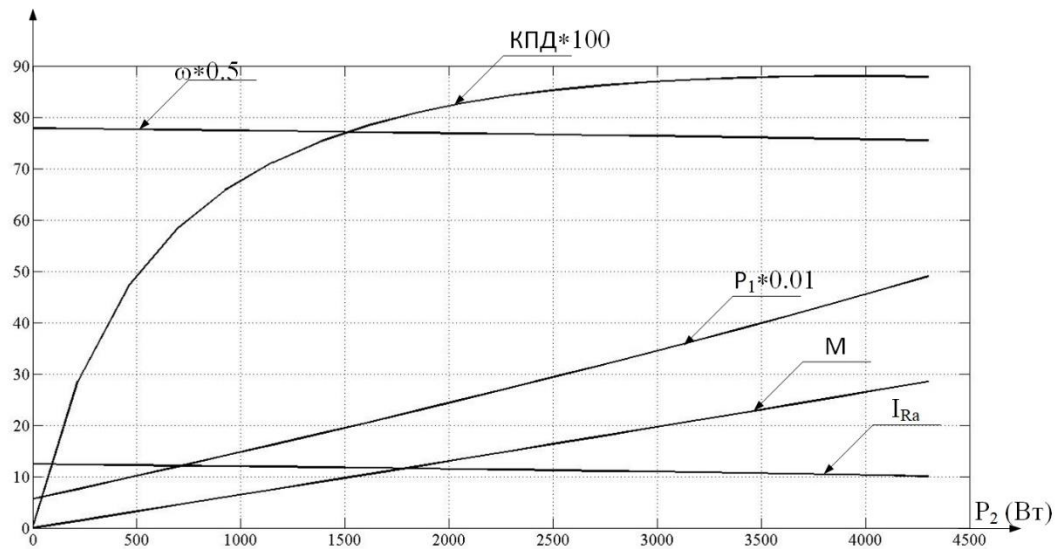


Рис. 5.6. Рабочие характеристики асинхронного трехфазного двигателя при подключении к однофазной сети переменного тока

1. Порядок выполнения работы

1. Собрать и исследовать рассмотренные модели.
2. Провести расчет рассмотренных характеристик.
3. Сделать выводы.

2. Содержание отчёта

1. Наименование и цель работы.
2. Исследуемые схемы в MATLAB.
3. Рассчитанные характеристики.
4. Выводы по работе.

3. Контрольные вопросы

1. Какое назначение конденсаторов при питании асинхронного трехфазного двигателя от однофазной сети?
2. Как изменить направление вращения двигателя, включенного по схеме рис. 5.1?
3. Какие потери имеются в асинхронном двигателе?
4. Как определяются потери в обмотках статора и ротора?
5. Что такое добавочные потери?
6. Что обозначает термин постоянные и переменные потери?

Практическое занятие 6

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Цель работы: исследование и расчет характеристик синхронного двигателя.

Краткие теоретические сведения даны в приложении 5.

Синхронный двигатель (СД) [3] применяется в системах автоматизации, требующих строго стабильной частоты вращения. Характерный признак синхронного двигателя - вращение ротора с синхронной частотой независимо от нагрузки на валу.

$$n_1 = f_1 60/p, \text{ где}$$

p - число пар полюсов;

f_1 – частота напряжения питания СД

Поэтому синхронные двигатели используют в системах автоматизации для привода механизмов, требующих строго стабильной частоты вращения [5].

Синхронный двигатель, как и асинхронный, состоит из неподвижного статора и вращающегося ротора, разделенных воздушным зазором (у синхронных двигателей этот зазор несколько больше) (приложение 5). Существуют конструктивные разновидности исполнения синхронных двигателей малой мощности, отличающиеся в основном устройством ротора: явнополюсные с электромагнитным возбуждением, явнополюсные с возбуждением постоянными магнитами, явнополюсные реактивные (с невозбужденным ротором).

Обычно, синхронный двигатель с постоянными магнитами (СДПМ) с распределенной обмоткой – машины с синусоидальной обратной ЭДС, с сосредоточенной – с трапецеидальной. На форму кривой ЭДС также влияет конструкция ротора. Вращающаяся часть с явно выраженными полюсами наводит трапецеидальную ЭДС, для ее приближения к форме «синус» полюсные наконечники выполняют скошенными. Рассмотрим методы управления СДПМ принцип дей-

ствия СДПМ не отличается от стандартных синхронных электрических машин. Вращение ротора осуществляется при сцеплении магнитного поля роторов с крутящимся магнитным полем, наводимым обмотками неподвижной части двигателя. Отличие – в поле вращающегося узла, оно создается не обмотками, на которые подается постоянный ток, а постоянными магнитами. При этом скольжение ротора отсутствует, его скорость равна частоте оборотов магнитного поля статора.

Запуск СДПМ не может осуществляться прямым подключением к электросети, для управления электрической машиной необходим частотный преобразователь или сервосистема. Рассмотрим базовые способы управления приводами на базе синхронных двигателей с постоянными магнитами. Различают 2 базовых принципа управления электродвигателями такого типа: трапецеидальное (коммутацией обмоток) и синусоидальное (полеориентированное, прямое управление моментом).

Коммутация обмоток СДПМ – наиболее простой метод. За счет простоты схемы такой способ активно применяют в приводах, где не требуется особо точное управление. Различают два способа трапецеидального управления – с обратной связью и без нее. Последний метод практически не применяют в приводах с переменной нагрузкой из-за потери управления.

Регулирование момента и частоты с обратной связью реализовывается при помощи датчиков положения вала или путем вычисления угла поворота вала по уже имеющимся функциям. Такие схемы позволяют организовать достаточно точное управление, однако, обладают некоторыми недостатками:

1. Требуют ввода в схему датчиков Холла или применения контроллеров большей вычислительной мощности.
2. Не подходят при работе двигателя на малых оборотах.
3. Не обеспечивают отсутствие пульсации момента.

Для более требовательных приводов используют полеориентированное управление. Способ позволяет плавно изменять скорость и момент на валу СДПМ. Полеориентированное управление также реа-

лизуется на базе индуктивных, оптических, магниторезистивных датчиков положения или вычислительного устройства. В последнем случае положение вала рассчитывается по величине обратной ЭДС.

Методы управления СДПМ выбирают, исходя из технических задач электропривода и экономической эффективности. Для оборудования с несложными алгоритмами работы обычно выбирают трапецеидальное управление с датчиками обратной связи. Приводы механизмов или устройств, работающих с переменной нагрузкой, высокими требованиями к точности, времени отработки управляющего сигнала, оснащают СДПМ с полеориентированным управлением.

Синхронные двигатели на постоянных магнитах обладают управляемостью электрических машин постоянного тока и простотой конструкции асинхронных электродвигателей.

Рассмотрим модель СДПМ (рис 6.1).

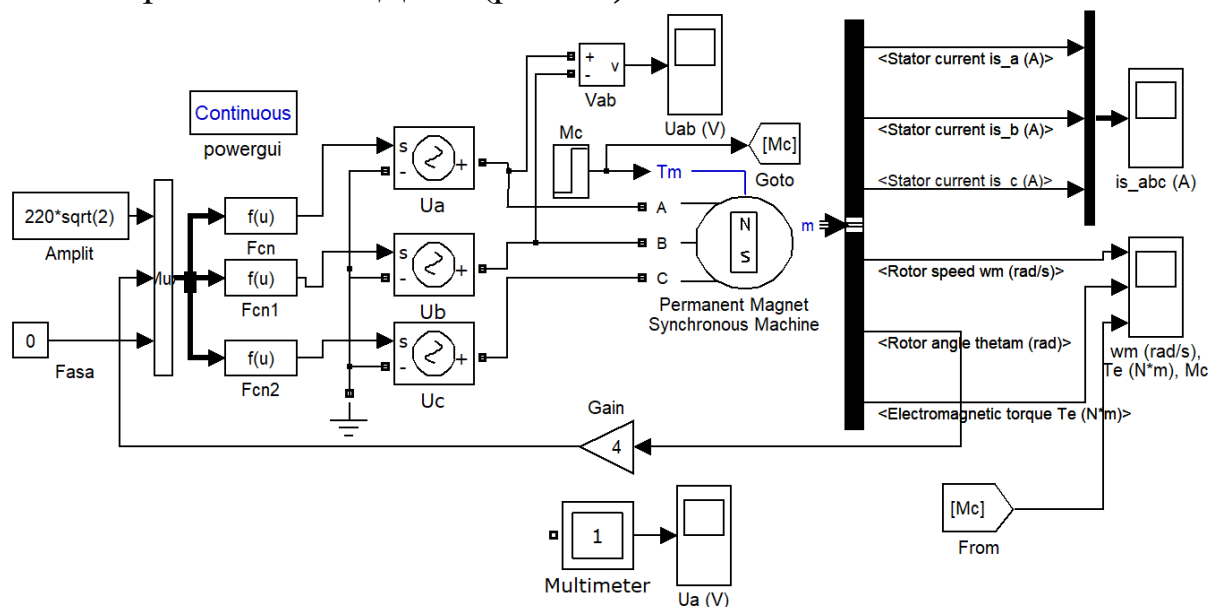


Рис. 6.1. Модель СДПМ

Настройка напряжения Ua, Ub, Uc дана на рисунке 6.2.

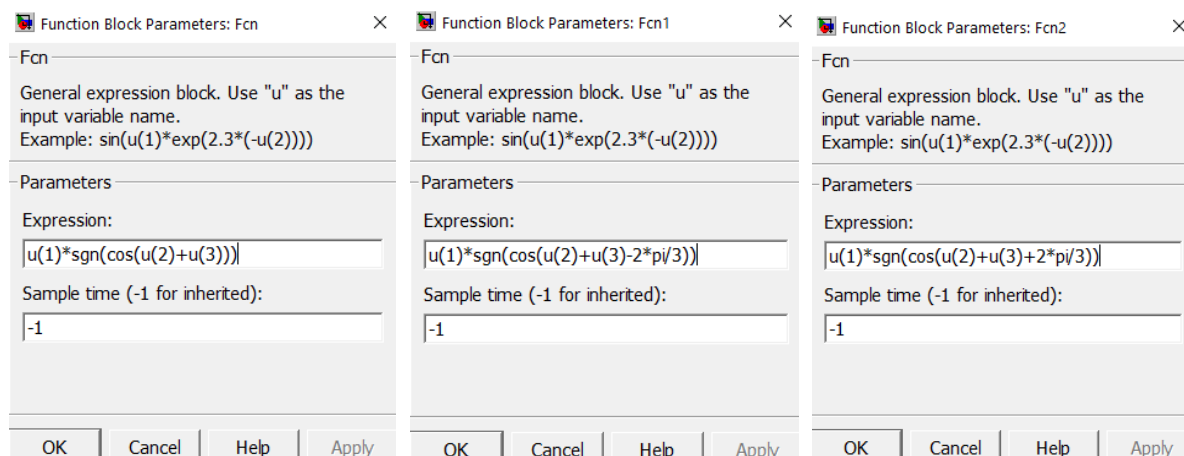


Рис. 6.2. Настройка напряжения U_a , U_b , U_c

Конфигурация параметров СДПМ представлена на рисунке 6.3.

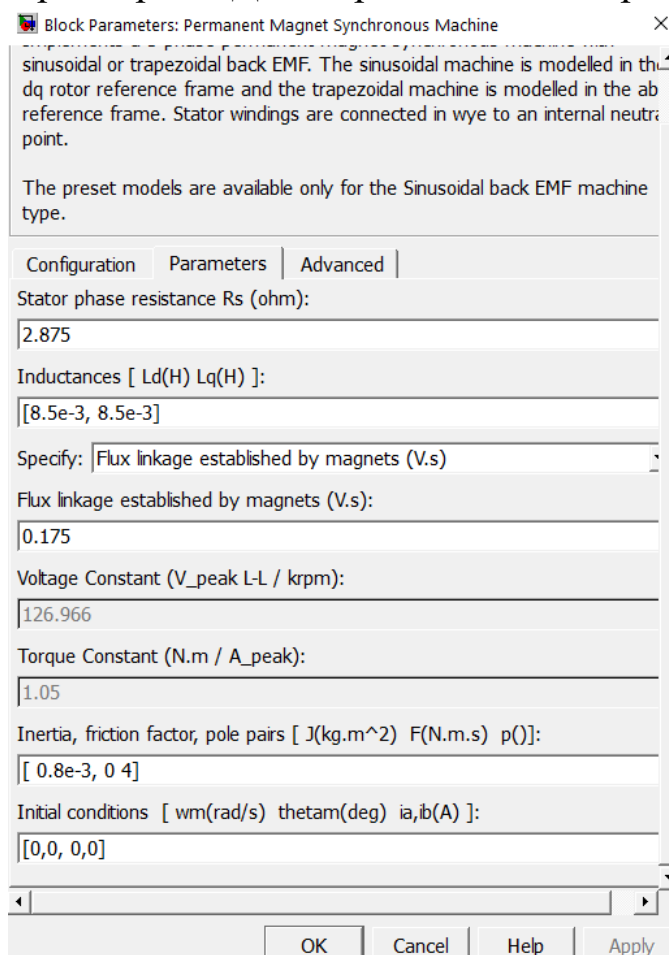


Рис. 6.3. Параметры СДПМ

Результаты моделирования пуска СДПМ показаны на рисунке 6.4. Пуск начинается при моменте сопротивления M_c равным нулю. При $t=0.7$ происходит наброс момента сопротивления ($M_c=15$ Нм)

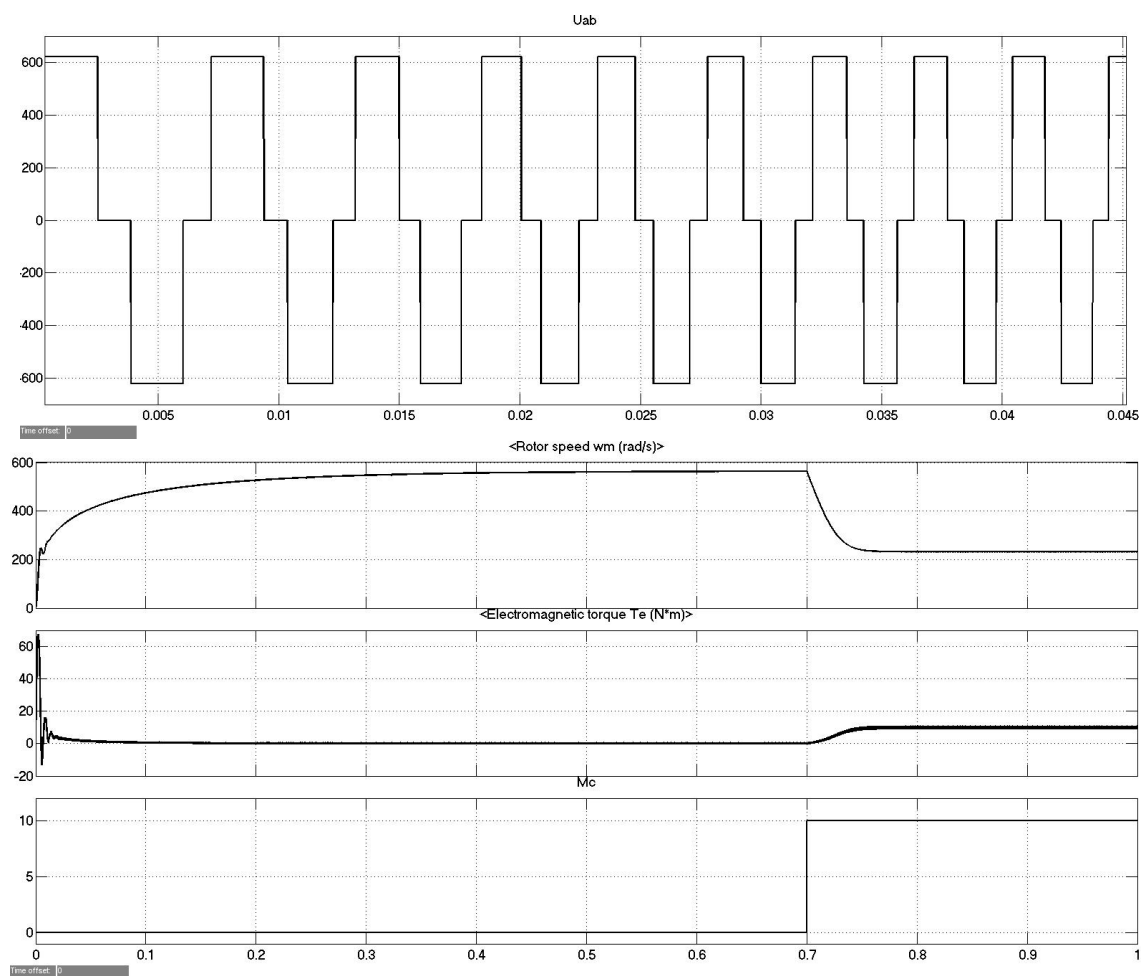


Рис. 6.4. Результаты моделирования пуска СДПМ

Модель и программа для расчета механических характеристик даны на рис 6.5 и рис. 6.6 соответственно.

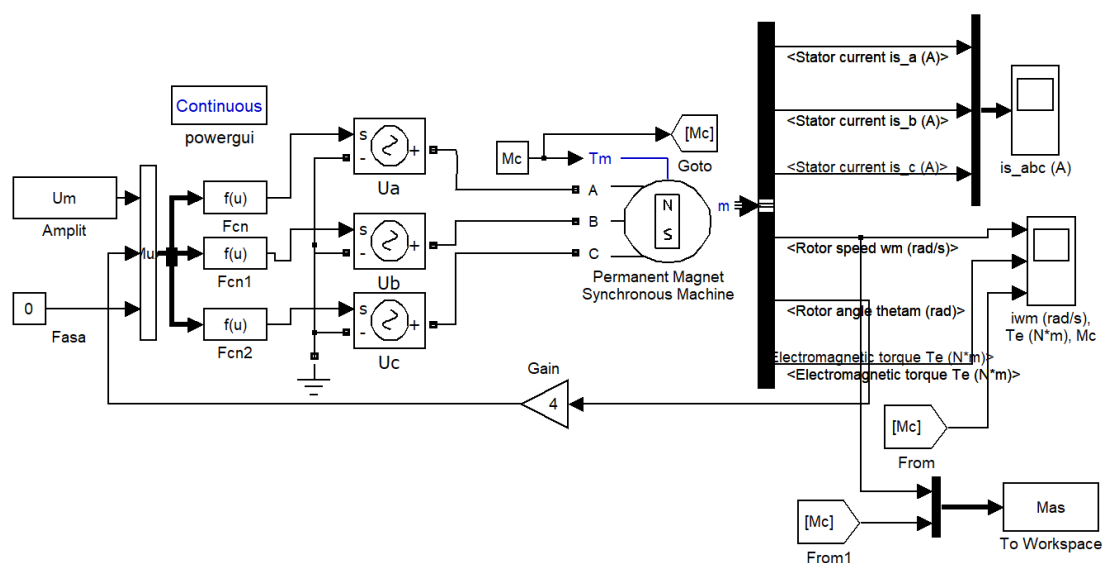


Рис. 6.5. Модель СДПМ для расчета механических характеристик

```

for k1=0:1:2;
    Um=220*sqrt(2)-k1*40 % величина амплитуды напряжения;
    for k=0:1:50;
        Mc=1*k; % величина момента нагрузки;
        sim('CMdX ') % команда обращения к модели;
        A(k+1,1)=Mas(1);% частота вращения ротора;
        A(k+1,2)=Mas(2);% момент сопротивления;
    end
    plot(A(1:k,2),A(1:k,1),'k-.');
    hold on;% обеспечивает продолжение вывода графиков в текущее окно,
end
grid on;%добавляет сетку к текущему графику;

```

Рис. 6.5. Программа расчета механических характеристик СДПМ

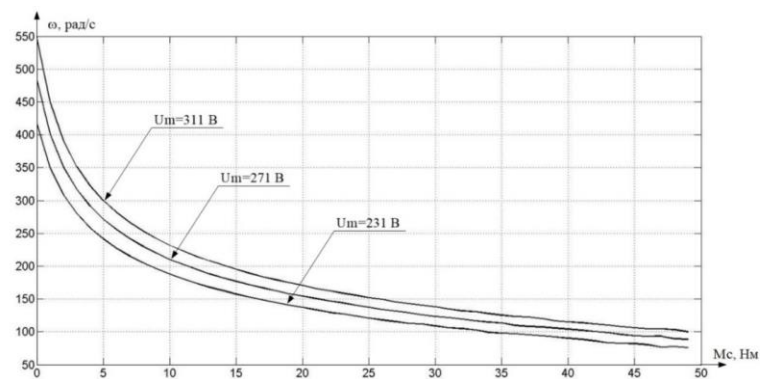


Рис. 6.6. Механические характеристики СДПМ при разных значениях амплитуды напряжения

3. Контрольные вопросы

1. В чем заключаются отличия конструкции синхронного двигателя от асинхронного?
2. Как создается вращающий электромагнитный момент синхронного двигателя?
3. Назовите обязательное условие возникновения вращающего момента в синхронном двигателе.
4. Приведите аналитическое выражение для угловой характеристики.
5. Какие физические величины определяют электромагнитный момент синхронного двигателя?
6. Как реагирует синхронный двигатель на изменение нагрузки на валу?
7. Опишите порядок пуска синхронного двигателя.

Практическое занятие 7

Вентильный двигатель с постоянными магнитами представляет собой электромеханическую систему, которая состоит из синхронного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов и полупроводникового преобразователя частоты, управляемого датчиками углового положения ротора [3]. В качестве преобразователя частоты используется инвертор напряжения с широтно-импульсным регулированием (ИН с ШИР) выходного напряжения (рис7.1).

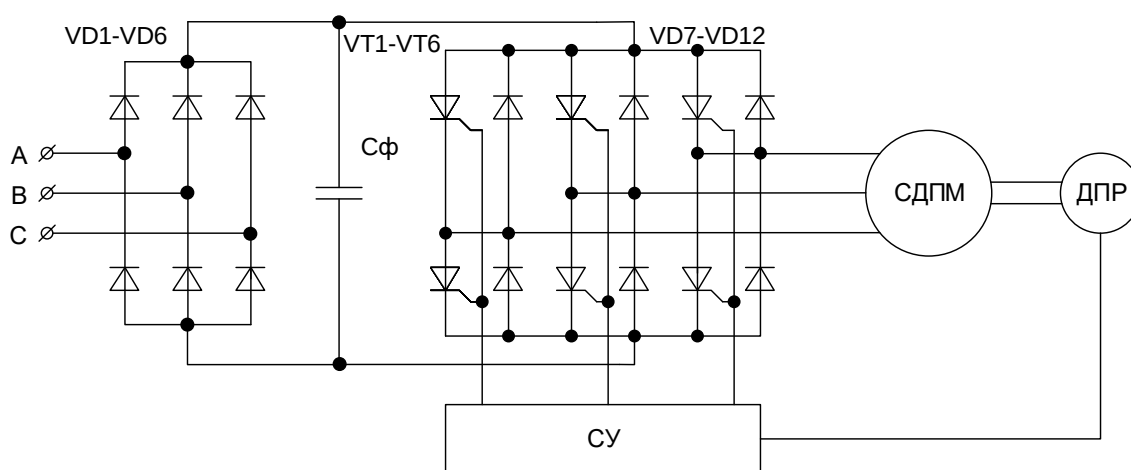


Рис. 7.1. Функциональная схема вентильного двигателя с постоянными магнитами

Модель для моделирования ВДПМ представлена на рисунке 7.2.

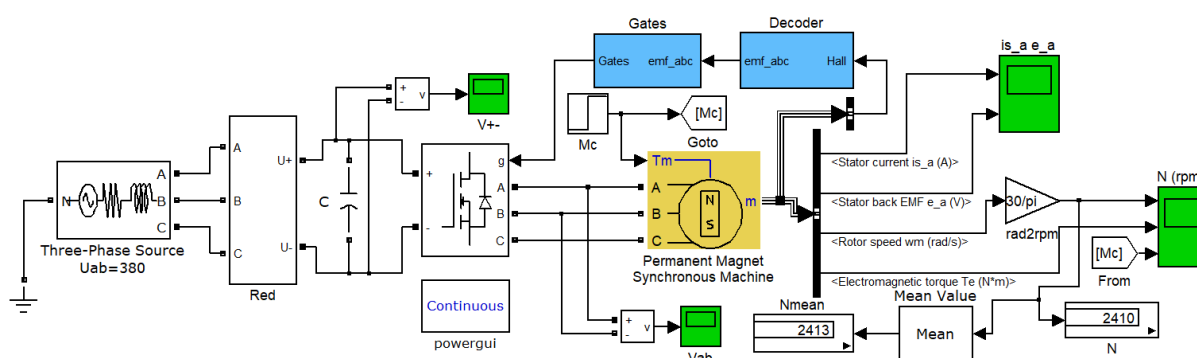


Рис. 7.2. Модель ВДПМ

$C = 1000 \text{ мкФ}$. Субсистема «Red» и параметры синхронного двигателя с постоянными магнитами (СДПМ) представлены на рисунке 7.3.

