



**Электротехника**  
**(Лабораторные работы)**

Москва  
2017

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»

Кафедра электротехники, электроники и автоматики

## **Электротехника**

*Методические указания к выполнению  
лабораторных работ*

Москва  
2017

УДК 621.3

**Электротехника:** метод. указ. к выполнению лабораторных работ/ сост. В.И.Аверцев.  
– М.:ФГБОУ ВО "МГТУ "СТАНКИН", 2017. - с.42

Данные методические указания к выполнению лабораторных работ способствуют более глубокому усвоению изучаемой дисциплины, закреплению теоретических знаний и прививают студентам навыки самостоятельного научного исследования.

Предназначены для студентов 2 курса дневного отделения направления подготовки 15.03.06 «Мехатроника и робототехника».

УДК 621.3

© Аверцев В.И., составление, 2017  
© ФГБОУ ВО "МГТУ "СТАНКИН", 2017

Учебное издание

Составитель  
Аверцев Вадим Иванович

Электротехника

Методические указания к выполнению лабораторных работ

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Лабораторная работа 1.</b> Экспериментальное определение параметров однофазного двухобмоточного трансформатора .....	3
<b>Лабораторная работа 2.</b> Исследование эксплуатационных характеристик трансформатора моделированием в пакете <i>MULTISIM</i> .....	9
<b>Лабораторная работа 3.</b> Исследование статических характеристик двигателя постоянного тока .....	14
<b>Лабораторная работа 4.</b> Исследование динамических характеристик двигателя постоянного тока.....	27
Приложение.....	43
Список рекомендуемой литературы.....	45

## Лабораторная работа 1

### Экспериментальное определение параметров однофазного двухобмоточного трансформатора

**Цель работы:** приобретение навыков работы с реальными электрическими устройствами, выбора измерительных приборов, определения цены деления измерительных приборов; освоение правил техники безопасности при проведении экспериментов с электротехническими устройствами.

В работе проводится исследование промышленного однофазного трансформатора 220/140 В с полной мощностью  $S = 250 \text{ ВА}$ . Используются измерительные приборы высокого класса точности: амперметры, вольтметры и ваттметр. Регулирование входного напряжения от 0 до 250 В осуществляется с помощью лабораторного автотрансформатора (ЛАТР).

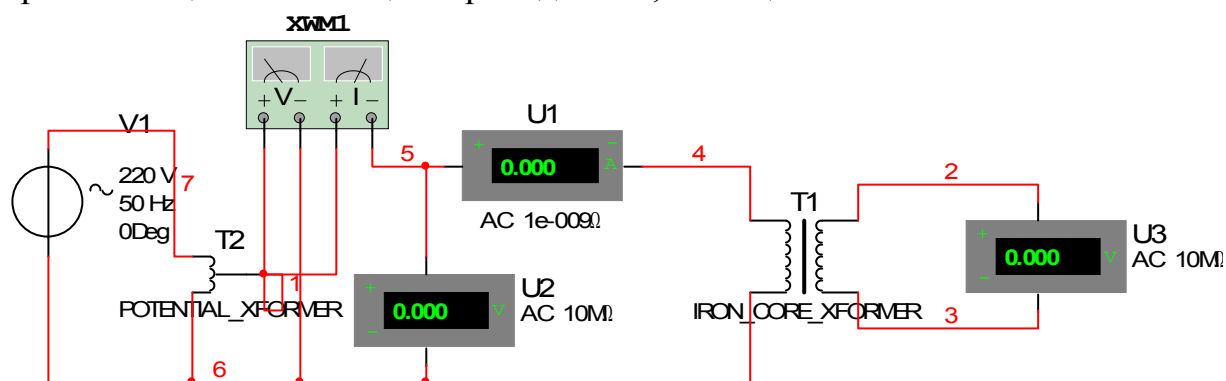
Исследование трансформатора состоит из 2-х опытов:

- опыта холостого хода;
- опыта короткого замыкания.

#### Опыт холостого хода

##### 1. Сборка электрической схемы для проведения опыта

При отключенном от сети ЛАТР, обозначенном на рис.1 как T2, собирается электрическая цепь с помощью проводников, оснащённых клеммами.