Субсистемы «Decoder» и «Gates» даны на рисунке 7.4.

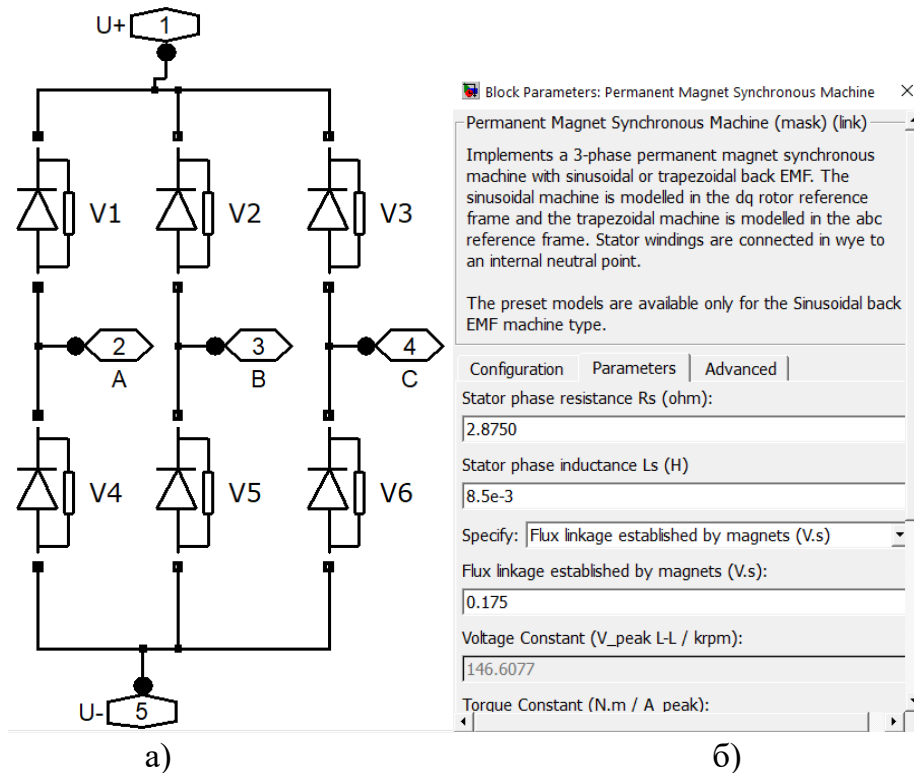


Рис. 7.3. Субсистема «Red» (а) и параметры синхронного двигателя с постоянными магнитами (б)

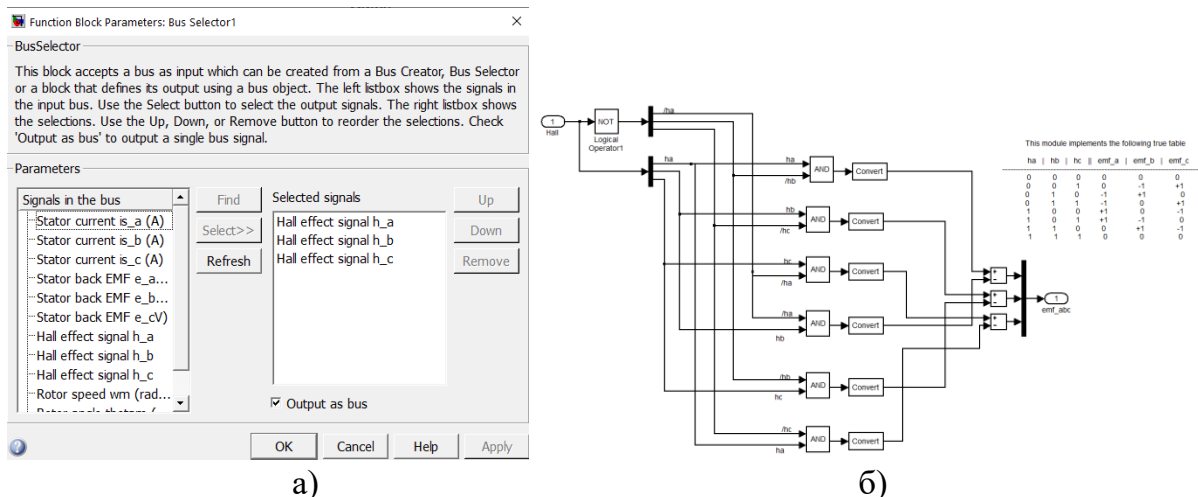


Рис. 7.4 Субсистема «Decoder» (а) и субсистема «Gates» (б)

Модель построена таким образом, что ВДПМ запускается при $M_c=0$. При достижении времени 0.06 секунды M_c становится равным 10 Нм. Результаты моделирования даны на рисунке 7.5

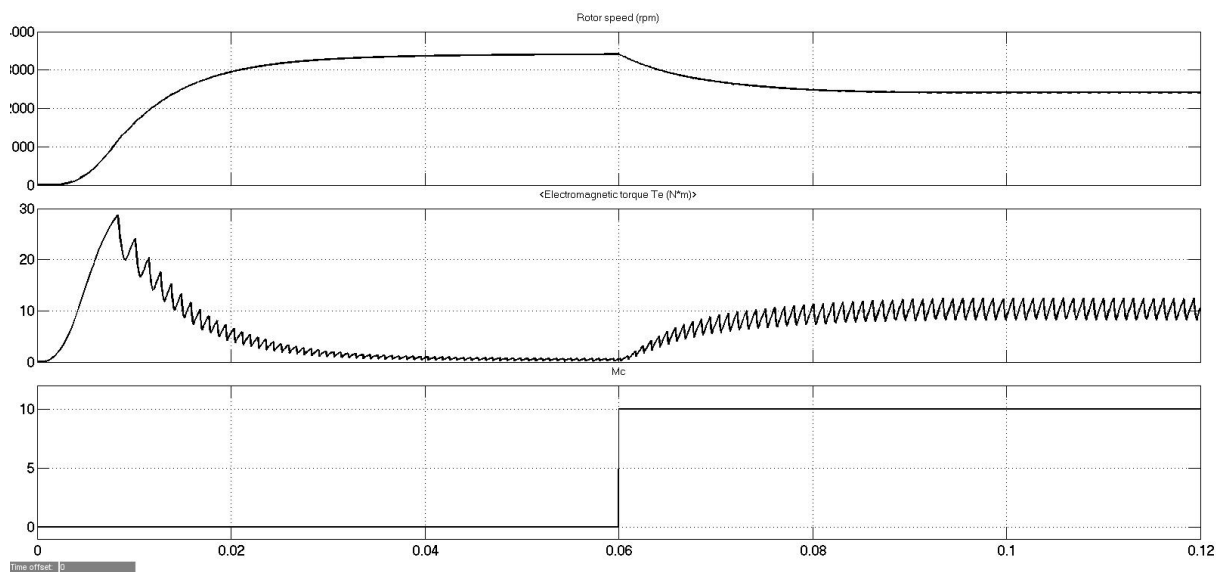


Рис. 7.5. Результаты моделирования ВДПМ

Модель для расчета механических характеристик для разных величин линейного напряжения представлена на рисунке 7.6, а код программы на рисунке 7.7.

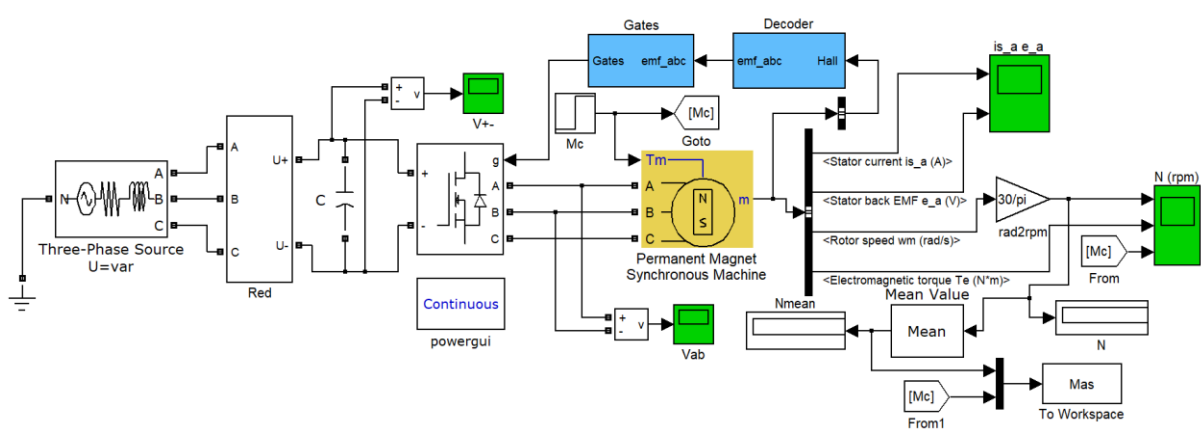


Рис. 7.6. Модель для расчета механических характеристик

```

for k1=0:1:2;
    U=380-k1*40 % величина линейного напряжения;
    for k=0:1:40;
        Mc=1*k;% величина момента нагрузки;
        sim('BDSlikh22NM') % команда обращения к модели;
        A(k+1,1)=Mas(1);% частота вращения ротора;
        A(k+1,2)=Mas(2);% момент сопротивления;
    end
    plot(A(1:k,2),A(1:k,1));
    hold on;% обеспечивает продолжение вывода графиков в текущее
окно,
end
grid on; %добавляет сетку к текущему графику;

```

Рис. 7.7. Код программы для расчета механических характеристик

Результаты расчетов механических характеристик для разных величин напряжения даны на рисунке 7.8.

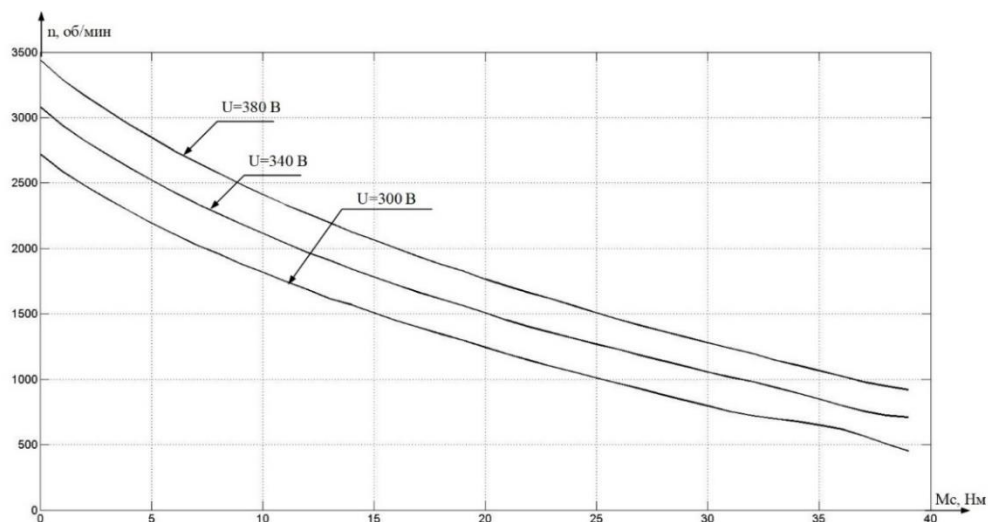


Рис. 7.8. Механические характеристики

Для исследования динамических свойств ВДПМ разработана модель, представленная на рисунке 7.9.

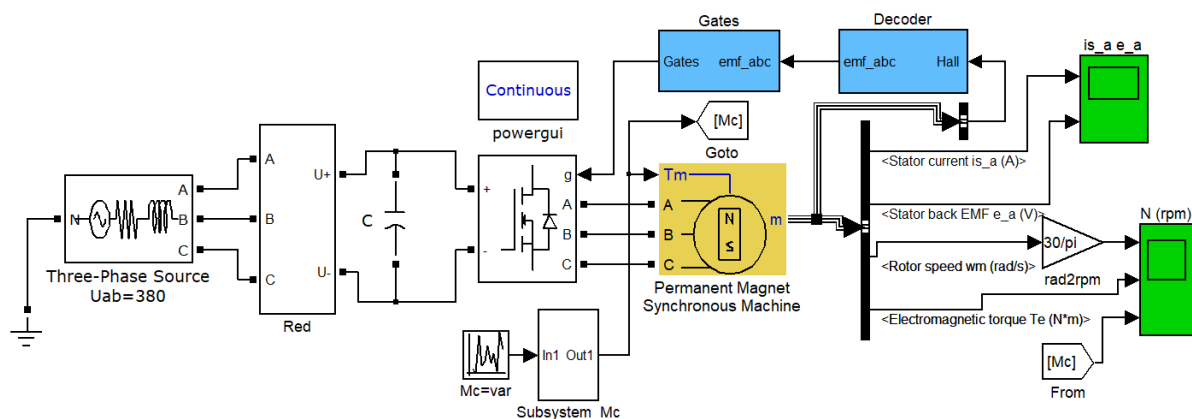


Рис. 7.9. Модель для исследования динамических свойств ВДПМ

Момент сопротивления ВДПМ до $t=0.01$ секунды равен нулю ($M_c=0$). При $t>0.01$ секунды, M_c изменяется случайным образом. Источник случайного сигнала с равномерным распределением служит блок «Uniform Random Number» (Рис 7.10).

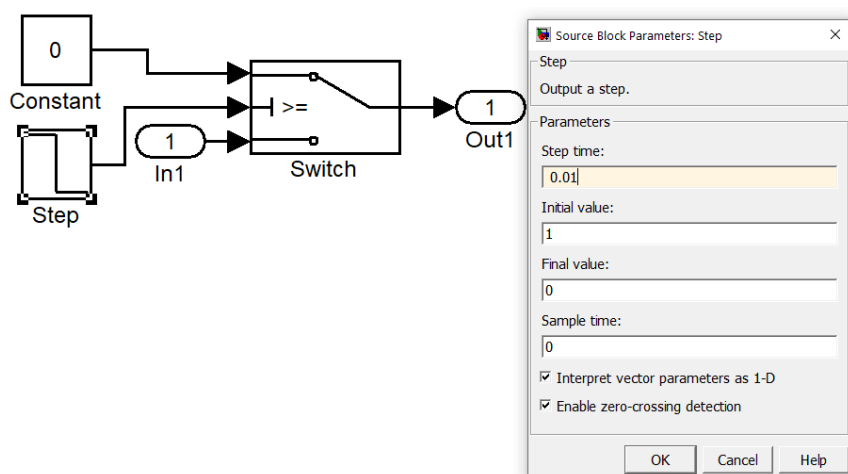


Рис. 7.10. Блок для генерирования момента сопротивления

Результаты моделирования даны на рисунке 7.11.

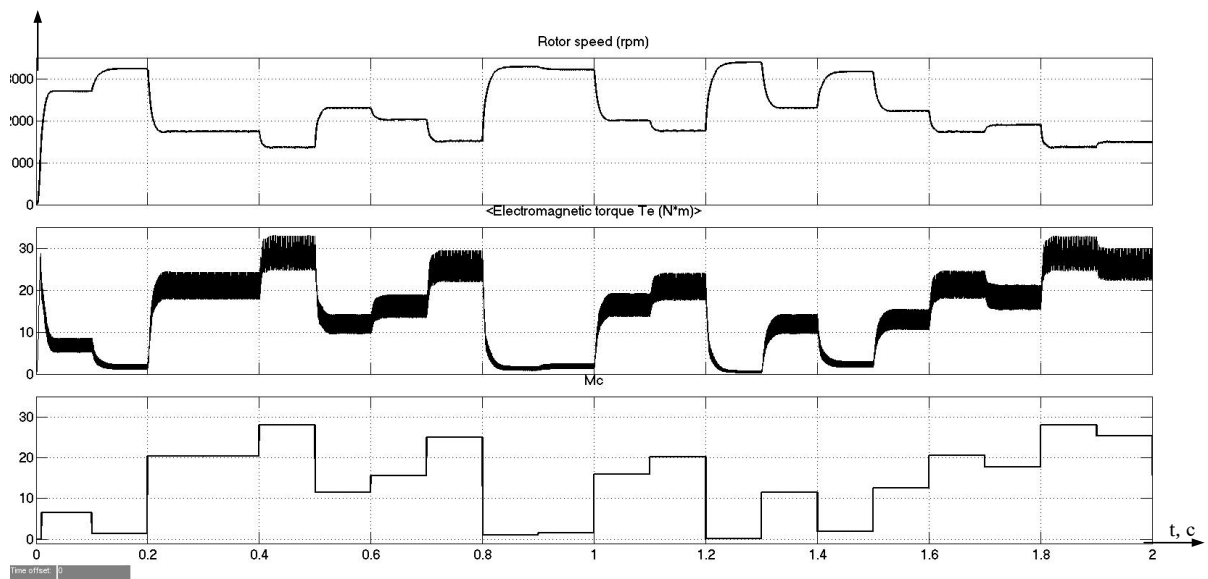


Рис. 7.11. Динамические характеристики при $M_c = \text{var}$

Модель для исследования динамических свойств ВДПМ при $U_{ab} = \text{var}$ представлена на рисунке 7.12, а результаты расчета динамических характеристики на 7.13.

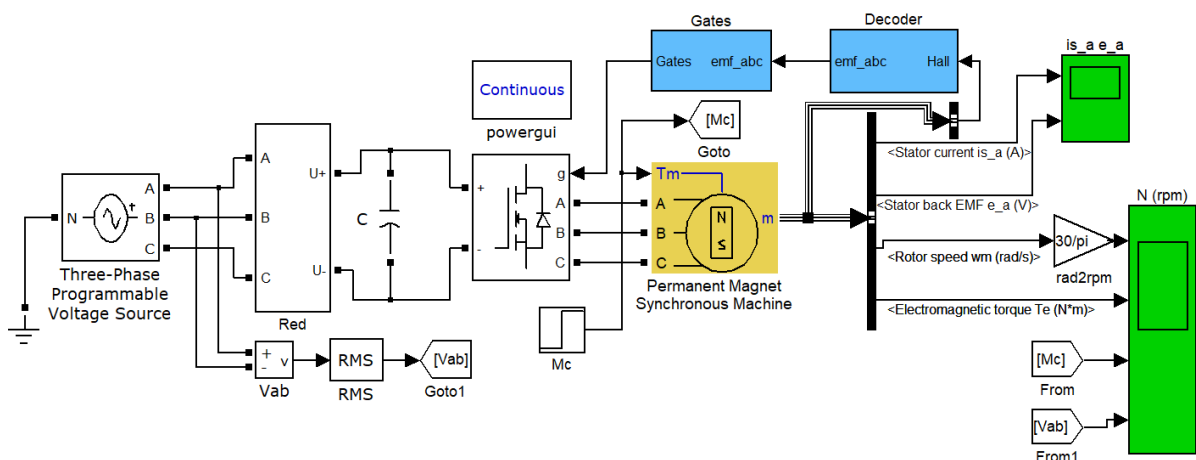


Рис. 7.12. Модель для исследования динамических свойств ВДПМ при $U_{ab} = \text{var}$

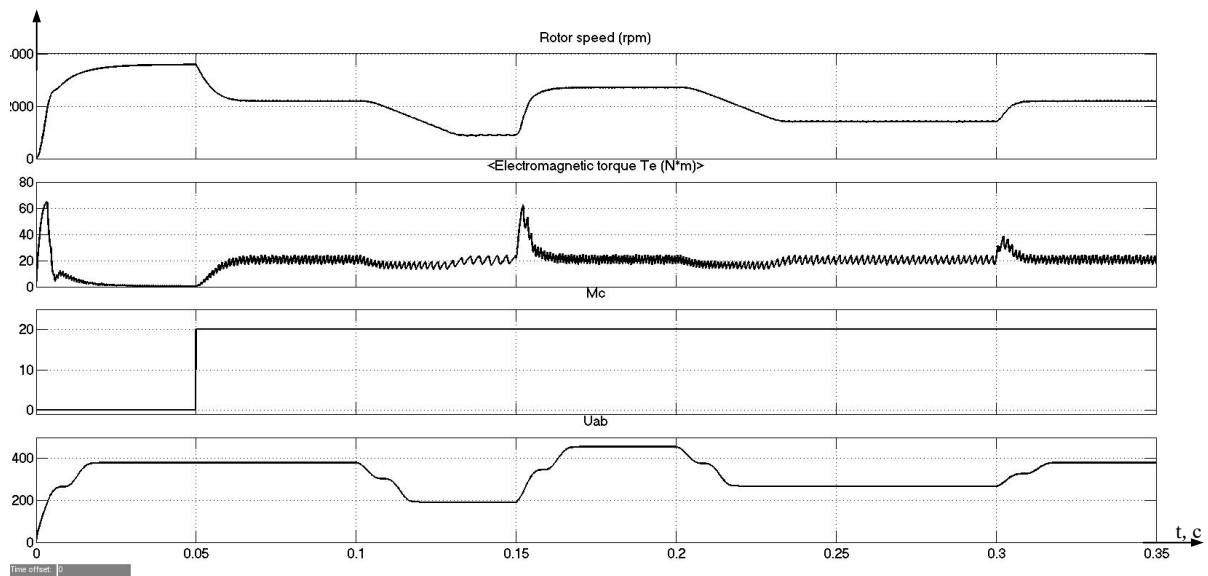


Рис. 7.13. Динамические характеристики при $U_{ab} = \text{var}$

3. Контрольные вопросы

1. В чем заключаются отличия конструкции синхронного двигателя от ВДПМ?
2. Как создается вращающий электромагнитный момент ВДПМ?
3. Назовите обязательное условие возникновения вращающего момента в ВДПМ.
4. Как реагирует ВДПМ на изменение нагрузки на валу?
5. Как реагирует ВДПМ на изменение напряжения?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Без базовых знаний электромашинных устройств и систем управления достаточно сложно обеспечить эффективное использование современного оборудования. Изучение электромашинных устройств и систем автоматического регулирования напрямую связано с экспериментальными исследованиями, а перспективное развитие – с виртуальным моделированием.

Согласно основным разделам курсов «Математические модели технических объектов управления», «Электротехника и электроника» и «Электромашинные устройства систем автоматизации и управления» в практикуме рассмотрено моделирование процессов, происходящих в электромеханических устройствах: исследование рабочих характеристик электромашинных устройств, анализ устойчивости линейных систем автоматического регулирования, синтез систем автоматического регулирования, исследование качества переходных процессов линейной автоматической системы, моделирование нелинейных систем управления.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Брускин Д. Э. Зорохович А. Е. Хвостов Е. С. Электрические машины и микромашины. Изд-во «Высшая школа». 1990. – 529 с. – ISBN 5-06-000725-1.

2. MATLAB 6.5 SP1/7.0 Simulink 5/6. в математике и моделировании. В. Дьяконов. – М. : СОЛОН-Пресс. 2005. – 806 с. – ISBN 5-98003-181-2.

3. Системы управления электроприводов учебник для вузов / Анучин А.С. – М. : Издательский дом МЭИ, 2015. – ISBN 9785383009185.

4. Лиходеев С.И. Электротехника и электроника. Практикум. Электронное издание. 2019. - 130с. ISBN 978-5-9984-1074-1.

5. Москаленко В.В. Системы автоматизированного управления электропривода. НИЦ ИНФРА-М. – 2023. – 208 с. – ISBN 978-5-16-005116-1.