**Рис.1. Принципиальная схема опыта холостого хода**

На рис.1 показаны: испытуемый трансформатор T1, ЛАТР, два вольтметра переменного тока  $U2$  и  $U3$ , измеряющих напряжения соответственно на первичной и вторичной обмотках испытуемого трансформатора T1, и амперметр переменного тока  $U1$ . От электрической сети переменного тока с частотой 50 Гц и напряжением 220 В подаётся электроэнергия на входные клеммы ЛАТРа. С выхода ЛАТРа из узла 1 регулируемое напряжение подаётся на начала двух обмоток ваттметра – обмотку напряжения, обозначенную буквой  $V$ , и токовую обмотку, обозначенную буквой  $I$ . Начала обеих обмоток обозначены символом «+». Выход токовой обмотки подключён к амперметру  $U1$  и вольтметру  $U2$ , образуя узел 5. Выход амперметра подключается к началу первичной обмотки испытуемого трансформатора T1, образуя узел 4. К

вторичной обмотке трансформатора Т1 подключен вольтметр  $U3$  с внутренним сопротивлением 10 МегОм. Поэтому ток вторичной обмотки можно считать равным нулю по сравнению с номинальным значением, равным 1,792 А, и трансформатор Т1 - работающим в режиме холостого хода.

Выходные клеммы Т2 обозначены надписью «Нагрузка». На рис.1 на второй клемме Т2 образуется потенциальный узел, обозначенный цифрой 6. Цепь соединяется проводами с наконечниками под зажим. Не допускается подключать более двух проводов на одну клемму, чтобы не повредить резьбы клемм приборов. Поэтому с выходной клеммы 6 идут два провода: на второй вход обмотки напряжения ваттметра и на второй вход вольтметра  $U2$ . Оба этих входа обозначены символом «-». На второй вход вольтметра  $U2$  одновременно подключается второй провод, чтобы подключить второй вывод первичной обмотки трансформатора Т1. Таким образом, получаем соединение устройств в узле 6.

## 2. Организация проведения экспериментов:

**Работа выполняется бригадой из 3-х или 4-х студентов. Каждый контролирует один или два прибора и производит замер по команде ведущего, который регулирует напряжение и одновременно контролирует главный прибор конкретного опыта, чтобы не повредить оборудование. В опыте холостого хода - это вольтметр  $U2$ , показания которого не должны превышать 250 В! В следующем опыте - опыте короткого замыкания – это ток. В первичной обмотке он не должен превышать номинального значения 1.14 А, то есть контролируется показание прибора  $U1$ .**

**Одновременность снятия показаний необходима по двум причинам:**

- из-за возможных плавных колебаний напряжения в сети;
- из-за происходящего теплового переходного процесса в опыте короткого замыкания при номинальных токах непрерывно возрастают сопротивления обмоток трансформаторов и снижаются величины токов, что сказывается на показаниях амперметров и ваттметра.

Некорректно снятые показания приборов могут стать причиной нестыковки параметров при математической обработке полученных данных.

## 3. Проведение опыта холостого хода

При плавном регулировании напряжения на выходе ЛАТР снимаются показания приборов и заносятся в табл.1. Необходимо снять показания в 7-8-ми точках. Одно показание снимается при небольшом (допустимом при отсутствии тока нагрузки) превышении номинального напряжения устройства. Это точка предельная в опыте и составляет 230-250 В. Рекомендуется начинать снятие характеристик именно с этой точки, а затем переходить к более лёгкому режиму, то есть заполнять таблицу справа налево. Такое количество точек необходимо для построения нелинейной зависимости  $U_1(I_1)$ , отражающей свойства ферромагнитного материала сердечника. По существу в другом масштабе это зависимость  $B(H)$ .

Для построения модели нужна только одна точка с номинальным значением первичного напряжения 220 В. Результаты измерений в этой точке являются частью паспортных данных силовых трансформаторов и служат для расчёта параметров модели трансформатора.

Таблица 1

$U_1$ В	40	80	120	160	200	220	250
$U_2$ В							
$I_1$ А							
$P_1$ Вт							

### Опыт короткого замыкания

#### 1. Сборка схемы опыта короткого замыкания

Схема опыта короткого замыкания отличается от первой схемы заменой вольтметра  $U3$  в цепи вторичной обмотки трансформатора Т1 амперметром под тем же именем  $U3$ . Схема показана на рис. 2.

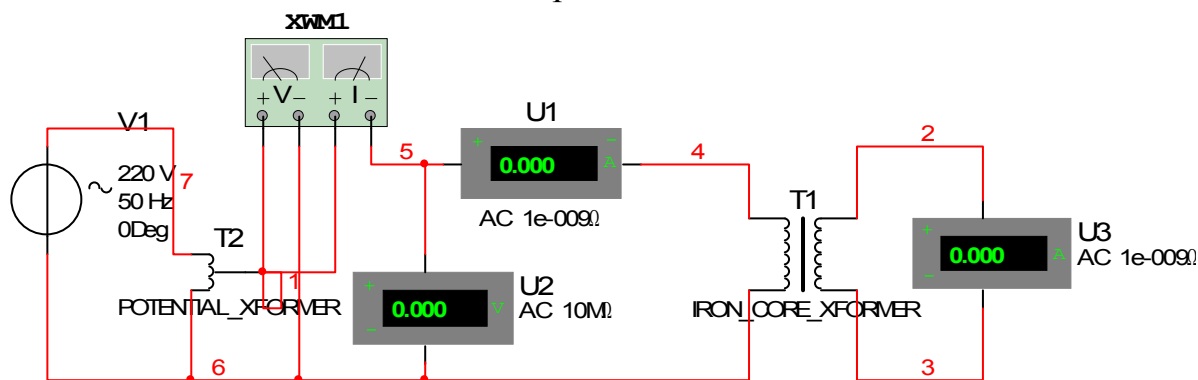


Рис.2. Принципиальная схема опыта короткого замыкания

Амперметр  $U3$  подключается на выход трансформатора Т1. Сопротивление амперметра очень мало и составляет  $1 \cdot 10^{-9}$  Ом, то есть амперметр практически замыкает накоротко вторичную обмотку своим шунтом.

**Отключение вольтметра и подключение амперметра производится при отключенной от сети схемы. ЛАТР выводится в нулевое положение – против часовой стрелки до упора.**

#### 2. Проведение опыта короткого замыкания

**После включения ЛАТР в сеть очень осторожно поднимается напряжение на первичной обмотке до достижения током обмотки номинального значения. Это напряжение очень мало и составляет несколько процентов от номинального значения. Снимаются показания приборов и заносятся в табл.2.**

Если позволяют приборы и характеристики трансформатора, можно снять ещё одну точку снижением напряжения. Для расчёта параметров модели нужна только одна точка при номинальном первичном токе.

Таблица 2

$U_{1кз}$ В	
$I_{1ном}$ А	1,14

$I_{2ном}$ А	
$P_{кз}$ Вт	



## Обработка результатов измерений

1. По результатам опыта холостого хода построить зависимость  $U_1(I_1)$ . Указать точку номинального режима работы и сделать вывод о выборе этой точки на кривой намагничивания.

2. По результатам измерений обоих опытов проводятся вычисления параметров Т-образной схемы замещения трансформатора:  $R_1$ ,  $R_2^*$ ,  $L_1$ ,  $L_2^*$ ,  $R_{12}$  и  $L_{12}$ , где:  $R_1$  и  $R_2^*$  соответственно сопротивление первичной и приведённое к первичной обмотке сопротивление вторичной обмотки;  $L_1$  и  $L_2^*$  - индуктивности, соответствующие потокам рассеяния этих обмоток;  $R_{12}$  - сопротивление, соответствующее потерям мощности в сердечнике от намагничивающего тока; и  $L_{12}$  - индуктивность, соответствующая потоку взаимной индукции, протекающему по сердечнику.