ПРИЛОЖЕНИЯ

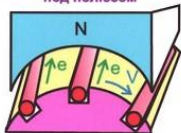
Приложение 1

Электротехника 048

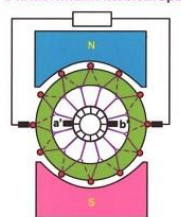
Машины постоянного тока

Электродвижущая сила якоря (ЭДС) и электромагнитный момент

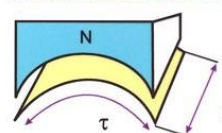
Схема движения проводника под полюсом



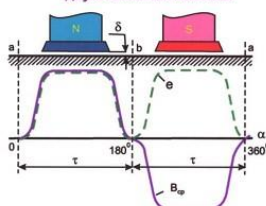
Соединение обмотки якоря с пластинами коллектора



Площадь полюсного деления



Распределение магнитной индукции в зазоре и ЭДС двухполюсной машины



ЭДС машины постоянного тока

$$E = \frac{pN}{60a} \Phi \omega = \frac{pN}{2\pi a} \Phi \omega = k \Phi \omega$$

2p - число пар полюсов;
N - число проводников обмотки якоря;
Φ - магнитный поток одного полюса, Вб;
2a - число параллельных ветвей обмотки якоря;

Электромагнитный момент машины постоянного тока

$$M_{эм} = \frac{pN}{2\pi a} \Phi I_a = k \Phi I_a$$

ω - угловая скорость якоря, 1/с;
M_{эм} - электромагнитный момент, Н·м;
E - ЭДС машины, В;
I_a - ток якоря, А;
n - частота вращения якоря, об/мин;

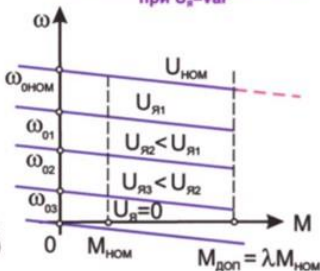
Машины постоянного тока

Искусственные характеристики двигателя с независимым возбуждением

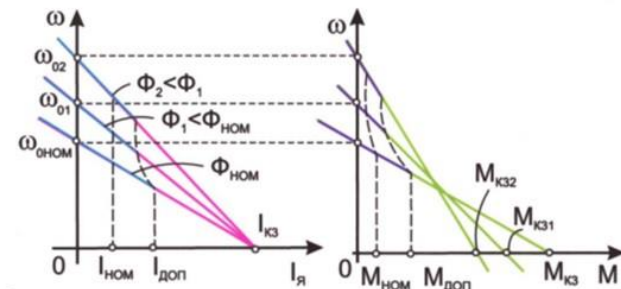
Реостатные



Механическая характеристика при U_a=var



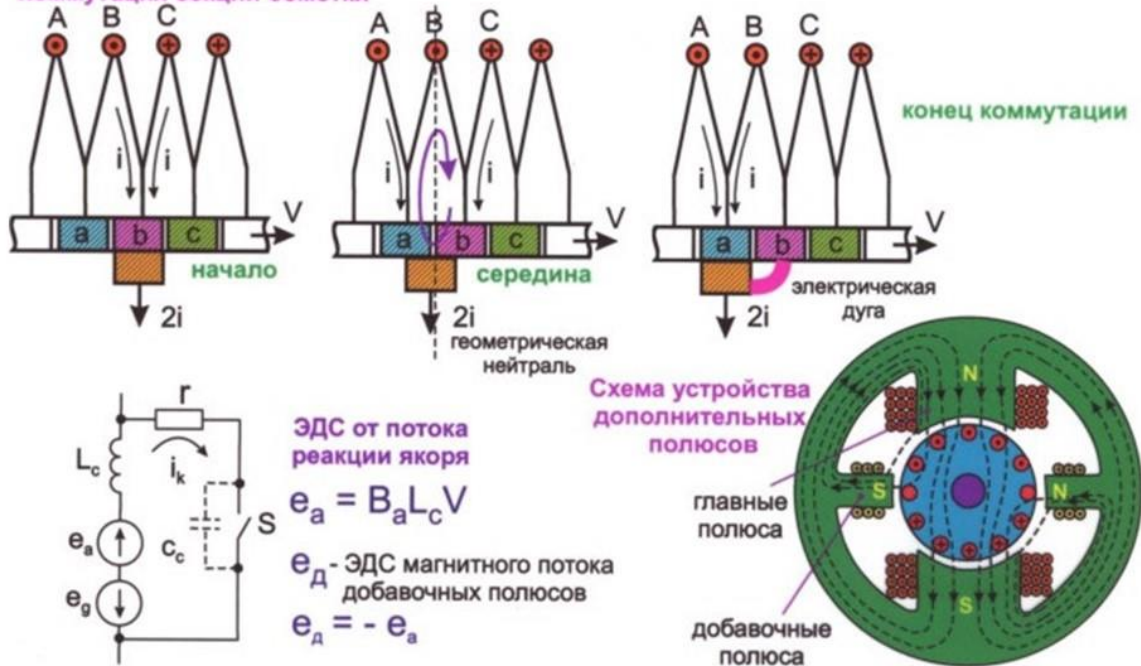
Электрохимическая и механическая характеристики при ослаблении магнитного поля Φ=var



Машины постоянного тока

Коммутация якоря

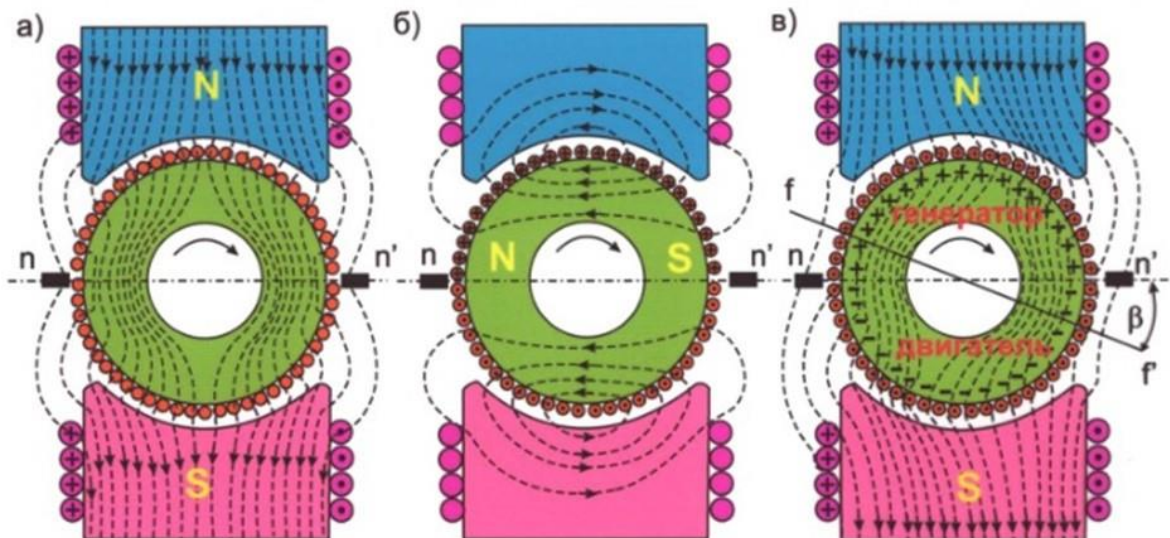
Коммутация секций обмотки



Машины постоянного тока

Реакция якоря

Реакция якоря - искажающее воздействие намагничивающей силы якоря на главное магнитное поле машины.



а) главное магнитное поле; б) поле якоря; в) результирующее поле.

Машины постоянного тока

Естественные и искусственные характеристики двигателей постоянного тока последовательного возбуждения



а) при $I_a < I_{гр}$ до насыщения магнитной цепи $\Phi = k_\Phi I_a$, $k_\Phi = \text{const}$

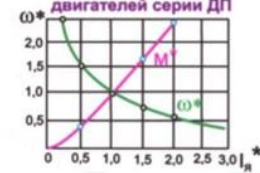
$$\omega = \frac{U_a}{K K_\Phi I_a} - \frac{R_{я\Sigma}}{K K_\Phi}$$

б) при $I_a > I_{гр}$ до насыщения магнитной цепи $\Phi = \Phi_{\text{нас}} = \text{const}$

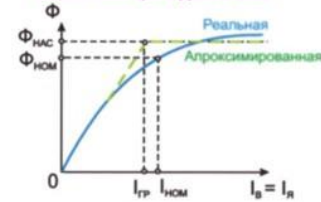
$$\omega = \frac{U_a}{K \Phi_{\text{нас}}} - \frac{R_{я\Sigma}}{K \Phi_{\text{нас}}} I_a$$



Универсальные характеристики двигателей серии ДП



Характеристика намагничивания магнитной цепи двигателя



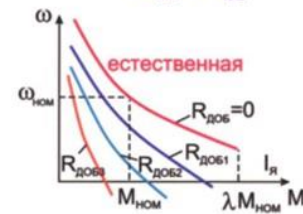
Механические характеристики

а) при $I_a < I_{гр}$ до насыщения магнитной цепи $\Phi = k_\Phi I_a$, $k_\Phi = \text{const}$

$$\omega = \frac{U_a}{K K_\Phi M} - \frac{R_{я\Sigma}}{K K_\Phi}$$

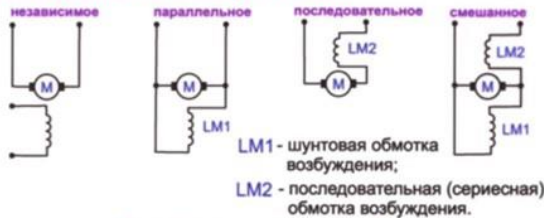
б) при $I_a > I_{гр}$ до насыщения магнитной цепи $\Phi = \Phi_{\text{нас}} = \text{const}$

$$\omega = \frac{U_a}{K \Phi_{\text{нас}}} - \frac{R_{я\Sigma}}{K \Phi_{\text{нас}}} M$$



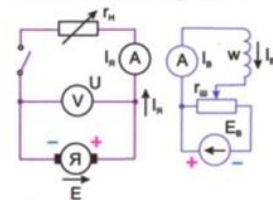
Машины постоянного тока

Схемы возбуждения. Генератор независимого возбуждения



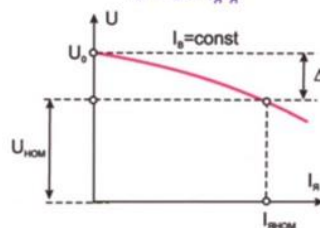
Генератор независимого возбуждения

Схема генератора независимого возбуждения

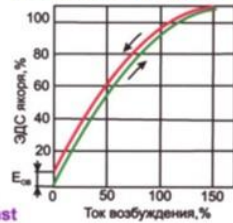


Внешняя характеристика генератора независимого возбуждения $U = f(I_a)$, $I_a = \text{const}$

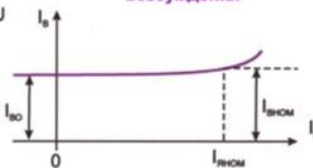
$$U = E - I_a r_{я}$$



Характеристика холостого хода генератора независимого возбуждения



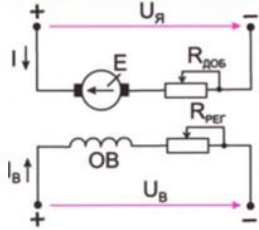
Регулировочная характеристика генератора независимого возбуждения



Машины постоянного тока

Естественные характеристики двигателя постоянного тока с независимым возбуждением

Схема включения двигателя с независимым возбуждением



Электромеханическая характеристика

$$\omega = \frac{U_a}{k\Phi} - \frac{R_{\Sigma}}{k\Phi} I_a \quad k = \frac{pN}{2\pi a}$$

Механическая характеристика

$$\omega = \frac{U_a}{k\Phi} - \frac{R_{\Sigma}}{k^2\Phi^2} M$$

где $R_{\Sigma} = R_{\Sigma\text{ДВ}} + R_{\Sigma\text{ДВ}} = R_{\Sigma\text{ДВ}} + R_{\Sigma\text{ДВ}} + R_{\Sigma\text{ДВ}} + R_{\Sigma\text{ДВ}}$
полное сопротивление якорной цепи

Естественные электромеханическая (а) и механическая (б) характеристики двигателя при $U_a = U_{\text{ном}}$, $\Phi = \Phi_{\text{ном}}$, $R_{\Sigma\text{ДВ}} = 0$

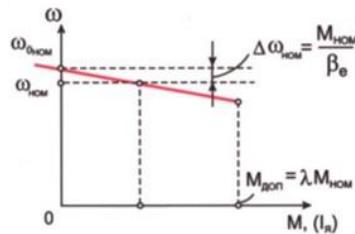
а) $\omega = \omega_{\text{ном}} - \frac{R_{\Sigma}}{C} I_a$

где $\omega_{\text{ном}} = \frac{U_{\text{ном}}}{C}$

б) $\omega = \omega_{\text{ном}} - \frac{M}{\beta_e} I_a$

$C = k\Phi_{\text{ном}}$

$\beta_e = \frac{C^2}{R_{\Sigma}}$ - модуль жесткости естественной характеристики



$M_{\text{ном}} = cI_{\text{ном}}$, (Н·м)

$E_{\text{ном}} = U_{\text{ном}} - I_{\text{ном}} R_{\Sigma\text{ДВ}}$, В

$\omega_{\text{ном}} = \frac{\pi n_{\text{ном}}}{30}$, 1/с

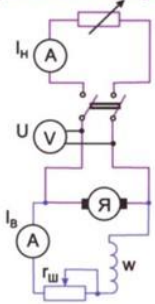
$C = k\Phi_{\text{ном}} = \frac{E_{\text{ном}}}{\omega_{\text{ном}}}$, В·с

$\omega_{\text{ном}} = \frac{U_{\text{ном}}}{C}$, 1/с

Машины постоянного тока

Генераторы параллельного и смешанного возбуждения

Схема генератора параллельного возбуждения



Внешняя характеристика генератора параллельного возбуждения

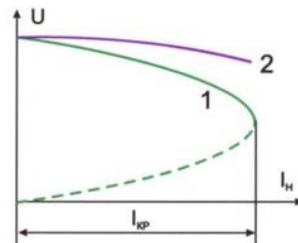
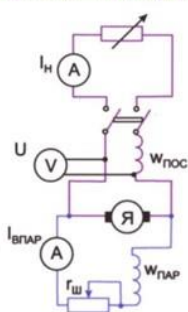
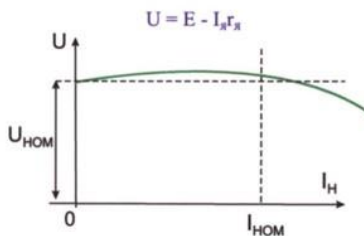


Схема генератора смешанного возбуждения

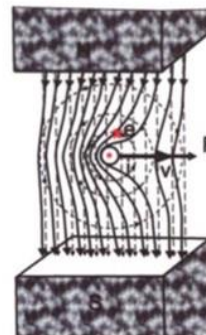
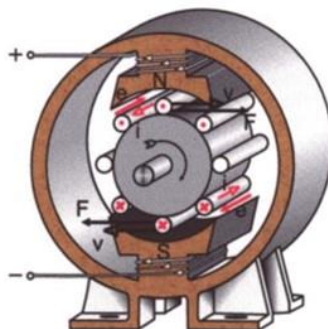
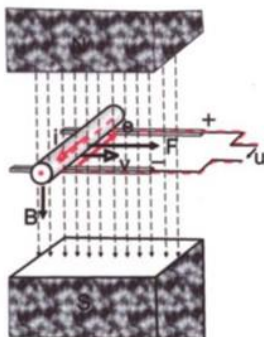


Внешняя характеристика генератора смешанного возбуждения при согласованном включении обмоток возбуждения



Машины постоянного тока

Преобразование энергии в электродвигателе



$$F = BLi;$$

$$e = BLv;$$

$$Fv = Li$$

где L длина проводника

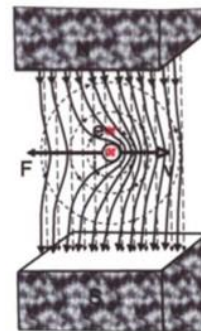
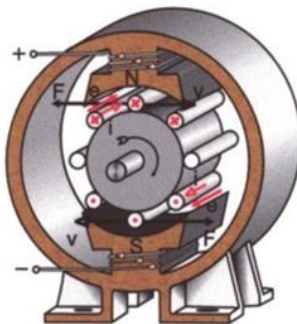
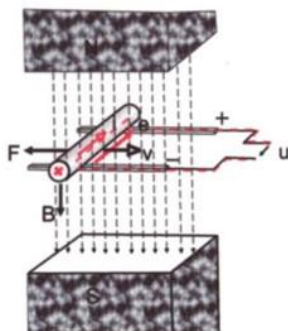
ПРИНЦИП ОБРАТИМОСТИ
МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА



Применение правил правой и левой руки
к работе электродвигателя
(обращённого генератора)

Машины постоянного тока

Преобразование энергии в электрическом генераторе



$$F = BLi;$$

$$e = BLv;$$

$$Fv = Li$$

где L длина проводника

ПРИНЦИП ОБРАТИМОСТИ
МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА



Применение правил правой и левой руки
к работе генератора

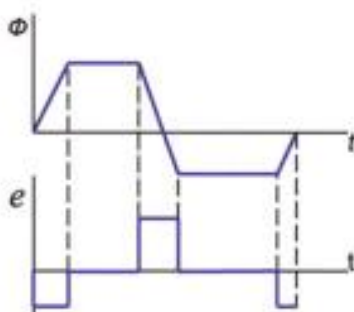
Трансформаторы

Закон электромагнитной индукции

ЭДС, индуцируемая в проводнике при изменении магнитного потока, равна скорости изменения этого потока

$$e = - \frac{d\Phi}{dt}$$

- Знак $-$ говорит о том, что ЭДС стремится ослабить причину, ее вызывающую

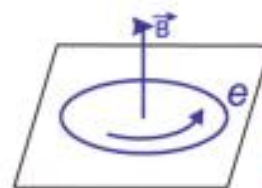


Зависимость ЭДС от изменения магнитного потока

ЭДС, наводимая в обмотке переменным магнитным полем

$$e = - \frac{d\Psi}{dt} = - \omega \frac{d\Psi}{dt}, \text{ где}$$

ω - число витков обмотки,
 Ψ - потокосцепление

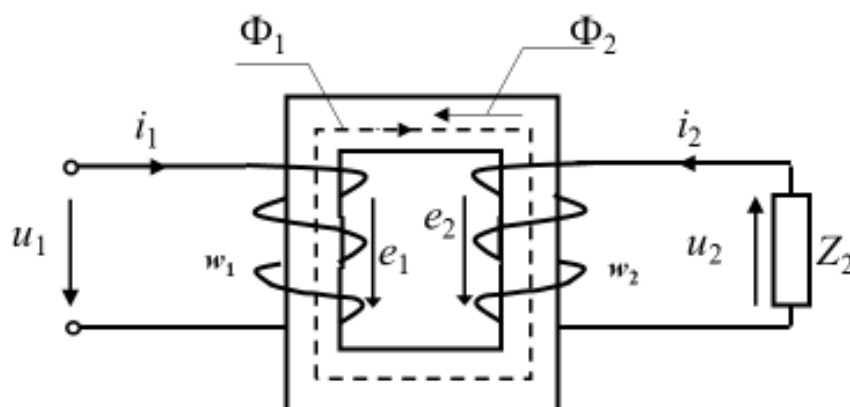


Положительное направление наведенной ЭДС определяется по правилу правоходового винта.

ЭДС самоиндукции ЭДС, наводимая в контуре при изменении тока в этом же контуре $\Psi = Li$, где L индуктивность

$$e_L = - \frac{d\Psi}{dt} = - L \frac{di}{dt}$$

Принцип действия однофазного двухобмоточного трансформатора



Закон электромагнитной индукции

Постоянное магнитное поле может наводить в проводнике ЭДС при движении проводника относительно магнитного поля.

Величина ЭДС

$$e = BlV, \text{ где}$$

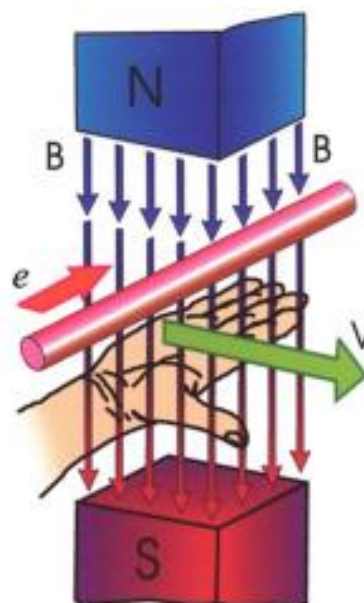
B - магнитная индукция поля,

l - активная длина

проводника,

V - скорость перемещения проводника.

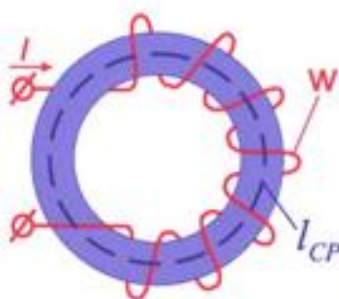
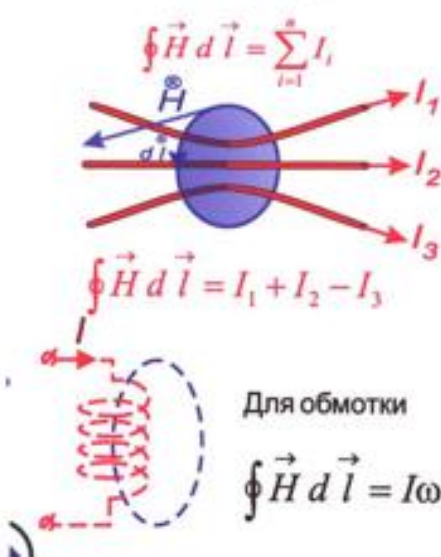
Направление ЭДС



Правило правой руки.

Закон полного тока

Интервал от вектора напряженности магнитного поля вдоль любого замкнутого контура равен алгебраической сумме токов, охваченных этим контуром.



Для однородной магнитной цепи

$$Hl_{CP} = I\omega,$$

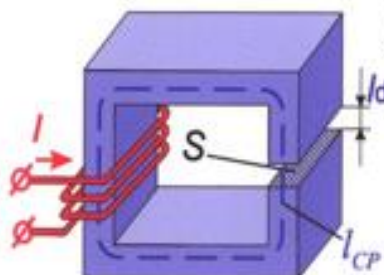
где l_{CP} - длина средней силовой линии

где $I\omega$ - магнитодвижущая сила (МДС)

Для неоднородной магнитной цепи с воздушным зазором

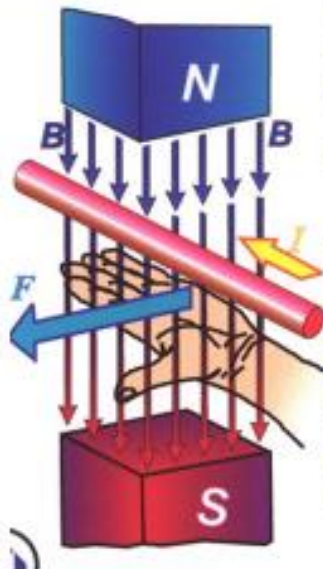
$$I\omega = Hl + H\delta l\delta$$

где H - напряженность магнитного поля в сердечнике,
 $H\delta$ - напряженность магнитного поля в зазоре



Механические силы в магнитном поле

В магнитном поле на проводники с током, на заряженные частицы, на ферромагнитные тела действуют механические силы.



Направление силы определяется правилом левой руки.

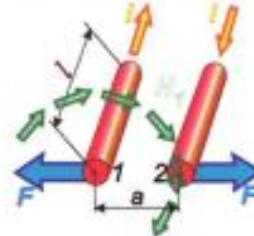
Величина силы

$$F = BIL, \text{ где}$$

I - активная длина проводника,
 L - ток в проводнике,
 B - магнитная индукция поля.

На проводнике с током действуют механические силы F , направление которых зависит от направления тока.