2.1. Анализ исходных данных для расчёта. Типовая полная мощность трансформатора  $S$  равна 250 ВА. Номинальное первичное напряжение  $U_{1н}$  равно 220В. Номинальное каталожное вторичное напряжение  $U_{2кат}$  равно 140 В, но в опыте холостого хода оно было уточнено и в расчётах следует брать действительное значение  $U_{2н}$ , снятое при первичном номинальном напряжении. Номинальные токи первичной и вторичной обмоток вычисляются по формулам:  $I_{1н} = \frac{S}{U_{1н}} = \frac{250}{220} = 1,136 \text{ А}$ ;  $I_{2н} = \frac{S}{U_{2н}} = \frac{250}{U_{2н}} \text{ А}$ .

2.2. В экспериментах получены следующие данные, необходимые для расчёта:

- ток холостого хода, то есть ток, необходимый для намагничивания сердечника трансформатора при номинальном напряжении на первичной обмотке  $I_{лхх}$  А;

- мощность холостого хода, то есть активная мощность, потребляемая трансформатором на компенсацию потерь в сердечнике,  $P_{хх}$  Вт;

- напряжение короткого замыкания  $U_{1кз}$ , то есть напряжение, которое необходимо приложить к первичной обмотке для создания в обеих обмотках номинальных токов при отсутствии отдачи энергии в нагрузку;

- мощность короткого замыкания, то есть активная мощность, потребляемая трансформатором на компенсацию потерь в обмотках трансформатора,  $P_{кз}$  Вт;

- коэффициент трансформации  $k_{тр} = \frac{U_{1н}}{U_{2н}}$ .

2.3. Вычисления параметров проводятся в такой последовательности:

- определяется активное сопротивление  $R_{кз}$  цепи, по которой протекает ток короткого замыкания в Т-образной модели трансформатора  $R_{кз} = \frac{P_{кз}}{I_{1н}^2}$ ;

- сопротивление  $R_{кз}$  равно сумме сопротивления первичной обмотки и приведённого сопротивления вторичной обмотки. Так как они практически равны между собой, то каждое из них равно  $R_1 = R_2^* = 0,5R_{кз}$  Ом;

- модуль комплексного сопротивления  $Z_{кз}$  цепи, по которой протекает ток короткого замыкания в Т-образной модели трансформатора, равен

$$Z_{кз} = \frac{U_{кз}}{I_{1н}} \text{ Ом};$$

- модуль реактивного индуктивного сопротивления цепи (обеих обмоток трансформатора) равен  $X_{кз} = \sqrt{(Z_{кз}^2 - R_{кз}^2)} \text{ Ом};$

- суммарный коэффициент индуктивности рассеяния цепи равен  $L_{кз} = \frac{X_{кз}}{2\pi f} \text{ Гн};$

- индуктивность рассеяния первичной обмотки и приведённое к первичной обмотке значение индуктивности рассеяния вторичной обмотки равны между собой и составляют половину суммарной индуктивности рассеяния:

$$L_1 = L_2^* = 0,5L_{кз} \text{ Гн};$$

- при холостом ходе потери возникают в первичной обмотке и сердечнике и суммарное сопротивление контура протекания тока намагничивания равно

$$R_{xx} = R_1 + R_{12} = \frac{P_{xx}}{I_{xx}^2} \text{ Ом};$$

- сопротивление резистивного элемента, отражающего потери в сердечнике, равно  $R_{12} = R_{xx} - R_1 \text{ Ом};$

- модуль полного сопротивления контура холостого хода равен  $Z_{xx} = \frac{U_{1н}}{I_{1xx}} \text{ Ом};$

- модуль реактивного индуктивного сопротивления контура холостого хода равен  $X_{xx} = \sqrt{Z_{xx}^2 - R_{xx}^2} \text{ Ом};$

- суммарная индуктивность цепи холостого хода:  $L_{xx} = \frac{X_{xx}}{2\pi f} = \frac{X_{xx}}{314} \text{ Гн};$

- индуктивность, соответствующая основному магнитному потоку, равна  $L_{12} = L_{xx} - L_1 \text{ Гн}.$

Для одного из трансформаторов исследуемой серии приведён результат испытаний и расчётов. Трансформатор изображён в режиме холостого хода с номинальным напряжением на первичной обмотке. Ток холостого хода, измеряемый амперметром  $U1$  в модели, с высокой точностью равен току, измеренному в реальном эксперименте  $I_{1xx} = 0,3 \text{ А}.$  Элементы  $R2^*$  и  $L2^*$  являются приведёнными к первичной обмотке. Таким образом, подтверждается качество проведённых опытов и обработки результатов.