Два параллельных проводника с током



Подъемная сила электромагнита



$$F = \frac{B^2}{2\mu_0} S, \text{ где}$$

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$
 S - полное сечение воздушного зазора [м²],
 B - магнитная индукция поля [Т]

Примеры магнитных цепей

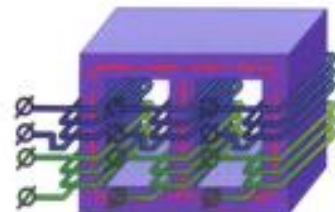
Однородная магнитная цепь



Катушка с тороидальным сердечником



Однофазный трансформатор



Трехфазный трансформатор

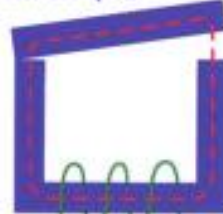
Неоднородная магнитная цепь



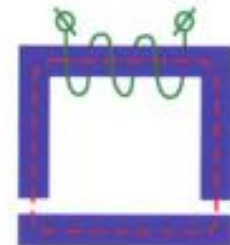
Машина постоянного тока



Магнитоэлектрический измерительный механизм

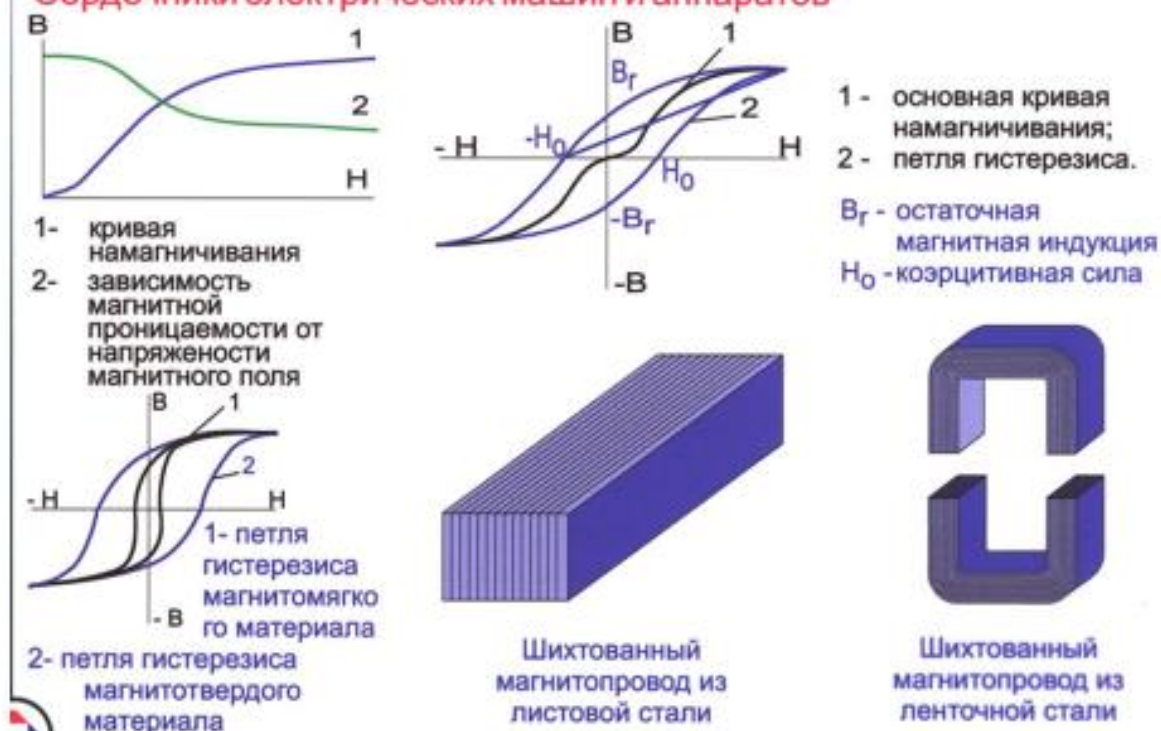


Электромагнитное реле

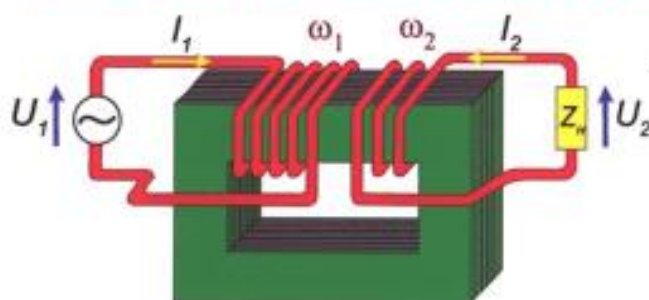


Подъемный электромагнит

Сердечники электрических машин и аппаратов



Принцип действия однофазного трансформатора



Переменное магнитное поле наводит в обмотках ЭДС

$$E_1 = 4,44\omega_1 f \Phi_m$$

$$E_2 = 4,44\omega_2 f \Phi_m$$

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \eta - \text{коэффициент трансформации.}$$

Уравнение равновесия первичной обмотки

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1(R_1 + jX_1)$$

где R_1 - активное сопротивление первичной обмотки, связанное с потерями на нагрев обмотки.

X_1 - индуктивное сопротивление обмотки, связанное с потоком рассеяния.

Уравнение равновесия вторичной обмотки

$$\dot{U}_2 = -\dot{E}_2 + \dot{I}_2(R_2 + jX_2)$$

где R_2 связано с потерями на нагрев обмотки, X_2 связано с потерями рассеяния

Режимы работы трансформатора

Режим холостого хода

$$Z_H \rightarrow \infty, I_2 = 0$$

$$U_{20} = E_2, I_1 = I_0 = (1 \div 10)\% \cdot I_{1H}$$

$$U_1 = E_1 = 4,44\omega_1 f \Phi_m$$

Выводы

Амплитуда магнитного потока в сердечнике Φ_m пропорциональна приложенному к обмотке напряжению и не зависит от режима работы

Режим короткого замыкания

$$Z_H = 0, U_2 = 0, I_{2KЗ} = \frac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}}$$

$$I_{2KЗ} \gg I_{2H}$$

Для большинства трансформаторов режим короткого замыкания - аварийный режим

Режим нагрузки

$$0 < Z_H < \infty$$

Действует две МДС, каждая из которых создает свой магнитный поток

$$\Phi_1 = \frac{I_1 \omega_1}{R_{МАГН}}, \Phi_2 = \frac{I_2 \omega_2}{R_{МАГН}}$$

Результирующий магнитный поток

$$\dot{\Phi} = \dot{\Phi}_1 + \dot{\Phi}_2$$

Уравнение магнитодвижущих сил

$$\dot{I}_1 \omega_1 = \dot{I}_1' \omega_1 + \dot{I}_2' \omega_2$$

Ток первичной обмотки

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_1' + \dot{I}_2'$$

Зависит от тока вторичной обмотки (тока нагрузки)

Чем больше ток нагрузки, тем больше потребляемый из сети ток.

Закон электромагнитной индукции

Постоянное магнитное поле может наводить в проводнике ЭДС при движении проводника относительно магнитного поля.

Величина ЭДС

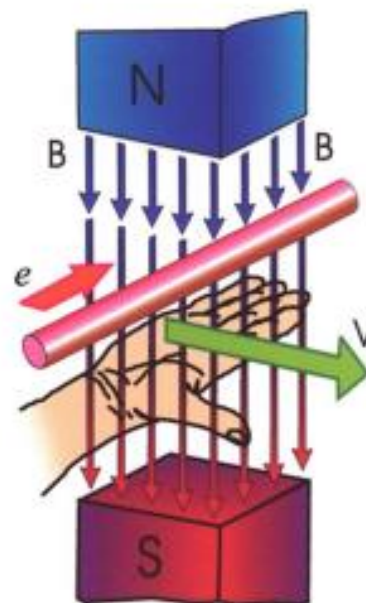
$$e = BlV, \text{ где}$$

B - магнитная индукция поля,

l - активная длина проводника,

V - скорость перемещения проводника.

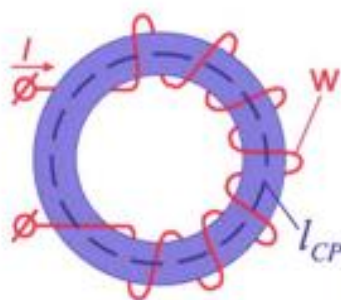
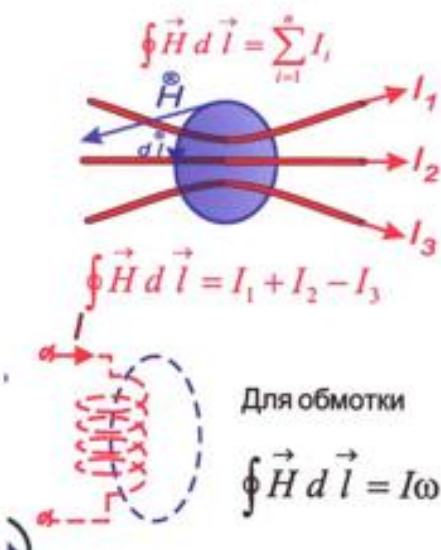
Направление ЭДС



Правило правой руки.

Закон полного тока

Интервал от вектора напряженности магнитного поля вдоль любого замкнутого контура равен алгебраической сумме токов, охваченных этим контуром.



Для однородной магнитной цепи

$$Hl_{CP} = I\omega,$$

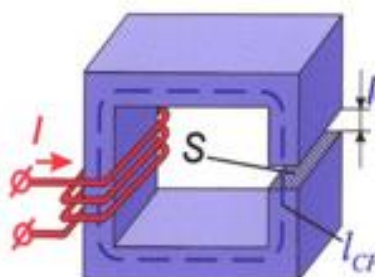
где l_{CP} - длина средней силовой линии

где $I\omega$ - магнитодвижущая сила (МДС)

Для неоднородной магнитной цепи с воздушным зазором

$$I\omega = Hl + H\delta l\delta$$

где H - напряженность магнитного поля в сердечнике,
 $H\delta$ - напряженность магнитного поля в зазоре



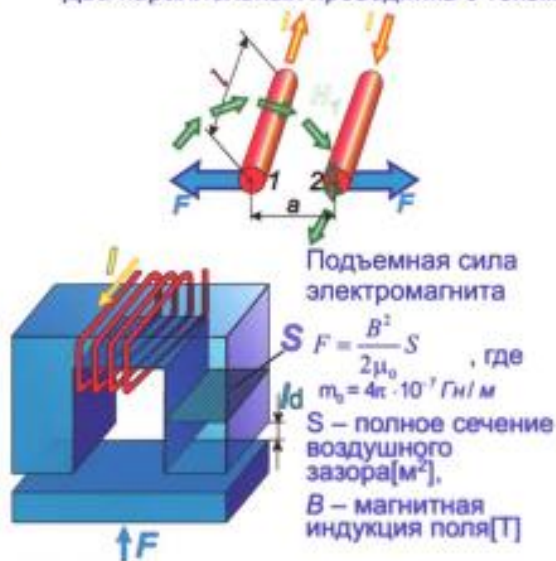
Механические силы в магнитном поле

В магнитном поле на проводники с током, на заряженные частицы, на ферромагнитные тела действуют механические силы.

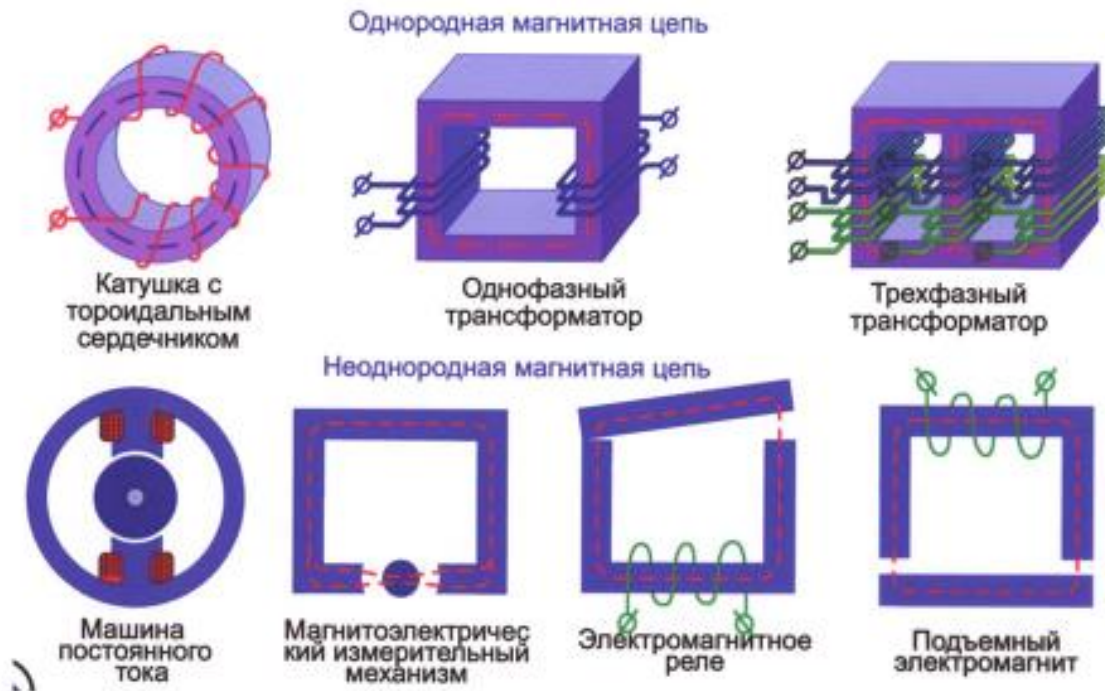
На проводнике с током действуют механические силы F , направление которых зависит от направления тока.



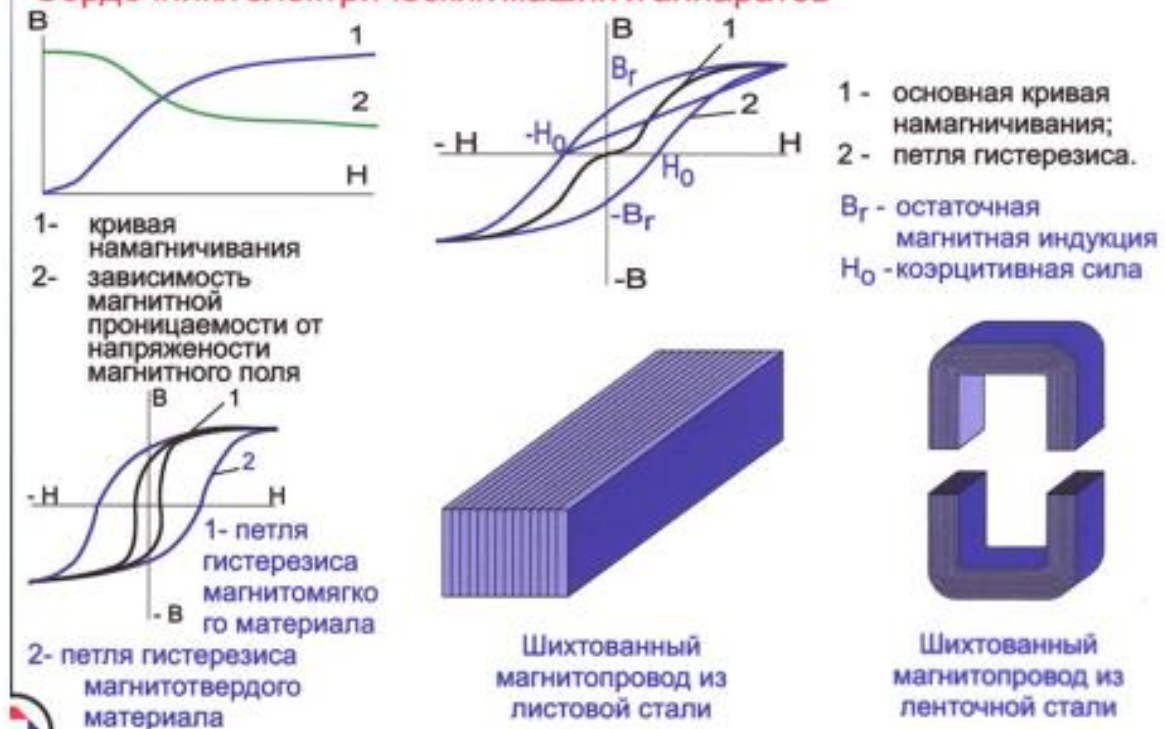
Два параллельных проводника с током



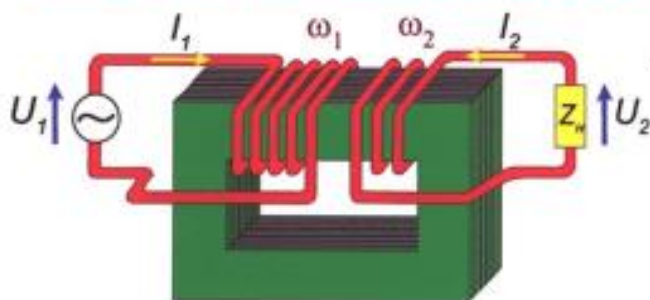
Примеры магнитных цепей



Сердечники электрических машин и аппаратов



Принцип действия однофазного трансформатора



Переменное магнитное поле наводит в обмотках ЭДС

$$E_1 = 4,44\omega_1 f \Phi_m$$

$$E_2 = 4,44\omega_2 f \Phi_m$$

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = n - \text{коэффициент трансформации.}$$

Уравнение равновесия первичной обмотки

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1(R_1 + jX_1)$$

где R_1 - активное сопротивление первичной обмотки, связанное с потерями на нагрев обмотки.

X_1 - индуктивное сопротивление обмотки, связанное с потоком рассеяния.

Уравнение равновесия вторичной обмотки

$$\dot{U}_2 = -\dot{E}_2 + \dot{I}_2(R_2 + jX_2)$$

где R_2 связано с потерями на нагрев обмотки, X_2 связано с потерями рассеяния

Режимы работы трансформатора

Режим холостого хода

$$Z_H \rightarrow \infty, I_2 = 0$$

$$U_{20} = E_2, I_1 = I_0 = (1 \div 10)\% \cdot I_{1H}$$

$$U_1 = E_1 = 4,44\omega_1 f \Phi_m$$

Выводы

Амплитуда магнитного потока в сердечнике Φ_m пропорциональна приложенному к обмотке напряжению и не зависит от режима работы

Режим короткого замыкания

$$Z_H = 0, U_2 = 0, I_{2K3} = \frac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}}$$

$$I_{2K3} \gg I_{2H}$$

Для большинства трансформаторов режим короткого замыкания - аварийный режим

Режим нагрузки

$$0 < Z_H < \infty$$

Действует две МДС, каждая из которых создает свой магнитный поток

$$\Phi_1 = \frac{I_1 \omega_1}{R_{\text{МАГН}}}, \Phi_2 = \frac{I_2 \omega_2}{R_{\text{МАГН}}}$$

Результирующий магнитный поток

$$\dot{\Phi} = \dot{\Phi}_1 + \dot{\Phi}_2$$

Уравнение магнитодвижущих сил

$$\dot{I}_1 \omega_1 = \dot{I}_1 \omega_1 + \dot{I}_2 \omega_2$$

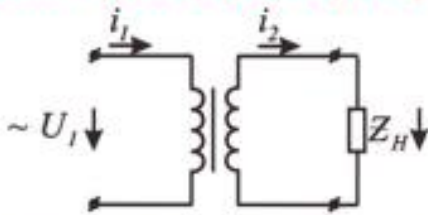
Ток первичной обмотки

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \dot{I}_2'$$

Зависит от тока вторичной обмотки (тока нагрузки)

Чем больше ток нагрузки, тем больше потребляемый из сети ток.

Работа трансформатора в режиме нагрузки



Магнитный поток в сердечнике Φ_m не зависит от режима работы трансформатора, в том числе от нагрузки, а зависит от подведенного напряжения U_1

$$\Phi_m \propto U_1$$

Ток вторичной обмотки зависит от сопротивления нагрузки Z_H . Чем больше Z_H , тем меньше ток I_2 .

Ток первичной обмотки трансформатора I_1 зависит от тока I_2 . Чем больше I_2 , тем $I_1 > I_1$.

Это отражает свойство саморегулирования трансформатора.

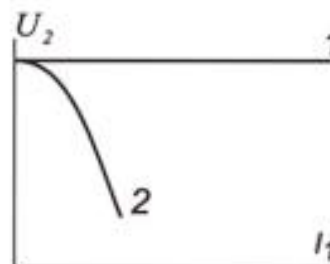
Внешняя характеристика трансформатора

Из уравнения равновесия вторичной обмотки

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2(R_2 + jX_2)$$

следует, что вторичное напряжение зависит от сопротивления вторичной обмотки

$$R_2 + jX_2$$



Внешняя характеристика при малом сопротивлении вторичной обмотки 1 и при повышенном сопротивлении вторичной обмотки 2.

Схема замещения идеализированного трансформатора

Магнитная связь заменяется электрической. Для этого необходимо объединить обе обмотки, сделав равными их ЭДС.

$$e_1 = e_2$$

Равенство будет выполнено, если новое число витков вторичной обмотки сделать равным числу витков первичной обмотки.

$$\frac{u_1}{u_2} = -\frac{e_1}{e_2} = -\frac{w_1}{w_2}$$

$$u'_2 = u_1 = -u_2 \frac{w_1}{w_2} \text{ - приведенное значение напряжения}$$

16

Из условия сохранения мощности вторичной обмотки

$$u_2 i_2 = u'_2 i'_2$$

Следовательно

$$i'_2 = i_2 \frac{u_2}{u'_2} = -i_2 \frac{w_2}{w_1}$$

Из условия сохранения мощности потерь

$$R_{H2} i_2^2 = R'_{H2} i'^2_2$$

R_{H2} — активное сопротивление нагрузки вторичной обмотки

$$R'_{H2} = R_{H2} \cdot \frac{i_2^2}{i'^2_2} = \left(\frac{w_1}{w_2} \right)^2 \cdot R_{H2}$$

17

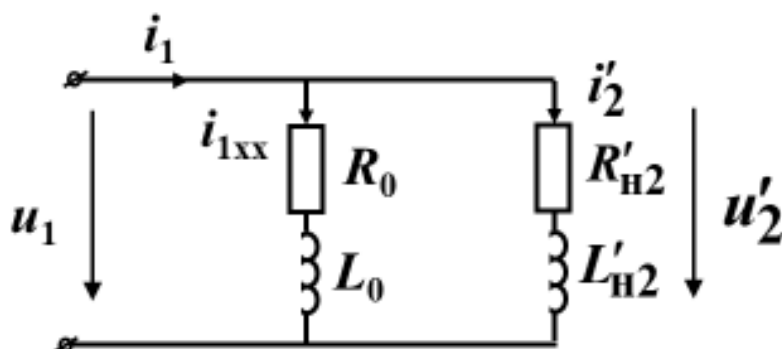
По аналогии

$$L'_{H2} = L_{H2} \cdot \left(\frac{w_1}{w_2} \right)^2$$

$$C'_{H2} = C_{H2} \cdot \left(\frac{w_2}{w_1} \right)^2$$

18

Схема замещения идеализированного трансформатора



R_0, L_0 – параметры ветви намагничивания

R_0 характеризует магнитные потери в сердечнике

L_0 – коэффициент пропорциональности между основным магнитным потоком и намагничивающим током

19

Реальный трансформатор

Напряжение u_1 уравнивается не только ЭДС e_1 , но и ЭДС потоков рассеяния $e_{\sigma 1}$ и падением напряжения на активном сопротивлении

$$u_1 = -e_1 - e_{\sigma 1} + R_1 i_1$$

$$e_{\sigma 1} = -L_{\sigma 1} \frac{di_1}{dt}$$

$$u_1 = -e_1 + L_{\sigma 1} \frac{di_1}{dt} + R_1 i_1$$

20

Напряжение на вторичной обмотке:

$$u_2 = e_2 - L_{\sigma 2} \frac{di_2}{dt} - R_2 i_2$$

Уравнение магнитного состояния:

$$i_{1xx} w_1 = i_1 w_1 + i_2 w_2$$

21

Уравнения реального трансформатора

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + jx_{\sigma 1}\dot{I}_1 + R_1\dot{I}_1$$

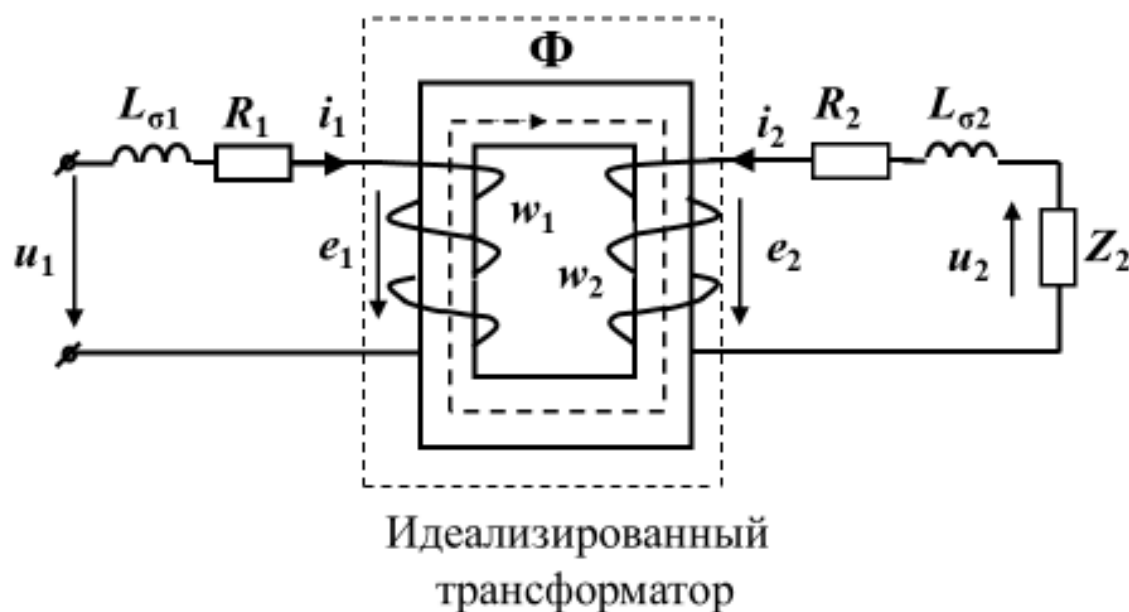
$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - jx_{\sigma 2}\dot{I}_2 - R_2\dot{I}_2$$

$$\dot{I}_{1xx}w_1 = \dot{I}_1w_1 + \dot{I}_2w_2$$

$x_{\sigma 1} = \omega L_{\sigma 1}$, – индуктивные сопротивления
 $x_{\sigma 2} = \omega L_{\sigma 2}$ первичной и вторичной обмоток

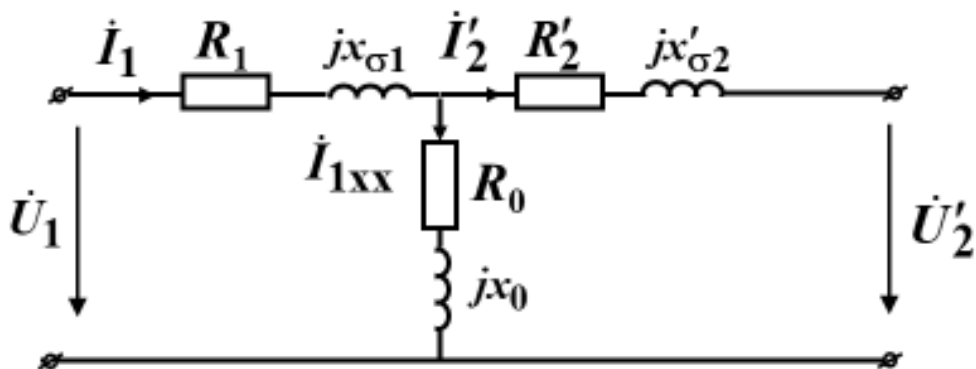
22

Схема реального однофазного трансформатора



23

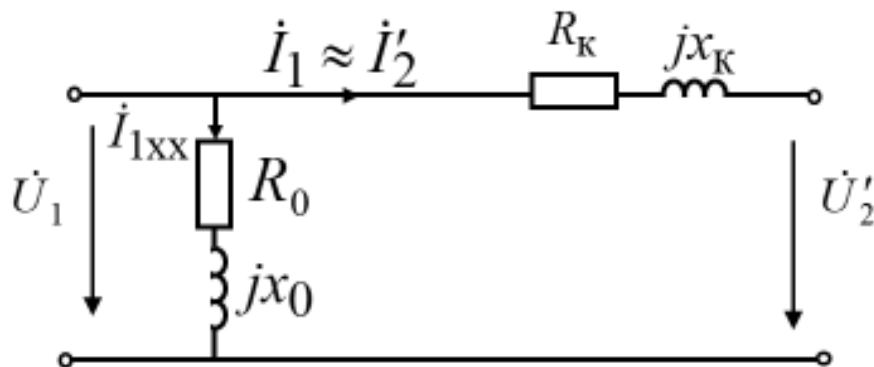
Т-образная схема



Недостаток: невозможно экспериментально определить все параметры

24

Г-образная схема замещения



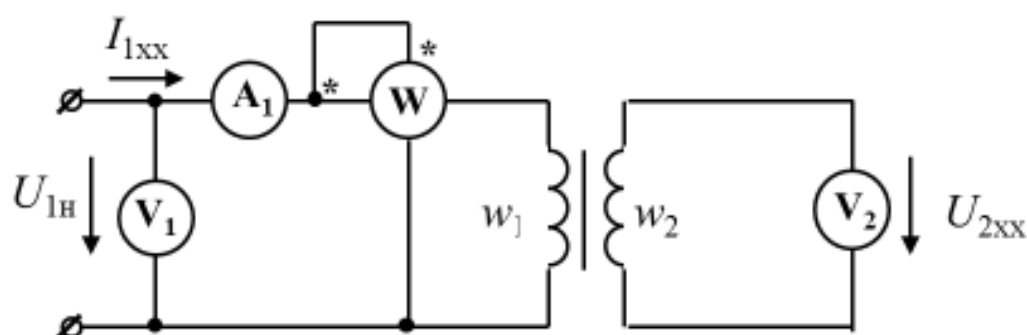
R_0, x_0 - параметры холостого хода

$R_{\text{к}} = R_1 + R'_2$ $x_{\text{к}} = x_{\sigma 1} + x'_{\sigma 2}$ - параметры КЗ

25

Опытное определение параметров однофазного трансформатора

Опыт холостого хода



26

Из опыта XX можно найти

1. Параметры ветви намагничивания:

$$Z_0 = \frac{U_{1H}}{I_{1XX}} \quad R_0 = \frac{P_{XX}}{I_{1XX}^2} \quad x_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2}$$

2. Коэффициент мощности:

$$\cos \varphi_{XX} = \frac{P_{XX}}{U_{1H} \cdot I_{1XX}}$$

27

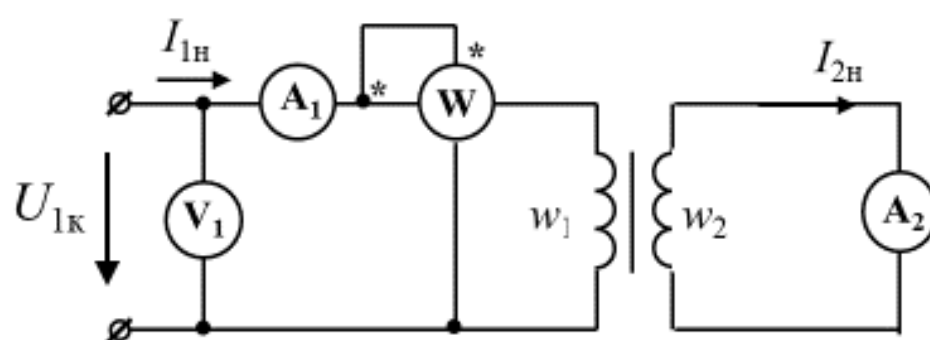
3. Потери в стали $P_{\text{ст}} \approx P_{\text{хх}}$

4. Коэффициент трансформации

$$k_{12} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} \approx \frac{U_{1\text{н}}}{U_{2\text{хх}}}$$

28

Опыт короткого замыкания



$$u_{\text{к}} = \frac{U_{1\text{к}}}{U_{1\text{н}}} \cdot 100\% = (5 \div 10)\% U_{1\text{н}}$$

- напряжение КЗ

29

Из опыта КЗ можно найти

1. Номинальные потери в обмотках (показание ваттметра)

$$P_K = R_1 I_{1H}^2 + R_2 I_{2H}^2$$

2. Параметры вторичной ветви схемы замещения:

$$R_K = \frac{P_K}{I_{1H}^2} \quad Z_K = \frac{U_{1K}}{I_{1H}} \quad x_K = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2}$$

3. Коэффициент мощности при КЗ

$$\cos \varphi_K = \frac{P_K}{U_{1K} I_{1H}}$$

30

Параметры Т-образной схемы замещения

$$x_{\sigma 1} = x'_{\sigma 2} = \frac{1}{2} x_K$$

$$R_1 = R'_2 = \frac{1}{2} R_K$$

31

Внешняя характеристика



32

Регулировка напряжения осуществляется изменением коэффициента трансформации с помощью отводов на первичной обмотке, которые позволяют изменять число витков в пределах $\pm 5\%$. Число витков регулируется переключателем.

33

Потери энергии и КПД трансформатора

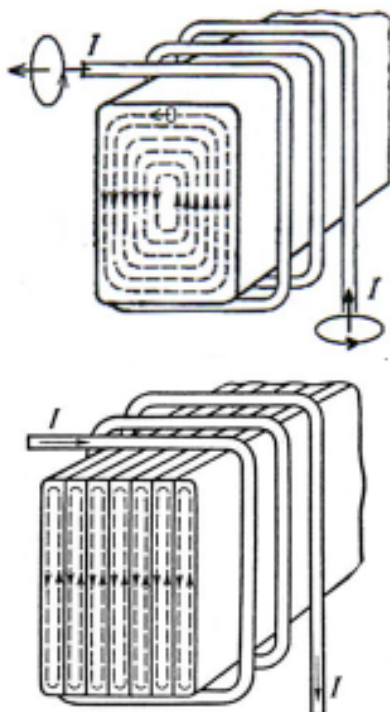
Потери: магнитные $P_{\text{ст}}$ (потери в стали на гистерезис и вихревые токи) и электрические $P_{\text{эл}}$ (потери на нагрев обмоток).

$P_{\text{ст}}$ определяются величиной и частотой Φ и не зависят от нагрузки: $P_{\text{ст}} = \text{const} \approx P_{\text{хх}}$

Мощность потерь КЗ

$$P_{\text{эл}} = R_{\text{к}} I_1^2 = R_{\text{к}} \frac{I_{1\text{н}}^2}{I_{1\text{н}}^2} I_1^2 = \beta^2 P_{\text{к}}$$

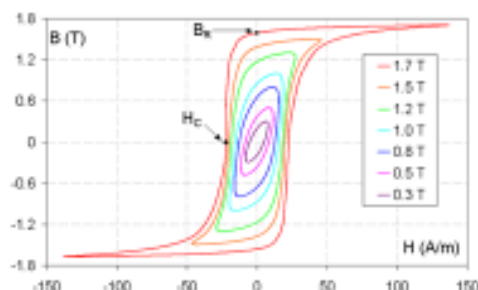
34



Переменный магнитный поток индуцирует ЭДС в сердечнике, т.к. сердечник является проводником. Если сердечник сплошной, то ЭДС создает в нем большие вихревые токи, которые нагревают его и вызывают значительные потери энергии. В шихтованном сердечнике эти потери уменьшаются во много раз.

Мощность потерь на вихревые токи уменьшается пропорционально квадрату числа пластин.

35



Потери на гистерезис можно сравнить с потерями на трение — под воздействием переменного магнитного поля магнитные домены должны изменять свое направление, преодолевая силы внутреннего сцепления в ферромагнетике. Эти потери за один цикл перемагничивания пропорциональны площади петли гистерезиса материала.

Суммарные потери энергии в стали сердечника пропорциональны квадрату магнитного потока

36

КПД определяют по формуле:

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_{эл} + P_{ст}} = \frac{U_2 I_2 \cos \varphi_2}{U_2 I_2 \cos \varphi_2 + P_{эл} + P_{ст}} =$$

$$\frac{U_2 \frac{I_{2н}}{I_{2н}} I_2 \cos \varphi_2}{U_2 \frac{I_{2н}}{I_{2н}} I_2 \cos \varphi_2 + \beta^2 P_K + P_{ст}} \approx \frac{\beta S_H \cos \varphi_2}{\beta S_H \cos \varphi_2 + \beta^2 P_K + P_{хх}}$$

$S_H = U_2 I_{2н}$ — номинальная полная мощность

37

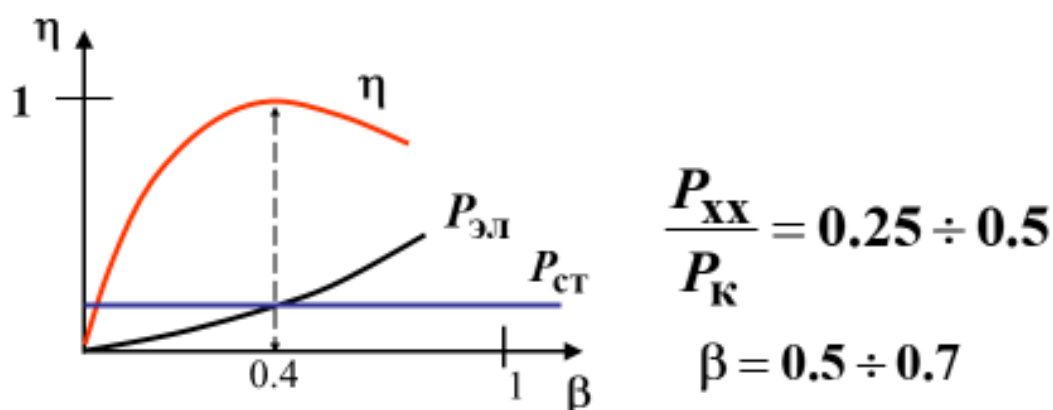
КПД определяют по формуле:

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_{\text{эл}} + P_{\text{ст}}} = \frac{U_2 I_2 \cos \varphi_2}{U_2 I_2 \cos \varphi_2 + P_{\text{эл}} + P_{\text{ст}}} =$$

$$\frac{U_2 \frac{I_{2\text{н}}}{I_{2\text{н}}} I_2 \cos \varphi_2}{U_2 \frac{I_{2\text{н}}}{I_{2\text{н}}} I_2 \cos \varphi_2 + \beta^2 P_{\text{к}} + P_{\text{ст}}} \approx \frac{\beta S_{\text{н}} \cos \varphi_2}{\beta S_{\text{н}} \cos \varphi_2 + \beta^2 P_{\text{к}} + P_{\text{хх}}}$$

$S_{\text{н}} = U_2 I_{2\text{н}}$ — номинальная полная мощность

37



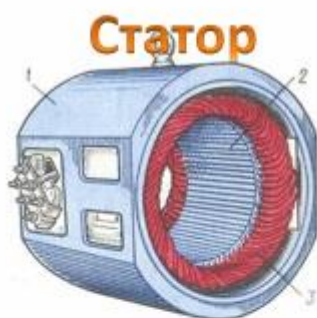
Наибольшее значение КПД трансформатора будет при токе нагрузки 50-70% номинального.

Максимальный КПД силовых трансформаторов доходит до 99.5%.

39

Асинхронной называется машина, у которой скорость вращения ротора всегда несколько меньше скорости вращения магнитного поля статора.

Принцип действия: на обмотку статора подается напряжение, под действием которого по этим обмоткам протекает ток и создает вращающееся магнитное поле. Магнитное поле воздействует на проводники ротора и по закону магнитной индукции наводит в них ЭДС, под действием которой в них возникает ток. Токи в проводниках ротора создают собственное магнитное поле, которое вступает во взаимодействие с вращающимся магнитным полем статора. В результате на каждый проводник действует сила, которая складываясь по окружности создает вращающийся электромагнитный момент ротора.

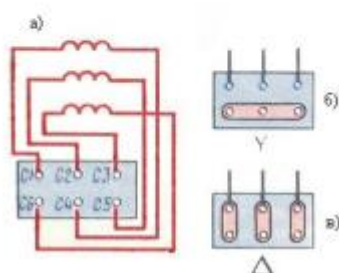


Сердечник статора набирается из листовой электротехнической стали и запрессовывается в станину. Станина (1) выполняется литой, из немагнитного материала (чугуна или алюминия). На внутренней поверхности листов (2), из которых выполняется сердечник статора, имеются пазы, в которые закладывается трёхфазная обмотка (3). Обмотка статора выполняется в основном из изолированного медного провода круглого или прямоугольного сечения, реже – из алюминия.

Обмотка статора состоит из трёх отдельных частей, называемых **фазами**. Начала фаз обозначаются буквами c_1, c_2, c_3 , концы – c_4, c_5, c_6 (рис. А)

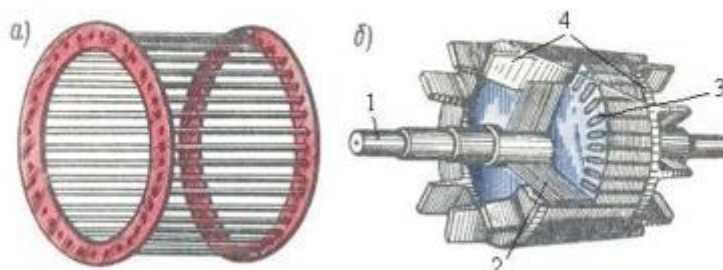
Начала и концы фаз выведены на клеммник, закреплённый на станине. Обмотка статора может быть соединена звездой (б) или треугольником (в). Выбор соединения зависит от линейного напряжения сети и паспортных данных двигателя.

В паспорте трёхфазного двигателя задаются линейные напряжения сети и схема соединения обмотки статора. Например, **660/380, Y/Δ** (в сеть с $U_{\text{л}} = 660\text{В}$ по схеме звезда или в сеть с $U_{\text{л}} = 380\text{В}$ – по схеме треугольник)

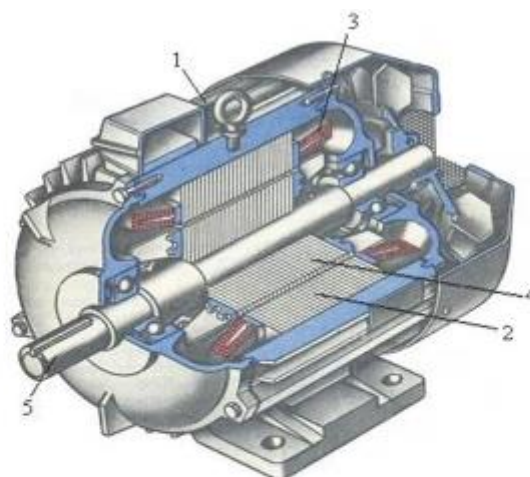


Ротор

- **Сердечник ротора** набирается из листов электротехнической стали, на внешней стороне которых имеются пазы, в которые закладывается обмотка ротора. Обмотка ротора бывает двух видов: **короткозамкнутая** и **фазная**. Соответственно этому асинхронные двигатели бывают с короткозамкнутым ротором и фазным ротором (с контактными кольцами).



- Короткозамкнутая обмотка ротора состоит из стержней 3, которые закладываются в пазы сердечника ротора. С торцов стержни замыкаются торцевыми кольцами 4. Такая обмотка называется "беличья клетка". Двигатель с таким ротором не имеет подвижных контактов. За счёт этого такие двигатели обладают высокой надёжностью. Обмотка ротора выполняется из меди, алюминия, латуни и других материалов.



- Вид асинхронной машины с короткозамкнутым ротором в разрезе: 1 – станина, 2 – сердечник статора, 3 – обмотка статора, 4 – сердечник ротора с короткозамкнутой обмоткой, 5 – вал.



5



Скольжение

- Разность частот вращения ротора и магнитного поля статора называется скольжением.

Частоты вращения магнитного поля

p	1	2	3	4	5
n_1	3000	1500	1000	750	600



31

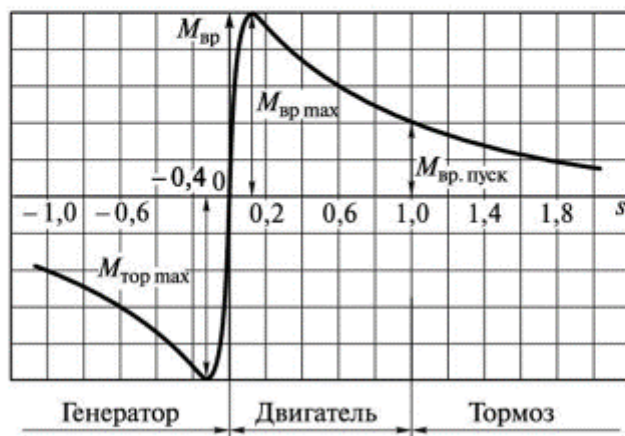
Частоты вращения магнитного поля

p	1	2	3	4	5
n_1	3000	1500	1000	750	600



32

- В режиме идеального **холостого хода** ротор и магнитное поле вращаются с одинаковой частотой в одном направлении, **скольжение** $s=0$, ротор неподвижен относительно вращающегося магнитного поля, ЭДС в его обмотке не индуцируется, ток ротора и электромагнитный момент машины равны нулю.
- **При пуске** ротор в первый момент времени неподвижен: $s=1$.
- В общем случае скольжение **в двигательном режиме** изменяется от $s=1$ при пуске до $s=0$ в режиме идеального холостого хода.



Магнитные поля и ЭДС асинхронного двигателя

Основной магнитный поток асинхронного двигателя, вращаясь в пространстве, пересекает обмотку статора со скоростью n_1 и обмотку ротора со скоростью n_2 , наводя в них основные ЭДС:

$$E_1 = 4,44 f_1 W_1 \Phi k_1 \quad E_{2s} = 4,44 f_2 W_2 \Phi k_2$$

где $W_1 k_1$ и $W_2 k_2$ - произведения чисел витков на обмоточные коэффициенты; $E_{2s} = E_2 s$.

Потоки рассеяния $\Phi_{рс1}$ $\Phi_{рс2}$ наводят в обмотках ЭДС рассеяния E_{p1} и E_{p2} , которые, как в трансформаторе, могут быть выражены через соответствующие токи I_1 и I_2 и индуктивные сопротивления x_1 и x_{2s} .

$$E_{p1} = j I_1 x_1 \quad E_{p2} = j I_2 x_{2s}$$

где x_1 и x_{2s} - индуктивные сопротивления рассеяния обмоток статора и ротора.

Основные уравнения асинхронного двигателя

Напряжение U_1 , приложенное к фазе обмотки статора, уравнивается основной ЭДС E_1 , ЭДС рассеяния и падением напряжения на активном сопротивлении обмотки статора

$$U_1 = (-E_1) + I_1 x_1 + I_1 r_1$$

В роторной обмотке аналогичное уравнение будет иметь вид:

$$U_2 = E_{2s} + I_2 x_{2s} + I_2 r_2$$

Но т.к. роторная обмотка замкнута, то напряжение $U_2=0$, и если учесть еще, что $E_{2s}=SE_2$ и $x_{2s}=Sx_2$, то уравнение можно переписать в виде:

$$0 = E_2 - I_2 x_2 - I_2 \frac{r_2}{S}$$

Уравнение токов асинхронного двигателя повторяет аналогичное уравнение трансформатора:

$$I_1 = I_{01} + (-I'_2) = I_{01} + \left(-I_2 \frac{w_2}{w_1} \right)$$

Приведение параметров обмотки ротора к обмотке статора

Для того чтобы параметры ротора и статора изобразить на одной векторной диаграмме, произведем приведение параметров обмотки ротора к параметрам обмотки статора. При этом обмотку ротора с числом фаз m_2 , обмоточным коэффициентом k_2 и числом витков W_2 заменяют обмоткой с $m_1 \times k_1 \times W_1$, соблюдая при этом энергетический баланс в роторе.

$$1) \quad E_2 \rightarrow E'_2$$

$$\frac{E'_2}{E_2} = \frac{W_1 K_{01}}{W_2 K_{02}} = K_e \quad - \text{коэффициент трансформации по ЭДС}$$

$$E'_2 = E_2 K_e$$

Приведение параметров обмотки ротора к обмотке статора

- 2) $I_2 \rightarrow I'_2$ - (полная мощность ротора до и после приведения должна быть неизменной)

$$\text{где } m_1 E'_2 I'_2 = m_2 E_2 I_2$$

$$I'_2 = I_2 \frac{m_2 E_2}{m_1 E'_2} = I_2 \frac{m_2 W_2 K_{02}}{m_1 W_1 K_{01}}$$

$$I'_2 = \frac{I_2}{K_i}$$

$$K_i = \frac{m_1 W_1 K_{01}}{m_2 W_2 K_{02}} \quad - \text{коэффициент трансформации по току.}$$

Приведение параметров обмотки ротора к обмотке статора

- 3) $I_2 \rightarrow I'_2$ - (потери в роторе до и после приведения должны быть неизменными)

$$m_1 I'^2_2 r'_2 = m_2 I^2_2 r_2$$

$$r'_2 = r_2 \frac{m_2}{m_1} \left(\frac{I'_2}{I_2} \right)^2 = r_2 \frac{m_2 m_1^2 (W_1 K_{01})^2}{m_1 m_2^2 (W_2 K_{02})^2} = r_2 \frac{W_1 K_{01}}{W_2 K_{02}} \cdot \frac{m_1 W_1 K_{01}}{m_2 W_2 K_{02}} = r_2 K_e K_i$$

$$\text{где } m_1 \neq m_2$$

Для двигателей с фазным ротором $m_1 = m_2$

$$r'_2 = r_2 K_e K_i$$

$$r'_2 = r_2 K_e^2$$

Приведение параметров обмотки ротора к обмотке статора

- 4) $X_2 \rightarrow X'_2$ - (угол сдвига между ЭДС и током ротора до и после приведения должен быть неизменным)

$$\operatorname{tg} \psi_2 = \frac{X_2}{r_2} = \frac{X'_2}{r'_2} \quad X'_2 = X_2 \frac{r'_2}{r_2} = X_2 K_e^2 \quad X'_2 = X_2 K_e^2$$

Соответственно $Z'_2 = Z_2 K_e^2$

Далее во всех схемах замещения и на векторных диаграммах будем использовать приведенные параметры ротора.