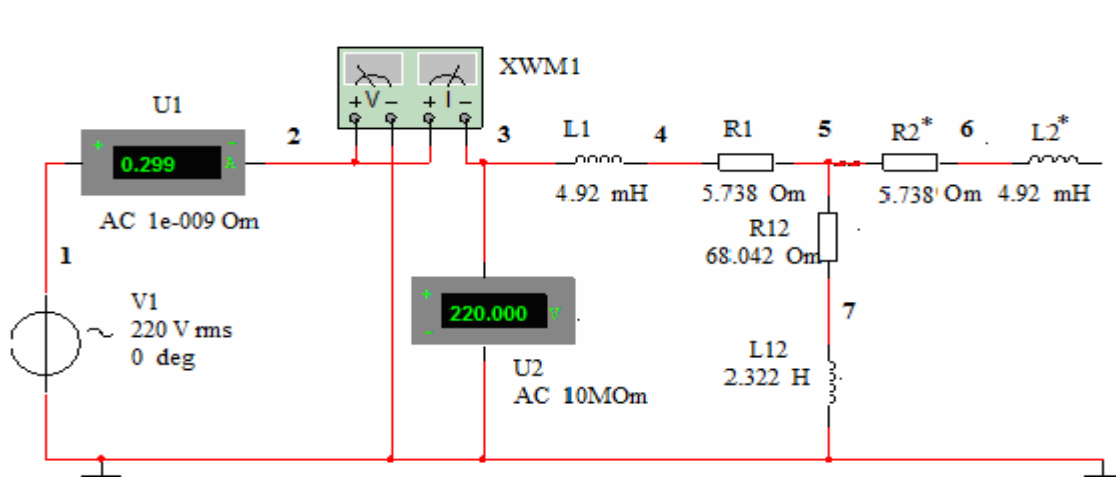


Рис.3. Т-образная схема замещения двухобмоточного однофазного трансформатора

### Содержание отчёта о работе:

- рисунки двух схем экспериментов;
- две таблицы результатов исследования;
- график зависимости  $U_1(I_1)$ ;
- расчёты параметров линейной модели трансформатора п.5.2.1- 5.2.3;
- рисунок 3 с рассчитанными параметрами для своего варианта.

## Лабораторная работа 2

### Исследование эксплуатационных характеристик трансформатора моделированием в пакете *MULTISIM*

При построении компьютерной модели исследуемого устройства используются числовые параметры, полученные в предшествующей лабораторной работе с применением измерительных приборов и регулированием величин напряжений и токов. После сборки схемы и редактирования параметров её элементов прежде всего необходимо убедиться в достоверности исходных параметров. Для этого в компьютерной модели проводятся те же два эксперимента - опыт холостого хода и контролируемого короткого замыкания. Величины токов, напряжений и мощностей, полученные в модели, не должны отличаться от величин, полученных в физическом эксперименте с помощью измерительных приборов, до третьего - четвёртого знака. В противном случае модель устройства не может быть использована для моделирования, как не соответствующая исследуемому объекту.

Источниками возникновения различия величин в модели и в реальном объекте могут быть:

- ошибки при измерениях величин приборами (снятие показаний приборов в разные моменты времени, неверные значения цены деления приборов с несколькими шкалами);
- ошибки при обработке результатов измерений;
- ошибки при сборке компьютерной модели и редактировании параметров элементов модели.