Векторная диаграмма асинхронного двигателя

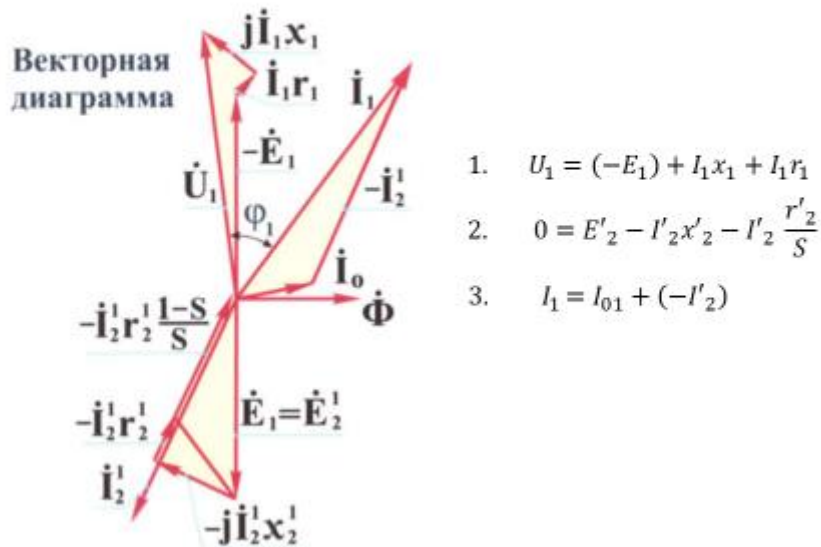
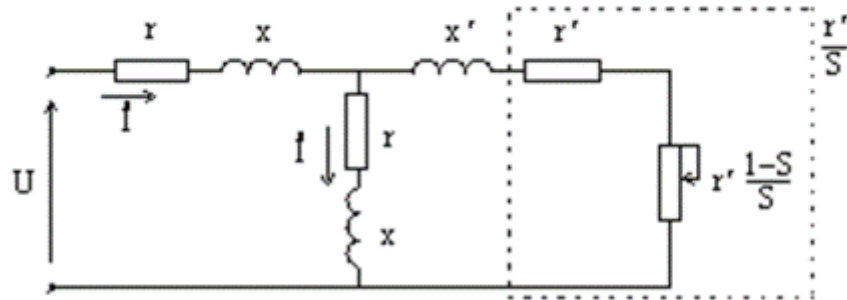


Схема замещения асинхронной машины

Реально обмотки статора и ротора связаны электромагнитно. Схемы, где электромагнитная связь обмоток заменяется электрической, называются схемами замещения асинхронной машины. В теории асинхронных машин используются две схемы замещения: а) Т-образная; б) Г-образная.

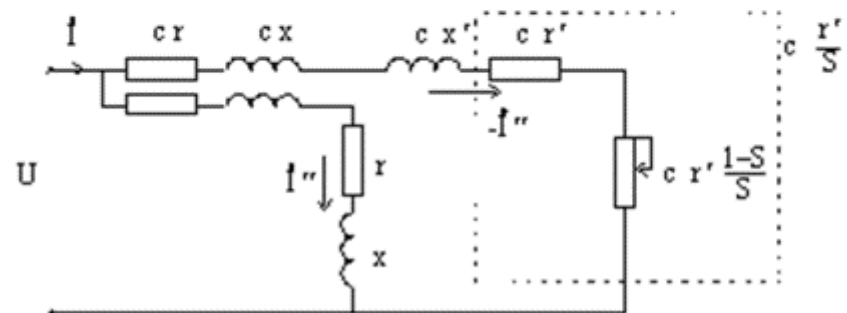


Т-образная схема замещения

Схема замещения асинхронной машины

Чаще пользуются Г-образной схемой замещения. При переходе к Г-образной схеме замещения:

- ток I_1 должен оставаться неизменным, т.е. $I_1 = \text{const}$;
- изменяя скольжение $S = 0$ ток $I_0 = I''_2$, т.е. ток I''_2 должен проходить по тем же сопротивлениям Z_1 и Z_m ;
- параметры первичной обмотки и вторичной обмотки соответственно должны измениться на коэффициент C_1 и C_1^2 .



Механическая характеристика АД

Зависимость электромагнитного момента от скольжения называется механической характеристикой

$$M = \frac{m_1 U_1^2 \frac{r_2'}{S}}{\omega_1 \left[\left(r_1 + C_1 \frac{r_2'}{S} \right)^2 + (X_1 + C_1 X_2')^2 \right]}$$

Из выражения видно, что электромагнитный момент асинхронного двигателя зависит от U^2 квадрата подведенного напряжения, т.е. если U уменьшить на 10%, то момент уменьшится на 19%.

В момент пуска двигателя, когда $n_2=0$, скольжение $S=1$, тогда

$$M_n = \frac{m_1 U_1^2 r_2' p}{2\pi f \left[(r_1 + C_1 r_2')^2 + (X_1 + C_1 X_2')^2 \right]}$$

Максимальный (критический) момент

Определим критическое скольжение – $S_{кр}$, соответствующего максимальному моменту

$$S_{кр} = \pm \frac{C_1 r_2'}{\sqrt{r_1^2 + (X_1 + C_1 X_2')^2}}$$

обычно $r_1 \ll (X_1 + C_1 X_2')$, то $S_{кр} \cong \pm \frac{C_1 r_2'}{X_1 + C_1 X_2'}$

Выражение максимального момента

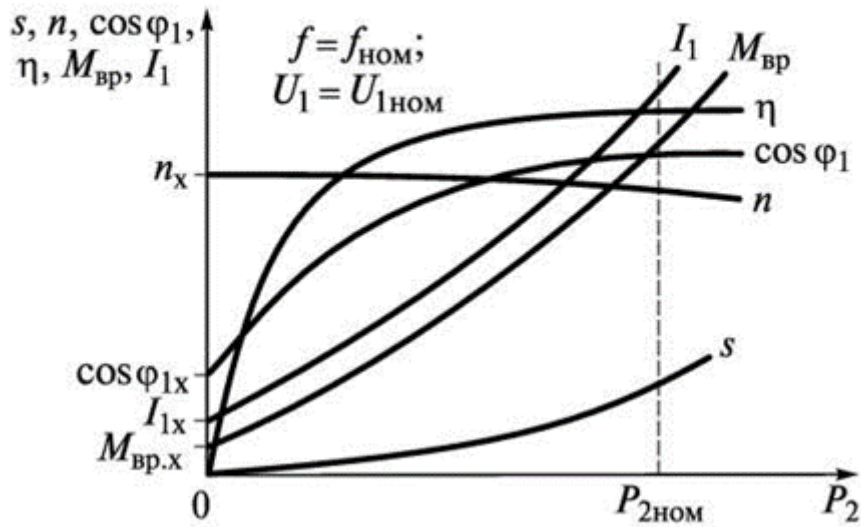
$$M_{кр} = \frac{m_1 U_1^2 P}{4\pi f_1 C_1 \left[\pm r_1 + \sqrt{r_1^2 + (X_1 + C_1 X_2')^2} \right]}$$

Знак + - соответствует двигательному режиму

Знак - - соответствует генераторному режиму

При генераторном режиме $M_{кр,z} > M_{кр,d}$

Рабочие характеристики асинхронного двигателя

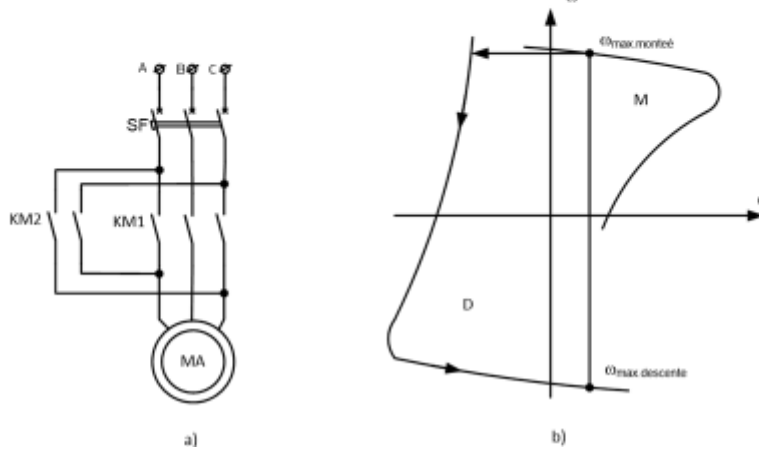


Пуск АД

АД с короткозамкнутым ротором:

- а) прямой пуск при помощи рубильников, переключателей, магнитных пускателей.
- б) пуск при пониженном напряжении переключением со звезды на треугольник, а также при помощи пусковых реостатов и автотрансформаторов.

Изменение направления вращения АД



ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА.

1 Общие сведения.

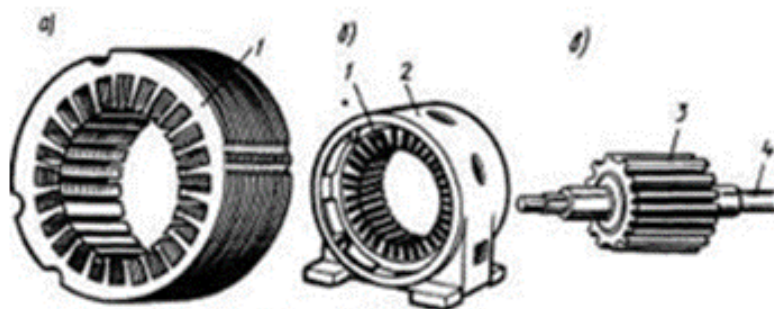
Электрические машины переменного тока осуществляют прямое и обратное преобразование электрической энергии переменного тока и механической энергии посредством вращающегося электромагнитного поля.

Электрические машины переменного тока

Асинхронные	Синхронные
Соотношение частот вращения магнитного поля статора n_1 и ротора n_2	
$n_1 \neq n_2$	$n_1 = n_2$
Область применения	
Двигатели до 100 кВт, тахогенераторы	Двигатели до 1 кВт, более 100 кВт, генераторы
Конструкция статора: одно-, двух-, трехфазная пазовая распределенная обмотка	
Конструкция ротора	
Фазный ротор, «беличья клетка»	С постоянными магнитами, обмоткой возбуждения, пассивный

Основные элементы конструкции:

1. Сердечник статора;
2. Корпус;
3. Сердечник ротора;
4. Вал;
5. Обмотки статора и ротора (на рисунке не показаны).



Исторически первыми машинами переменного тока были генераторы Фарадея и др. ученых, относящиеся к концу 18-го века.

Долгое время машины постоянного тока имели более высокие характеристики и совершенную конструкцию, пока в конце 19-го века не была изобретена трехфазная система питания, совершившая революцию в области электрических машин. С ее появлением были созданы трехфазные машины переменного тока, которые получили широкое распространение.

2 Магнитное поле машины переменного тока.

Обмотка статора представляет собой распределенную по окружности обмотку, уложенную в пазах статора, витки которой состоят из **активных проводников** и соединяющих их **лобовых частей**.

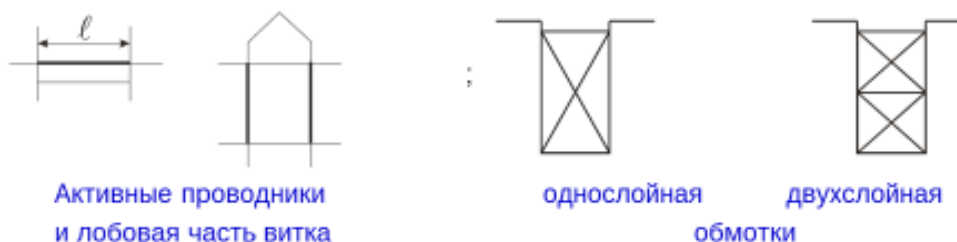


В зависимости от способа заполнения паза обмотки статора бывают **однослойные** и **двухслойные**.

Проводники обмотки соединяются в секции, а секции – в катушки. Катушки разбиваются на одинаковые группы по числу фаз и располагаются симметрично по окружности статора, образуя многофазную обмотку.

2 Магнитное поле машины переменного тока.

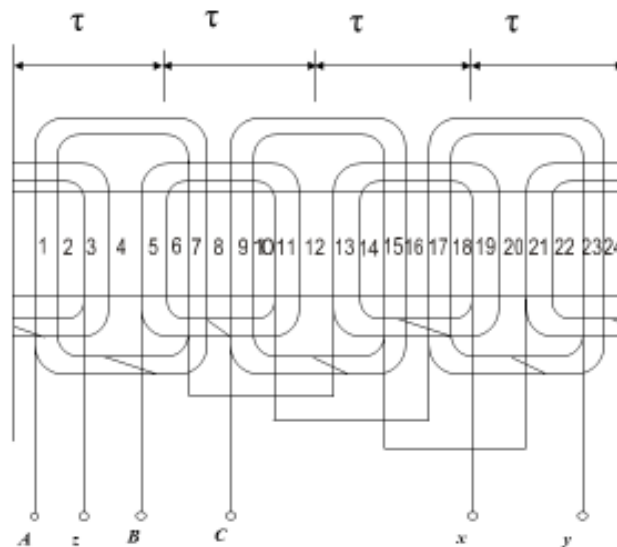
Обмотка статора представляет собой распределенную по окружности обмотку, уложенную в пазах статора, витки которой состоят из **активных проводников** и соединяющих их **лобовых частей**.



В зависимости от способа заполнения паза обмотки статора бывают **однослойные** и **двухслойные**.

Проводники обмотки соединяются в секции, а секции – в катушки. Катушки разбиваются на одинаковые группы по числу фаз и располагаются симметрично по окружности статора, образуя многофазную обмотку.

Пример трехфазной однослойной concentрической двухплоскостной обмотки:



Полюсное деление статора:

$$\tau = \frac{\pi D}{2p}; \quad \tau_Z = \frac{Z}{2p},$$

где D – диаметр расточки статора;
 p – число пар полюсов статора;
 Z – общее число пазов статора.

Распределенность обмотки по пазам определяется числом пазов, приходящихся на полюс и фазу:

$$q = \frac{Z}{2pm},$$

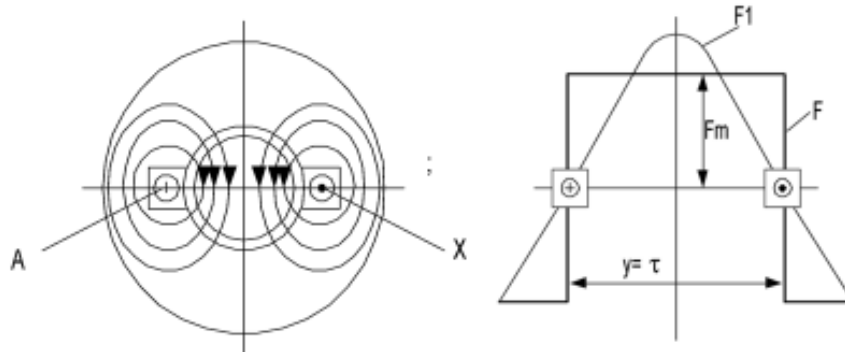
$q=1$ – сосредоточенная обмотка,
 $q>1$ – распределенная обмотка.

где m – число фаз машины.

Простейший элемент обмотки статора – виток, проводники которого уложены в пазах статора, расположенных на расстоянии y , равном полюсному делению τ .

МДС однофазной обмотки.

Простейшая двухполюсная машина с сосредоточенной обмоткой.



МДС обмотки при питании синусоидальным током:

$$F_K = \sqrt{2} I w = I_m w;$$

$$F_m = \frac{F_K}{2}.$$

I_m, F_m - мгновенные значения тока и МДС.

МДС и магнитное поле однофазной обмотки - **пульсируют**, так как МДС имеет постоянное основание τ и переменную высоту F_m , пропорциональную мгновенному значению синусоидального тока.

Амплитуда основной гармоники МДС:

$$F_{1m} = \frac{4}{\pi} F_m = \frac{4\sqrt{2}}{2\pi} I w = 0,9 I w.$$

Основная пространственная гармоника МДС изменяется как во времени, так и в пространстве:

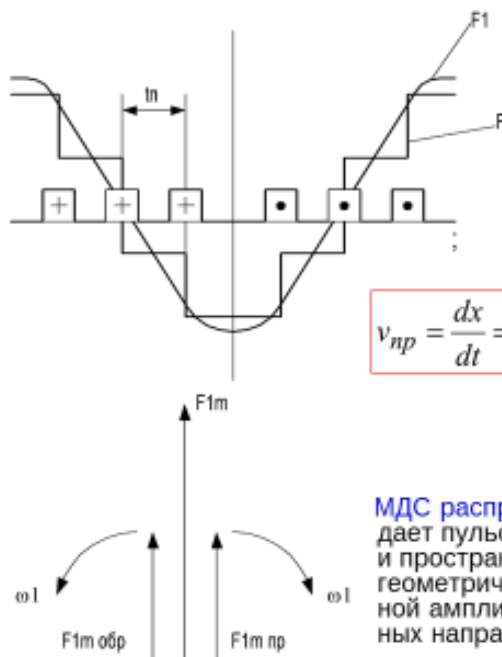
$$F_1(t, x) = 0,9 I w \cos\left(\frac{\pi}{\tau} x\right) \sin(\omega t).$$

$$F_1(t, x) = \frac{1}{2} F_{1m} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x\right) + \frac{1}{2} F_{1m} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{\tau} x\right) = F_{np} + F_{обр};$$

Прямо и обратно бегущие волны МДС:

$$F_{np} = \frac{1}{2} F_{1m} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x\right);$$

$$F_{обр} = \frac{1}{2} F_{1m} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{\tau} x\right).$$



МДС распределенной
однофазной обмотки:

$$F_{1m} = 0,9 I w k_{об},$$

где $k_{об}$ – обмоточный
коэффициент
для 1-й гармоники.

Скорость и частота прямо
бегущей волны:

$$v_{np} = \frac{dx}{dt} = \frac{\omega \tau}{\pi} = \frac{2\pi f_1 \tau}{\pi} = 2f_1;$$

$$n_1 = \frac{60 v_{np}}{\pi D} = \frac{60 2 f_1}{2 p \tau} = \frac{60 f_1}{p}.$$

МДС распределенной однофазной обмотки создает пульсирующую синусоидально во времени и пространственно распределенную МДС в виде геометрической суммы двух векторов половинной амплитуды и вращающихся в противоположных направлениях с угловой частотой ω_1

АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ МАЛОЙ МОЩНОСТИ.

1 Конструкции АД.

Однофазные асинхронные двигатели.

Однофазные АД – двигатели малой мощности для систем автоматики и бытовой техники.

Конструкция: статор с однофазной распределенной обмоткой, уложенной в пазах и занимающей 2/3 окружности; ротор с КЗ обмоткой.

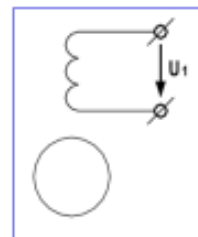
Магнитное поле: пульсирует с частотой сети и имеет распределение индукции, близкое к синусоидальному.

Скольжение ротора относительно прямо бегущего поля:

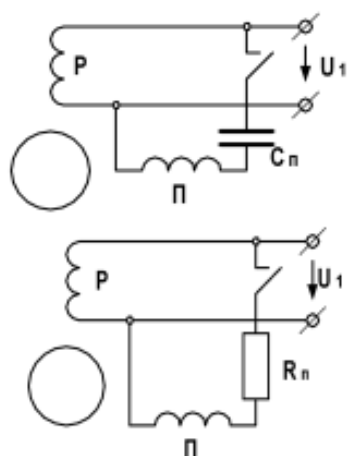
$$s_{np} = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = s.$$

Скольжение ротора относительно обратно бегущего поля:

$$s_{обр} = \frac{n_1 - (-n_2)}{n_1} = \frac{n_1 + n_2}{n_1} = 2 - s$$

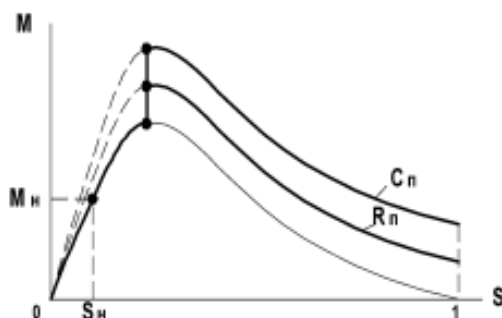


Схемы включения и характеристики однофазного АД.



При пуске с R поле эллиптическое, применяется для малых пусковых моментов.

При пуске с C можно получить и круговое поле.



Достоинства:

- ▶ простота конструкции;
- ▶ надежность.

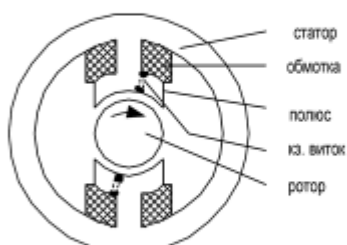
Недостатки:

- ▶ большая емкость и габариты фазосдвигающего конденсатора (20...30 мкФ);
- ▶ худшие характеристики из-за обратно бегущего поля.

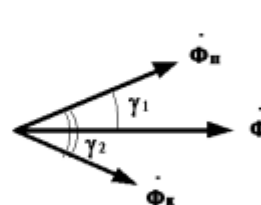
Однофазный АД с экранированными полюсами.

Конструкция: статор с явно выраженными полюсами, имеющими продольные пазы с КЗ витками (экранами) и сосредоточенной обмоткой; КЗ ротор.

Магнитное поле: эллиптическое, состоит из двух составляющих, смещенных в пространстве и по фазе.



$$\dot{\Phi} = \dot{\Phi}_n + \dot{\Phi}_k$$



Достоинства:

- ▶ простота конструкции;
- ▶ меньшие шумы в работе;
- ▶ надежность.

Недостатки:

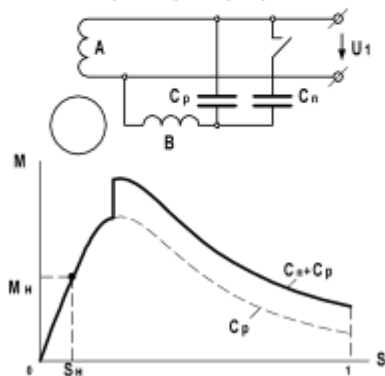
- ▶ невысокие характеристики;
- ▶ малая мощность и пусковой момент.
- ▶ нереверсивность;

Конденсаторный АД.

Конструкция: статор с двумя равноценными обмотками, занимающими одинаковое число пазов, сдвинутыми в пространстве на 90 эл. градусов; КЗ ротор.

Магнитное поле: вращающееся во всех режимах работы, круговое при пуске и в номинальном режиме.

Питание: от однофазной сети, обмотка А – непосредственно, В – через C_p или $C_p + C_n$ ($C_n = (5 \dots 7)C_p$).



$$C_p = \frac{I_A \cos \varphi_A}{U_1 f_1 k}; \quad k = \frac{U_B}{U_A} = \frac{w_B k_{обБ}}{w_A k_{обА}}.$$

Напряжение на конденсаторе:

$$U_C = \sqrt{U_A^2 + U_B^2} = U_1 \sqrt{1 + k^2}$$

Достоинства:

► повышенный пусковой момент.