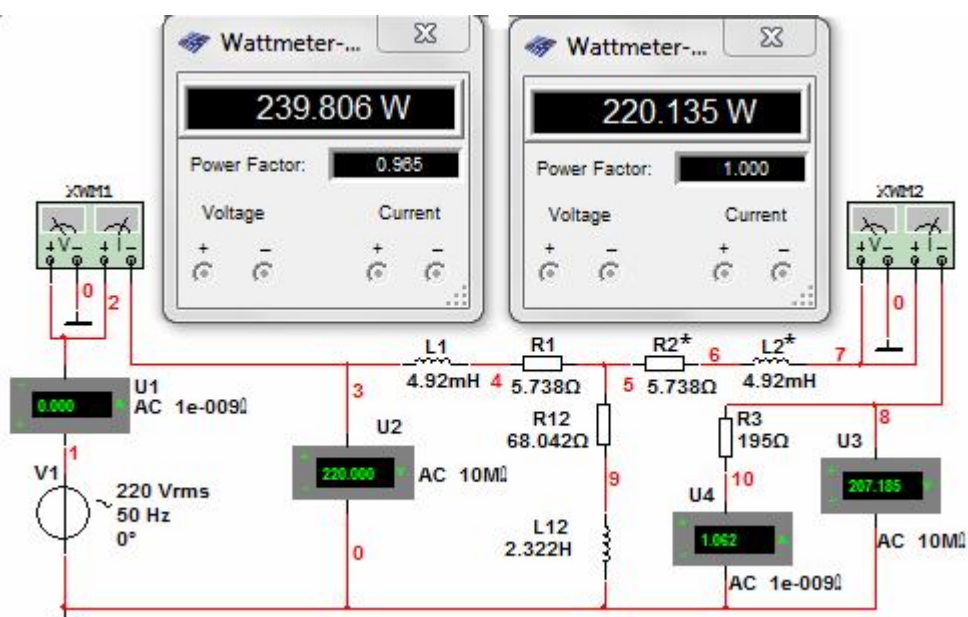
После отладки модели можно исследовать большое количество различных режимов работы устройства и его эксплуатационных характеристик.

1. Рассчитать и построить внешнюю характеристику и КПД трансформатора

Главными характеристиками трансформатора, как источника энергии, являются внешняя характеристика и коэффициент полезного действия (КПД).

Внешней характеристикой называется зависимость вторичного напряжения от тока нагрузки  $U_2(I_2)$ . Величина КПД зависит только от активной мощности, потребляемой во вторичной цепи  $\eta = \frac{P_2}{P_1}$ . КПД представляется или в долях единицы или в процентах. График  $\eta(I_2)$  удобнее строить в долях единицы.

1.1. Собрать схему модели первого опыта, приведённую на рис. 1.



**Рис.1. Исследование Т-образной модели трансформатора, параметры которого были получены из опытов холостого хода и короткого замыкания**

## 1.2. Снять показания приборов для построения характеристик.

Обе характеристики снимаются путём изменения сопротивления резистора  $R_3$ , чтобы первичный ток изменялся от холостого хода до номинального. Первичный ток измеряется амперметром  $U1$ . Первичное напряжение, измеряемое вольтметром  $U2$ , остаётся неизменным в течение всего эксперимента. Ток в нагрузке измеряется амперметром  $U4$ , а напряжение на нём - вольтметром  $U3$ .

Ваттметр  $XWM1$  измеряет активную мощность, потребляемую трансформатором от сети (источник переменного напряжения 220 В, 50 Гц). Ваттметр  $XWM2$  измеряет активную мощность, потребляемую нагрузкой от вторичной обмотки трансформатора. Результаты расчёта сводятся в таблицу 1.

Таблица 1

$R_{\text{нагр}}$ Ом	180	500	1000	2000	3000	4000	5000
$I_2$ А							
$U_2^*$ В							
$P_1$ Вт							
$P_2$ Вт							
КПД							

В табл.1 приведён рекомендуемый диапазон изменения сопротивления нагрузки  $R_3$ . Поскольку параметры трансформаторов незначительно различаются в технологически допустимых пределах, величину сопротивления первого столбца необходимо подобрать так, чтобы ток первичной обмотки не превышал номинального значения. В последнем столбце вместо 5 кОм можно просто разомкнуть цепь нагрузки и снять режим реального холостого хода, то есть при  $I_2^*$ , равном нулю.

Величина КПД вычисляется как отношение  $P_2$  к  $P_1$ .