Недостатки:

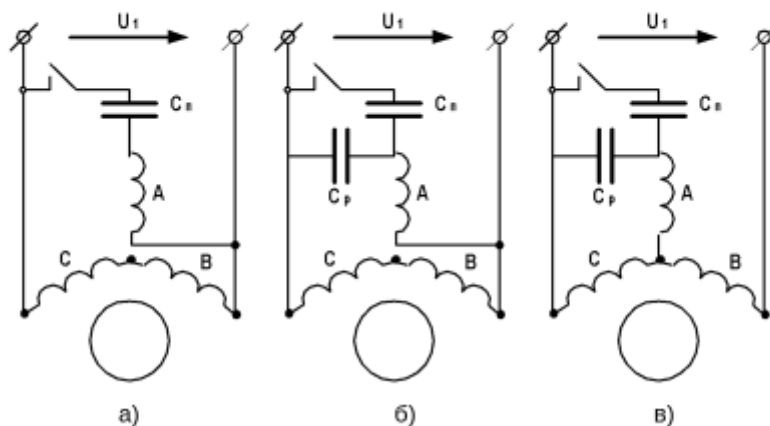
► габариты конденсаторов.

Универсальный АД.

Конструкция: статор с трехфазной распределенной обмоткой; КЗ ротор.

Магнитное поле: соответствующее режиму однофазному, конденсаторному, трехфазному режиму работы двигателя.

Питание: от однофазной, трехфазной сети.

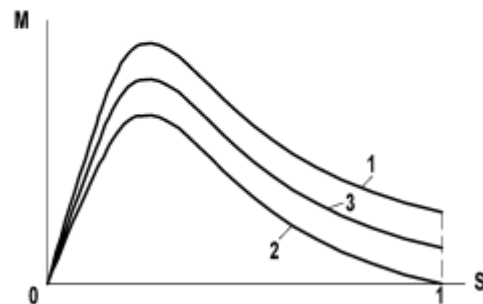


Емкость рабочего конденсатора:

б) $C_p = \frac{10^6}{2\omega_1 Z_\phi};$

в) $C_p = \frac{10^6}{\sqrt{3}\omega_1 Z_\phi}.$

Механические характеристики универсального АД:



- 1 – работа от трехфазной сети;
- 2 – работа от однофазной сети без конденсаторов (40...50% мощности);
- 3 – работа от однофазной сети с рабочим конденсатором (70...80% мощности).

Достоинства:

- ▶ универсальное питание;
- ▶ широкое применение.

Недостатки:

- ▶ габариты конденсаторов;
- ▶ малая мощность и пусковой момент.

Достоинства и недостатки СД



Достоинства	Недостатки
1. Постоянная частота вращения 2. Высокий КПД (90-95%) 3. Коэффициент мощности близок к 1 ($\cos\varphi=1$) 4. Возможность использования СД в качестве генератора 5. Возможность регулировки перегрузочной способности двигателя за счет изменения тока возбуждения I_B; 6. Абсолютная жесткость механической характеристики; 7. Меньшая зависимость вращающего момента от уровня напряжения сети по сравнению с АД; 8. Работоспособность при большем износе подшипников и менее точном монтаже ротора благодаря большему воздушному зазору между ротором и статором.	1. Износ контактных колец и щеток 2. Сложность конструкции и, следовательно, большая стоимость; 3. Необходимость наличия источника постоянного тока (возбудителя или выпрямителя); 4. Более сложный пуск и необходимость специальной аппаратуры синхронизации; 5. Возможность только частотного регулирования частоты

В промышленности синхронные двигатели обычно используют при $P > 100$ кВт. Широкое применение находят синхронные микродвигатели различной конструкции: гистерезисные, индукторные, шаговые.

U – образные характеристики СД

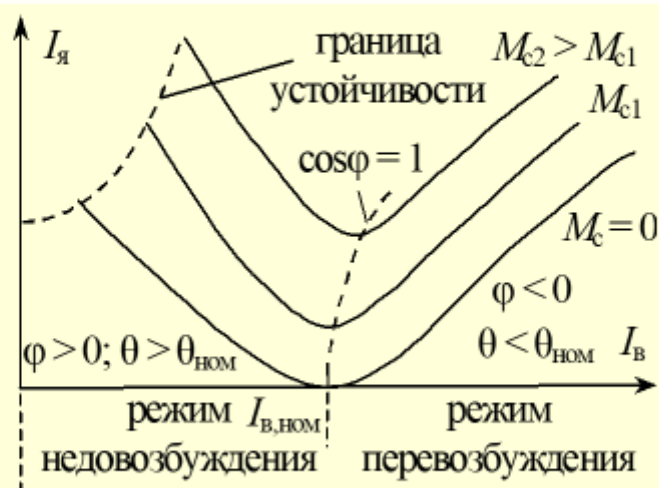
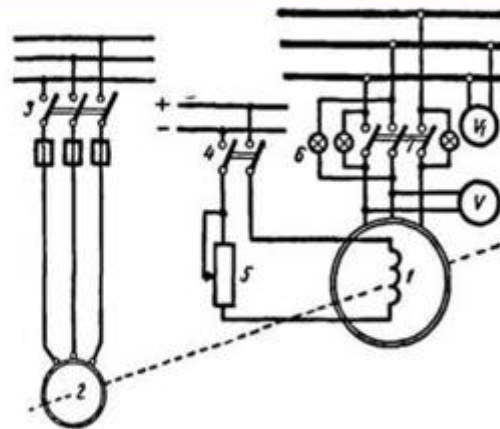




Схема пуска синхронного двигателя 1 с помощью вспомогательного асинхронного двигателя (2).



Фиг. 405. Схема пуска синхронного двигателя при помощи пускового двигателя

Асинхронный пуск СД

Запуск СД невозможен прямым включением в сеть из-за инерционности ротора

Для запуска СД ротору необходимо сообщить скорость, близкую к скорости вращения поля, в результате чего двигателя втянется в синхронизм и ротор будет вращаться с синхронной скоростью n_0

$\sim U (380V)$

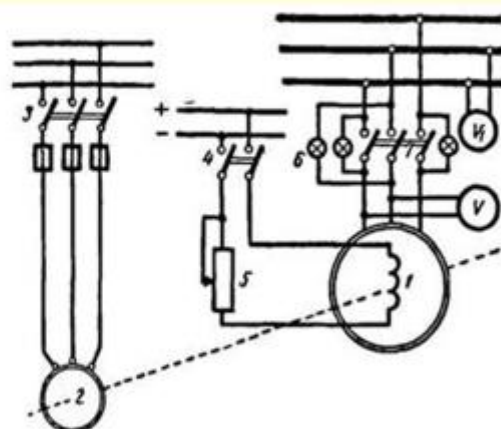
2. После подключения статора к сети $\sim U$ СД начинает разгоняться подобно АД с короткозамкнутым ротором

1. Перед пуском переключатель SA находится в положении, при котором ОВ замыкается на ограничительный резистор R

3. После достижения предсинхронной скорости переключателем SA подключают обмотку ротора (ОВ) к сети постоянного тока U_B , в результате чего СД втягивается в синхронизм

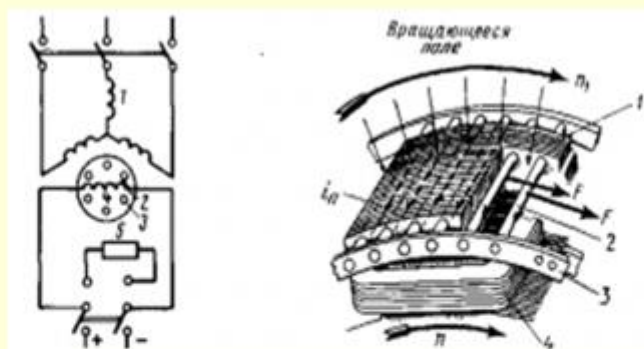


Схема пуска синхронного двигателя 1 с помощью вспомогательного асинхронного двигателя (2).

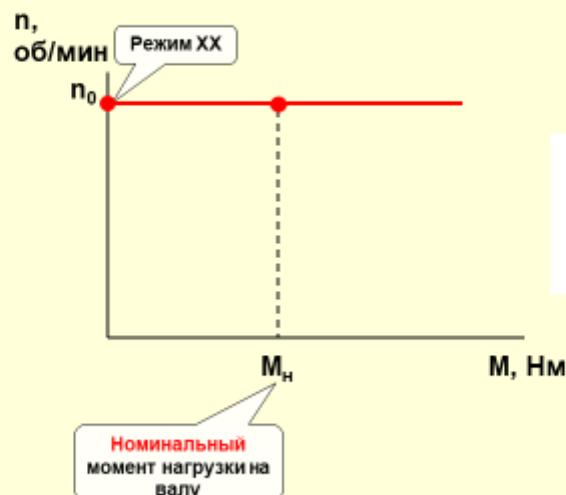


Фиг. 405. Схема пуска синхронного двигателя при помощи пускового двигателя

Асинхронный пуск синхронного двигателя



Механическая характеристика СД



Изменение угла θ при увеличении нагрузки на валу СД

В рабочем режиме синхронного двигателя $U_c = \text{const}$ и $X_c = \text{const}$. При этом ток возбуждения I_b и ЭДС E_0 постоянны, следовательно, электромагнитная мощность определяется только углом θ .

$$M = \frac{3UE_0 \sin \theta}{\Omega X_{\text{сн}}}$$

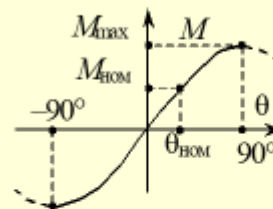
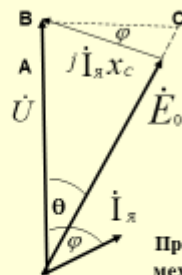
Пусть на валу двигателя имеется какая-то нагрузка, ротор вращается с постоянной частотой n и между осевыми линиями полюсов сохраняется постоянный угол θ . При увеличении нагрузки ротор двигателя начинает тормозиться и угол θ увеличивается.

Одновременно с этим увеличивается и электромагнитная мощность, которая поступает из сети.

При увеличении θ электромагнитная мощность уравновесит новую нагрузку на валу и ротор двигателя продолжает вращаться с той же частотой n , но при новом значении θ .

При уменьшении нагрузки все происходит в обратном порядке.

Векторная диаграмма, электромагнитный момент и угловая характеристика синхронного двигателя



Пренебрегая потерями, можно приближенно считать, что механическая мощность $P_{\text{мех}}$ на валу двигателя равна активной мощности P , потребляемой двигателем из сети, т. е.

$$M\Omega = 3UI_{\text{я}} \cos \varphi$$

где M – электромагнитный момент двигателя; $\Omega = \pi n/30$ – угловая скорость ротора; U – фазное напряжение обмотки статора. Поскольку проекции векторов E_0 и $jI_{\text{я}}X_{\text{сн}}$ на BC одинаковы, т. е. $X_{\text{сн}}I_{\text{я}}\cos\varphi = E_0\sin\theta$. Электромагнитный (вращающий) момент СД:

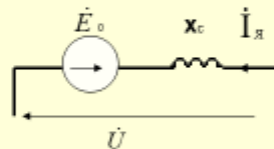
$$M = \frac{3UE_0 \sin \theta}{\Omega X_{\text{сн}}}$$

Упрощенная схема замещения и уравнение ЭДС, синхронного двигателя

В двигательном режиме ток якоря потребляется из сети, ЭДС E_0 направлена навстречу току $I_{\text{я}}$ (противоЭДС E_0).

Схема замещения фазной обмотки якоря показана на рисунке и для нее:

$$\dot{U} = \dot{E}_0 + jI_{\text{я}}X_{\text{сн}}$$



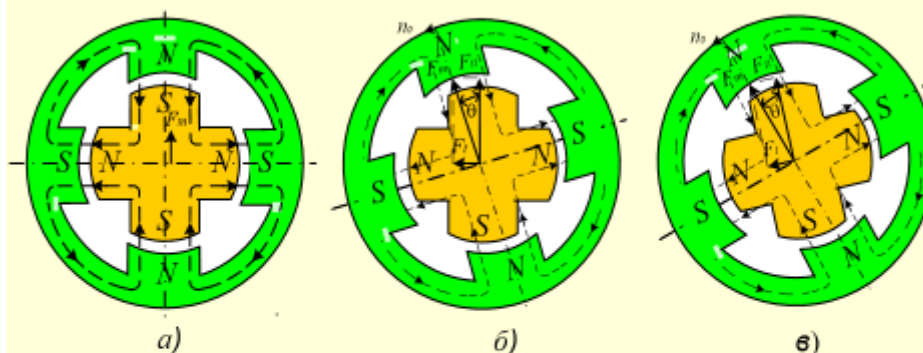
Предположим, что внешняя система полюсов (магнитное поле статора) неподвижна. Благодаря силам магнитного притяжения ротор расположится так, что его полюсы будут находиться под противоположными полюсами внешней системы (а). При таком расположении силы магнитного притяжения F_m направлены по оси полюсов и не создают электромагнитного момента.

Пусть внешняя система полюсов начала вращение с частотой n_s . В начальный момент эта система сместится относительно ротора на некоторый угол θ (б). Тогда вектор силы магнитного притяжения F_m также повернется относительно оси полюса ротора. Теперь $F_m = F_{\pi} + F_t$. Сила F_{π} – сила притяжения индуктора. Сила F_t называется тангенциальной. Она направлена перпендикулярно оси полюса. Совокупность составляющих F_t , действующих на все полюсы ротора, создает вращающий момент M . Под действием момента M ротор приходит в движение и в дальнейшем вращается синхронно с внешней системой, с частотой n_o (в).

Обязательным условием возникновения вращающего момента в синхронном двигателе является отставание магнитного поля ротора от вращающегося магнитного поля статора на угол θ .

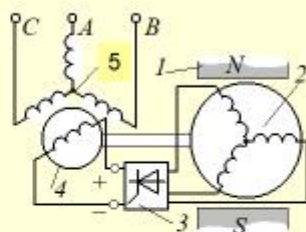
Упрощенная модель СД.

Возникновение электромагнитного момента на роторе.



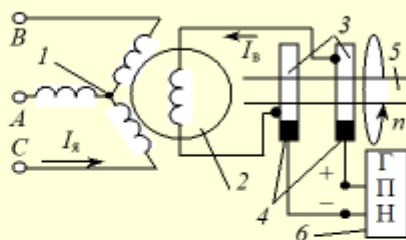
На модели представлены две разделенные воздушным зазором магнитные системы. Внешняя система имитирует вращающееся магнитное поле статора. Эта система вращается относительно своего центра. Внутренняя система модели имитирует ротор и его магнитное поле.

Схема машины с «бесщеточным» возбуждением



- 1 - неподвижные постоянные магниты маломощного СГ;
 - 2 - трехфазная обмотка маломощного СГ;
 - 3 - трехфазный выпрямитель;
 - 4 - обмотка возбуждения основной синхронной машины.
 - 5 - обмотка статора (якоря) основной СМ.
- Отсутствие скользящего контакта щетки – кольца повышает надежность системы возбуждения.

Электрическая схема синхронной машины

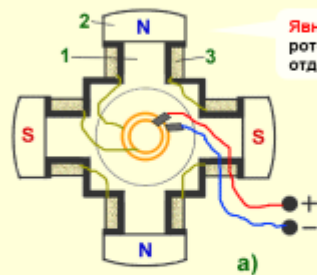


- 1 - трехфазная обмотка якоря (статора);
- 2 - обмотка возбуждения;
- 3 - контактные кольца;
- 4 - щетки;
- 5 - вал ротора;
- 6 - генератор постоянного напряжения.

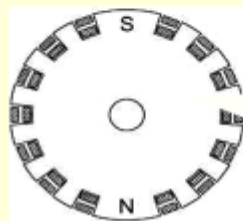
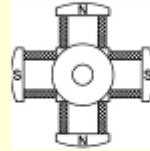
Мощность системы возбуждения составляет 1–3% от мощности якоря.

Явнополюсный и неявнополюсный роторы СМ

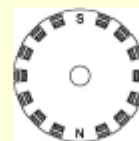
1 – полюс ротора; 2 – полюсный наконечник; 3 – обмотка возбуждения;



Явнополюсный – полюса ротора располагаются отдельно



Неявнополюсный – полюса ротора сформированы обмоткой, распределенной в пазах цилиндрического ротора

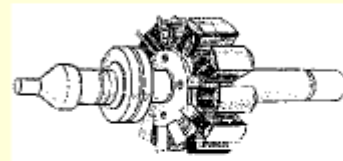
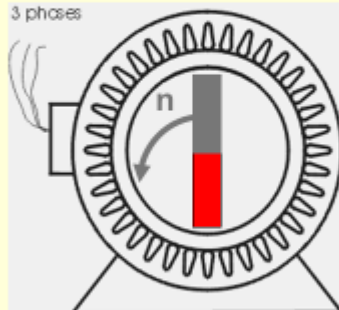


Устройство ротора СМ

Ротором СМ является электромагнит с ОВ (или постоянный магнит), которая получает питание от источника **постоянного тока** через неподвижные щетки и контактные кольца. Ротор СМ имеет свой магнитный поток.

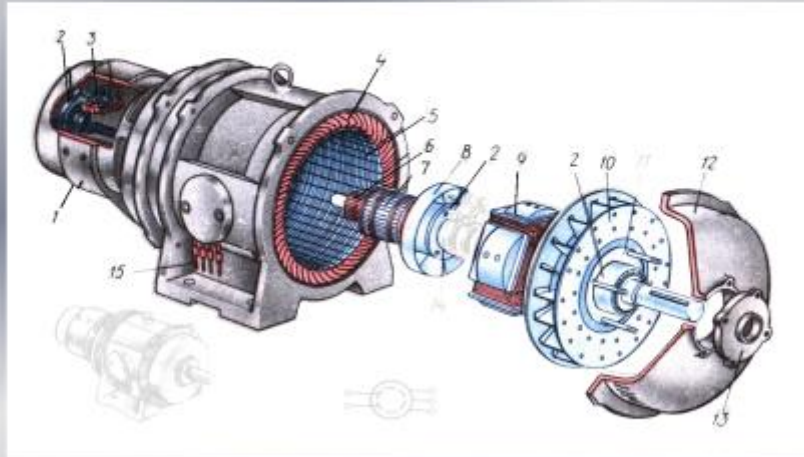
~U (380В)

3 phases

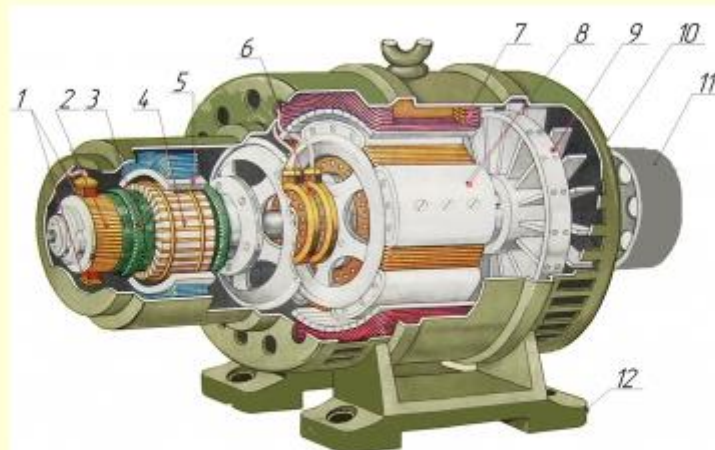


Название «**синхронная машина**» связано с тем, что ротор вращается **с такой же** скоростью, с какой вращается магнитное поле, т.е. **синхронно** с полем.

Устройство синхронной машины



УСТРОЙСТВО СИНХРОННОЙ МАШИНЫ



- 1 – щетки и щеткодержатели, 2 – коллектор, 3 – обмотка якоря,
4 – якорь, 5 – статор, 6 – контактные кольца, 7 – обмотка статора,
8 – ротор генератора, 9 – вентилятор, 10 – корпус генератора,
11 – привод, 12 – станина

Синхронные машины

Общие сведения

Синхронные машины работают как в режиме генератора, так и в режиме двигателя.

В зависимости от типа привода **синхронные генераторы** получили свои названия.

Турбогенератор приводится в движение паровой турбиной.

Гидрогенератор вращает водяное колесо.

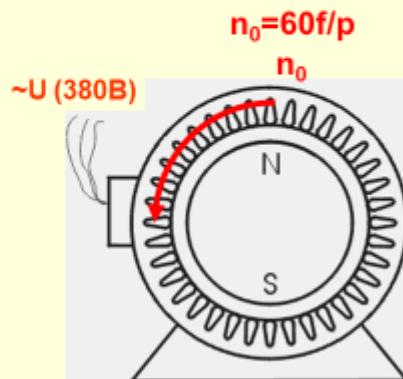
Дизель - генератор механически связан с двигателем внутреннего сгорания.

Синхронные двигатели широко применяют для привода мощных компрессоров, насосов, вентиляторов.

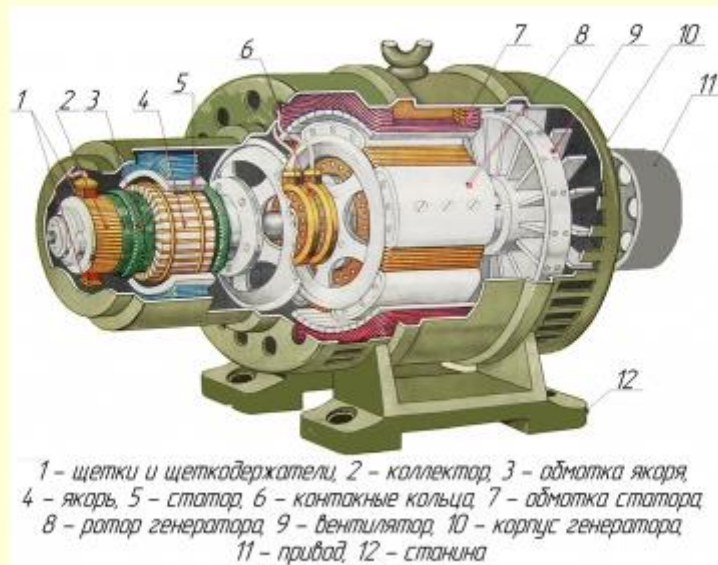
Синхронные микродвигатели используют для привода лентопотяжных механизмов регистрирующих приборов, магнитофонов и т.д.

Синхронная машина (СМ) – это машина переменного тока, у которой **магнитное поле и ротор** имеют **одинаковую** частоту вращения ($n_0=60f/p$)

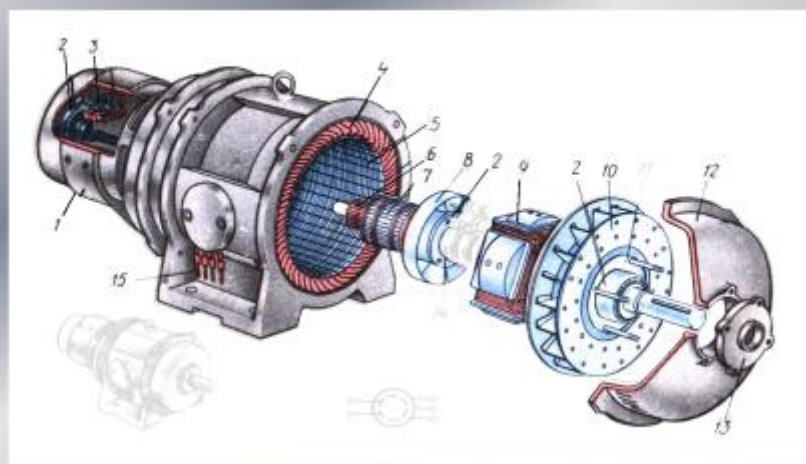
Статор СМ аналогичен статору АД и служит для создания вращающегося магнитного поля



УСТРОЙСТВО СИНХРОННОЙ МАШИНЫ



Устройство синхронной машины

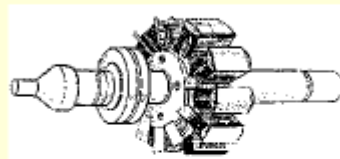
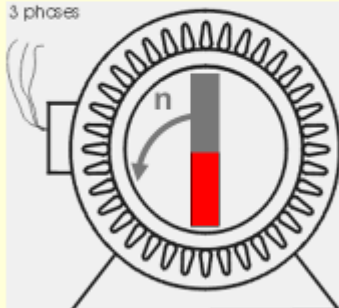


Устройство ротора СМ

Ротором СМ является электромагнит с ОВ (или постоянный магнит), которая получает питание от источника **постоянного тока** через неподвижные щетки и контактные кольца. Ротор СМ имеет свой магнитный поток.