Снимать показания приборов и делать расчёты необходимо с количеством значащих цифр не менее 4-х. Так как в табл.1 приводятся значения  $I_2^*$  и  $U_2^*$ , полученные в результате моделирования, то для построения графиков  $U_2 = f_1(I_2)$  и  $\eta = f_2(I_2)$  необходимо пересчитать приведённые значения к действительным значениям по формулам:  $U_2 = U_2^* / k_{тр}$  и  $I_2 = I_2^* \cdot k_{тр}$ .

1.3. По результатам расчётов построить графики  $U_2 = f_1(I_2)$  и  $\eta = f_2(I_2)$ .

При использовании трансформатора как одного из элементов сложного устройства, например блока питания, целесообразно дополнить линейную Т-образную модель трансформатора идеальным трансформатором и на выходе получать не приведённые параметры и величины, а действительные.

## 2. Исследовать работу трансформатора с разными нагрузками

2.1. Собрать схему модели трансформатора, на выходе которой будут не приведённые параметры и величины, а действительные. Т-образная модель трансформатора дополняется идеальным трансформатором Т1, имеющим только один параметр - коэффициент трансформации. В MultiSim 10 это отношение выходного напряжения к входному, то есть  $K_{Т1} = \frac{1}{k_{тр}}$ . Заменяя R3

на R-L или R-C цепи, можно определить влияние L и C элементов на вид характеристик исследуемого трансформатора. Модуль сопротивления нагрузки должен обеспечивать ток нагрузки не более номинального  $I_{1ном} = S_{ном} / U_{1ном} = 250 / 220 = 1,14 = I_{2ном}^*$ . Схема модели показана на рис.2.

Кроме описанных ранее элементов схемы на рис. 2 показаны:

- идеальный трансформатор Т1; вольтметр U3, измеряющий напряжение на вторичной обмотке идеального трансформатора; амперметр U4, измеряющий общий ток цепи вторичной обмотки трансформатора; нагрузка трансформатора, представляющая собой параллельно соединённые резистор RN и конденсатор CN.

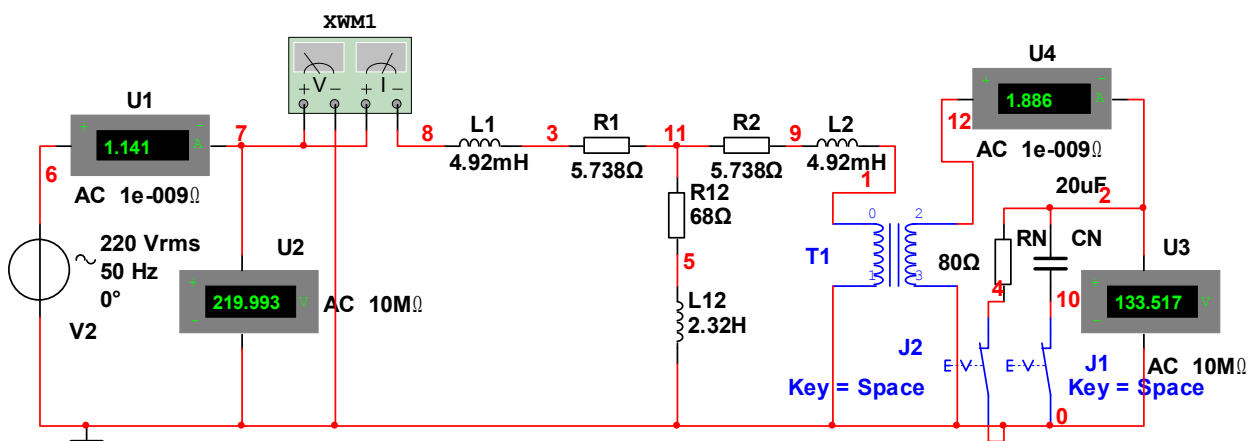


Рис.2. Исследование Т-образной модели трансформатора, дополненной идеальным трансформатором, для снятия нагрузочных характеристик при смешанной нагрузке (R-C)

2.2. Снять две внешние характеристики  $\frac{U_2}{U_{20}} = f(I_2)$ , то есть долевое

изменение напряжения на выходе в функции тока нагрузки.