~U (380В)

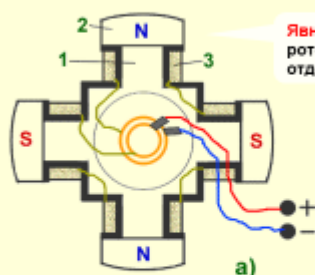
3 phases



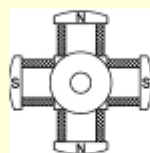
Название «**синхронная машина**» связано с тем, что ротор вращается **с такой же** скоростью, с какой вращается магнитное поле, т.е. **синхронно** с полем.

Явнополюсный и неявнополюсный роторы СМ

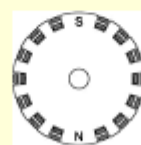
1 – полюс ротора; 2 – полюсный наконечник; 3 – обмотка возбуждения;



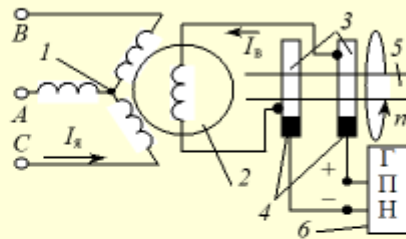
Явнополюсный – полюса ротора располагаются отдельно



Неявнополюсный – полюса ротора сформированы обмоткой, распределенной в пазах цилиндрического ротора



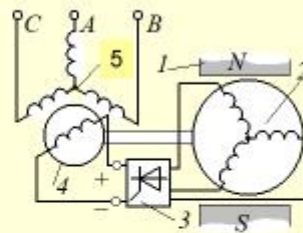
Электрическая схема синхронной машины



- 1 – трехфазная обмотка якоря (статора);
- 2 – обмотка возбуждения;
- 3 – контактные кольца;
- 4 – щетки;
- 5 – вал ротора;
- 6 – генератор постоянного напряжения.

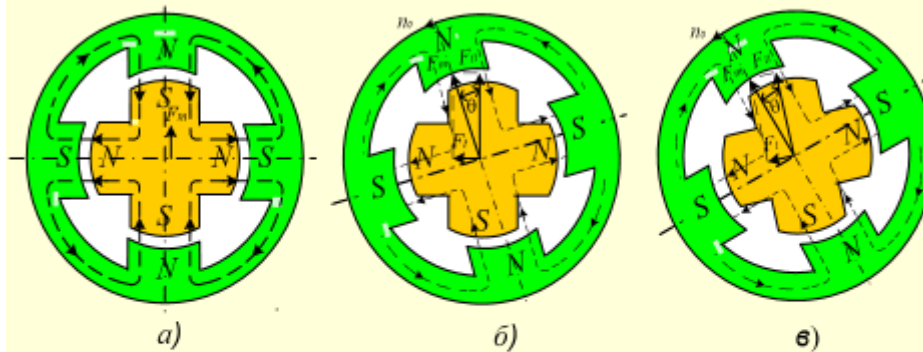
Мощность системы возбуждения составляет
1–3% от мощности якоря.

Схема машины с «бесщеточным» возбуждением



- 1 – неподвижные постоянные магниты маломощного СГ;
 - 2 – трехфазная обмотка маломощного СГ;
 - 3 – трехфазный выпрямитель;
 - 4 – обмотка возбуждения основной синхронной машины.
 - 5 – обмотка статора (якоря) основной СМ.
- Отсутствие скользящего контакта щетки – кольца повышает надежность системы возбуждения.

**Упрощенная модель СД.
Возникновение электромагнитного момента на роторе.**



На модели представлены две разделенные воздушным зазором магнитные системы. Внешняя система имитирует вращающееся магнитное поле статора. Эта система вращается относительно своего центра. Внутренняя система модели имитирует ротор и его магнитное поле.

Предположим, что внешняя система полюсов (магнитное поле статора) неподвижна. Благодаря силам магнитного притяжения ротор расположится так, что его полюсы будут находиться под противоположными полюсами внешней системы (а). При таком расположении силы магнитного притяжения F_m направлены по оси полюсов и не создают электромагнитного момента.

Пусть внешняя система полюсов начала вращение с частотой n_s . В начальный момент эта система сместится относительно ротора на некоторый угол θ (б).

Тогда вектор силы магнитного притяжения F_m также повернется относительно оси полюса ротора. Теперь $F_m = F_n + F_t$. Сила F_n – сила притяжения индуктора. Сила F_t называется тангенциальной.

Она направлена перпендикулярно оси полюса.

Совокупность составляющих F_t , действующих на все полюсы ротора, создает вращающий момент M . Под действием момента M ротор приходит в движение и в дальнейшем вращается синхронно с внешней системой, с частотой n_o (в).

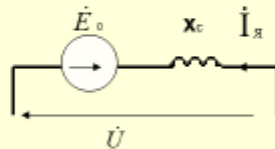
Обязательным условием возникновения вращающего момента в синхронном двигателе является отставание магнитного поля ротора от вращающегося магнитного поля статора на угол θ .

Упрощенная схема замещения и уравнение ЭДС, синхронного двигателя

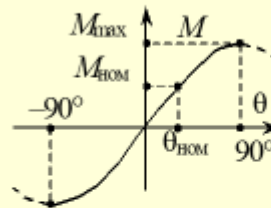
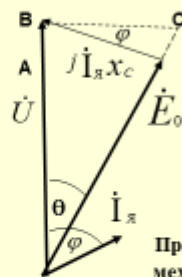
В двигательном режиме ток якоря потребляется из сети, ЭДС E_0 направлена навстречу току I_α (против ЭДС E_0).

Схема замещения фазной обмотки якоря показана на рисунке и для нее:

$$\dot{U} = \dot{E}_0 + jI_\alpha X_{сн}$$



Векторная диаграмма, электромагнитный момент и угловая характеристика синхронного двигателя



Пренебрегая потерями, можно приближенно считать, что механическая мощность $P_{мех}$ на валу двигателя равна активной мощности P , потребляемой двигателем из сети, т. е.

$$M\Omega = 3UI_\alpha \cos \varphi$$

где M – электромагнитный момент двигателя; $\Omega = \pi n/30$ – угловая скорость ротора; U – фазное напряжение обмотки статора. Поскольку проекция векторов E_0 и $jI_\alpha X_{сн}$ на BC одинаковы, т. е. $X_{сн}I_\alpha \cos \varphi = E_0 \sin \theta$. Электромагнитный (вращающий) момент СД:

$$M = \frac{3UE_0 \sin \theta}{\Omega X_{сн}}$$

Изменение угла θ при увеличении нагрузки на валу СД

В рабочем режиме синхронного двигателя $U_c = \text{const}$ и $X_c = \text{const}$. При этом ток возбуждения I_b и ЭДС E_0 постоянны, следовательно, электромагнитная мощность определяется только углом θ .

$$M = \frac{3UE_0 \sin \theta}{\Omega X_{\text{сн}}}$$

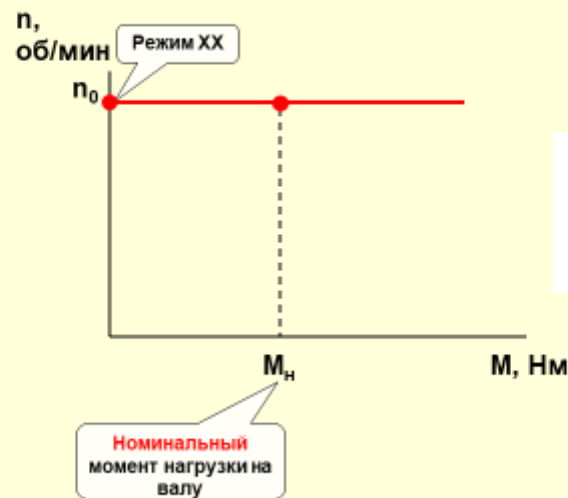
Пусть на валу двигателя имеется какая-то нагрузка, ротор вращается с постоянной частотой n и между осевыми линиями полюсов сохраняется постоянный угол θ . При увеличении нагрузки ротор двигателя начинает тормозиться и угол θ увеличивается.

Одновременно с этим увеличивается и электромагнитная мощность, которая поступает из сети.

При увеличении θ электромагнитная мощность уравнивает новую нагрузку на валу и ротор двигателя продолжает вращаться с той же частотой n , но при новом значении θ .

При уменьшении нагрузки все происходит в обратном порядке.

Механическая характеристика СД



Асинхронный пуск синхронного двигателя

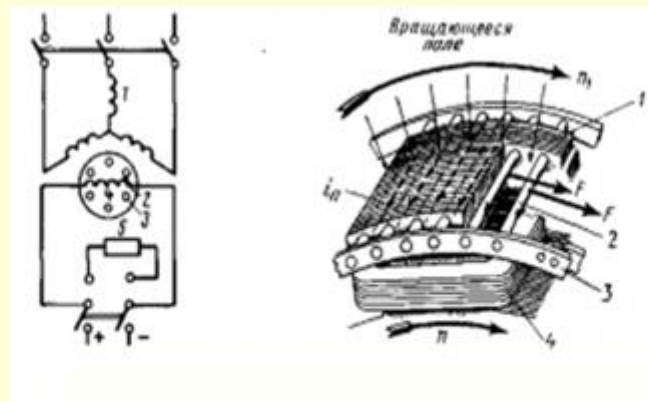
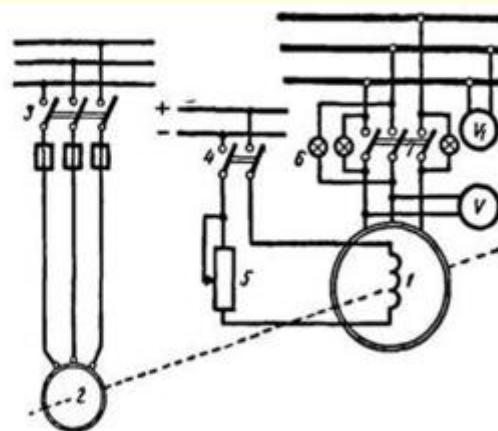


Схема пуска синхронного двигателя 1 с помощью вспомогательного асинхронного двигателя (2).



Фиг. 405. Схема пуска синхронного двигателя при помощи пускового двигателя

Регулирование коэффициента мощности СД

Рассмотрим работу СД при постоянном тормозном моменте на валу двигателя при неизменном токе возбуждения.

Т.к. $M_T = \text{const}$, то и мощность на валу $P_2 = \text{const}$. Следовательно, потребляемая из сети мощность P_1 и электромагнитная мощность тоже постоянны

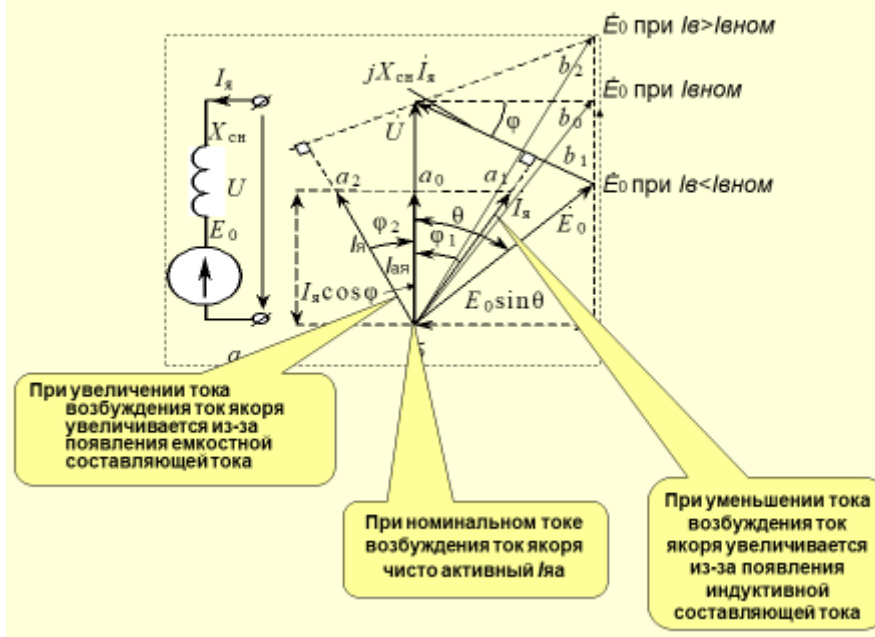
$$P_1 = 3UcI\cos\varphi = \text{const.}$$

$$P_{\text{эм}} = 3UcE_0\sin\theta/X_c = \text{const.}$$

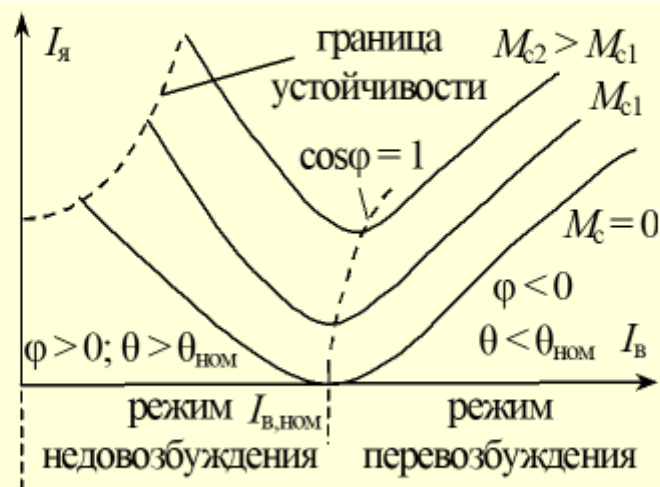
При $U = \text{const}$ следует, что

$$I\cos\varphi = I_a = \text{const};$$

$$E_0\sin\theta = \text{const}$$



U – образные характеристики СД



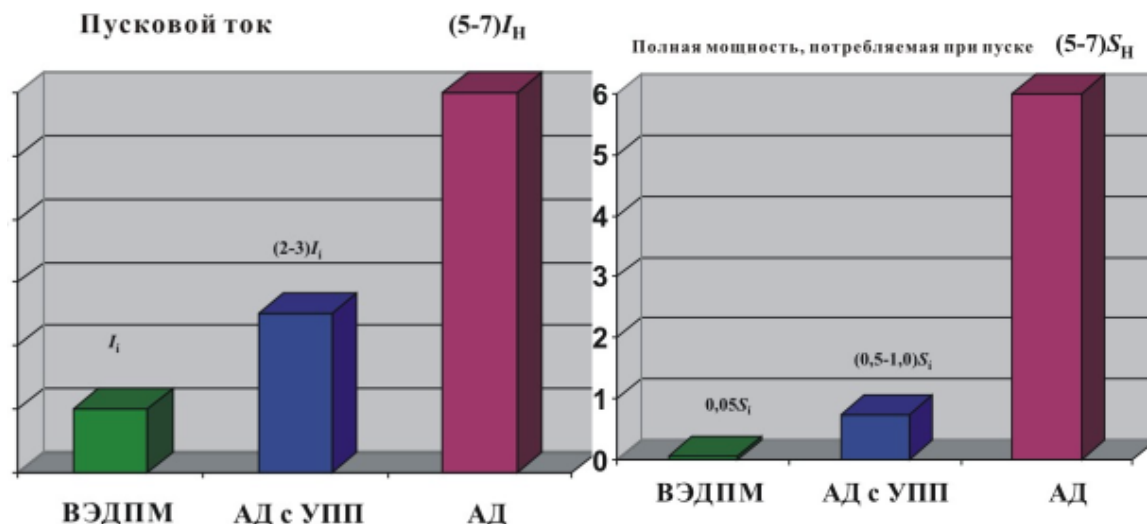
Достоинства и недостатки СД



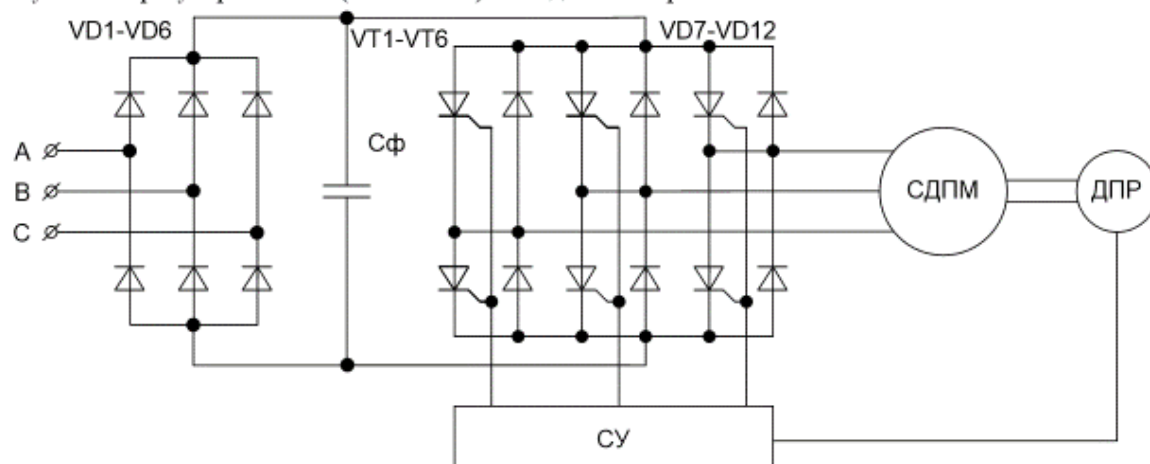
Достоинства	Недостатки
1. Постоянная частота вращения 2. Высокий КПД (90-95%) 3. Коэффициент мощности близок к 1 ($\cos\varphi=1$) 4. Возможность использования СД в качестве генератора 5. Возможность регулировки перегрузочной способности двигателя за счет изменения тока возбуждения I_f 6. Абсолютная жесткость механической характеристики 7. Меньшая зависимость вращающего момента от уровня напряжения сети по сравнению с АД 8. Работоспособность при большем износе подшипников и менее точном монтаже ротора благодаря большому воздушному зазору между ротором и статором. В промышленности синхронные двигатели обычно используют при $P > 100$ кВт. Широкое применение находят синхронные микродвигатели различной конструкции: гистерезисные, индукторные, шаговые.	1. Износ контактных колец и щеток 2. Сложность конструкции и, следовательно, большая стоимость 3. Необходимость наличия источника постоянного тока (возбудителя или выпрямителя) 4. Более сложный пуск и необходимость специальной аппаратуры синхронизации 5. Возможность только частотного регулирования частоты

Вентильные двигатели с постоянными магнитами (ВДПМ)

Сравнительные характеристики



Вентильный двигатель с постоянными магнитами представляет собой электромеханическую систему, которая состоит из синхронного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов и полупроводникового преобразователя частоты, управляемого датчиками углового положения ротора. В качестве преобразователя частоты используется инвертор напряжения с широтно-импульсным регулированием (ИН с ШИР) выходного напряжения.



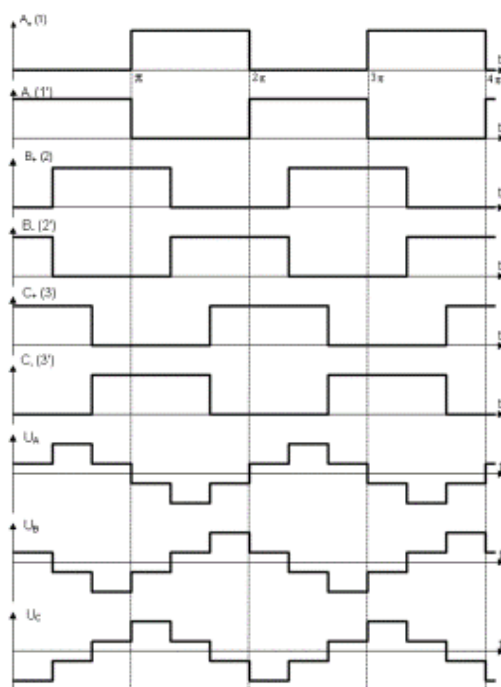
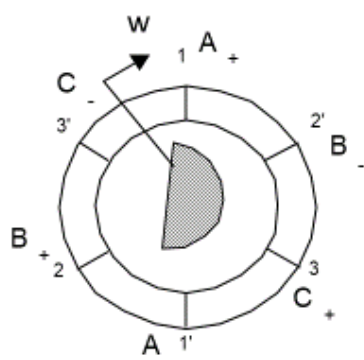
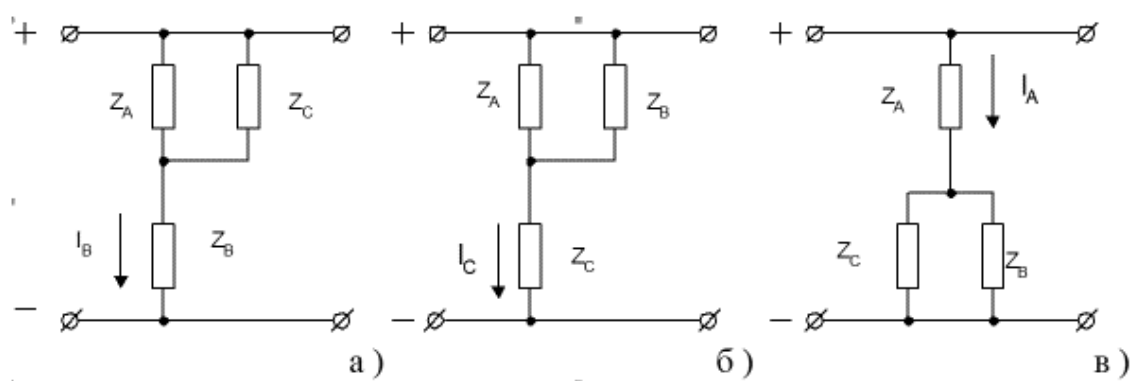


Схема подключения обмоток двигателя

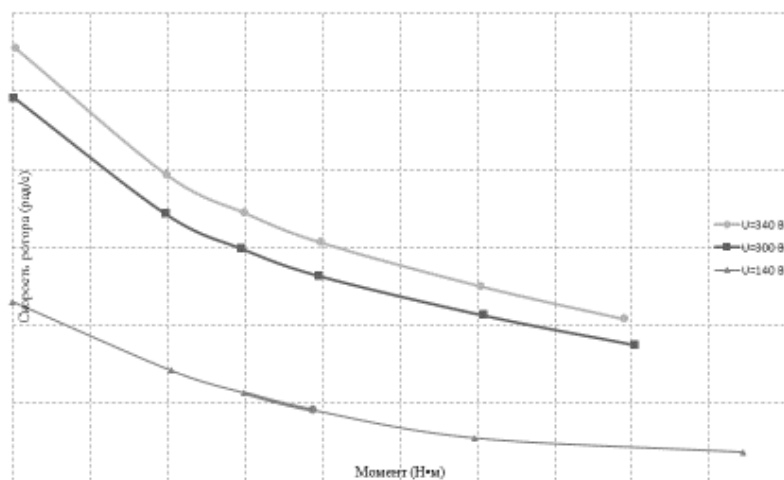
а) $0 \leq \omega t \leq 60^\circ$; б) $60^\circ \leq \omega t \leq 120^\circ$; в) $120^\circ \leq \omega t \leq 180^\circ$



Коммутатор в рассматриваемой схеме состоит из связки диодов и тиристоров, включенных последовательно с обмотками А, В и С двигателя. Управляющие сигналы на тиристоры поступают с соответствующих чувствительных элементов датчика положения ротора (ДПР). Тиристоры работают в режиме «открыт», «закрит». Первое имеет место при сигнале с ДПР, второе при отсутствии.

В положении изображенном на рисунке 1.1, что соответствует углу $0 \leq \omega t \leq 60$ (рисунке 1.3а) сигнальный элемент подключил обмотку фазы А и находится в зоне обмотки С, т.е. обмотки фаз А и С подключены (рисунке 1.2). Для угла $0 \leq \omega t \leq 60$ имеем следующие соотношения:

Механическая характеристика ВД $\omega = f(M)$ при $U = 140, 300, 340$ В



Учебное электронное издание

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАШИННЫХ УСТРОЙСТВ
СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ В СРЕДЕ MATLAB

Практикум

Автор-составитель
ЛИХОДЕЕВ Сергей Иванович

Издается в авторской редакции

Системные требования: Intel от 1,3 ГГц; Windows XP/7/8/10; Adobe Reader;
дисковод CD-ROM.

Тираж 10 экз.

Издательство Владимирского государственного университета
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых
600000, Владимир, ул. Горького, 87.