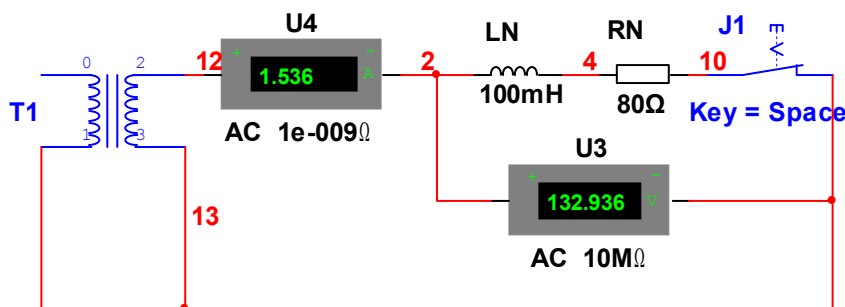
2.2.1. При отключенных ключах  $J1$  и  $J2$  при холостом ходе измерить напряжение  $U_{20}$ .

2.2.2. Величина ёмкости конденсатора  $CN$  выбирается в диапазоне 10, 20,...50 мкФ. Включаются оба ключа. Изменяя величину сопротивления резистора  $RN$  в диапазоне 100, 500, 1000....5000 Ом, как в п.1.2, снимаем в 5-ти-6-ти точках характеристики значения  $U_2$  и  $I_2$ . Результаты заносятся в таблицу 2.  $CN$  = (указывается выбранная величина).

Таблица 2

$RN$ Ом	$\infty$	5000	2000	1000	500	100
$U_2$ В	$U_{20}$					
$I_2$ А	0					
$U_2 / U_{20}$	1					

2.2.3. Ёмкостный элемент заменяется индуктивным с величиной индуктивности  $LN$ , выбранной в диапазоне 0,1....0,2 Гн. Индуктивный элемент включается последовательно с резистивным, как показано на рис.3.



**Рис.3. Исследование Т-образной модели трансформатора, дополненной идеальным трансформатором, для снятия нагрузочных характеристик при смешанной нагрузке (R-L). (Показана только изменяемая часть схемы)**

Ток во вторичной цепи на 15 % меньше номинального, но повышать его нельзя, так как в первичной цепи действующее значение тока равно номинальному 1.14 А. Величина индуктивности остаётся неизменной, а величина тока понижается до нуля изменением величины сопротивления резистивного элемента  $RN$ , аналогично п.2.1.2. Холостой ход получается отключением ключа  $J1$ . Результаты измерений заносятся в табл.3.

$LN$  = (указывается выбранная величина).

Таблица 3

$RN$ Ом	$\infty$	5000	2000	1000	500	100
$U_2$ В	$U_{20}$					
$I_2$ А	0					
$U_2 / U_{20}$	1					

2.2.4. По результатам измерений в п.п.2.2.2 и 2.2.3 в одной системе координат строятся две внешние характеристики.

3. Содержание отчёта о работе:

Отчёт о работе включает 3 схемы моделей, 3 таблицы измерений и графики характеристик, построенные в одной системе координат.

### **Контрольные вопросы**

1. Определение трансформатора как электромагнитного устройства.
2. Понятие обратимости трансформатора.
3. Назначение сердечника и его устройство.
4. Как преобразуются напряжения и токи в трансформаторе?
5. Понятие идеального трансформатора.
6. Какие свойства и параметры учитываются в реальном трансформаторе?
7. Условия проведения опыта холостого хода.
8. Условия проведения опыта короткого замыкания.
9. В чём нарушен принцип работы трансформатора в Т-образной схеме замещения?
10. Как достигается соответствие процессов в Т-образной модели и в реальном трансформаторе?
11. Понятие намагничивающего тока.
12. Строгое определение коэффициента трансформации трансформатора.
13. Приближённое определение коэффициента трансформации трансформатора.
14. Почему отношение токов первичной и вторичной обмоток не соответствует коэффициенту трансформации трансформатора?
15. Как снизить потери в трансформаторе?
16. Объяснить физические причины низкого КПД маломощных трансформаторов.
17. Почему при одинаковом условном направлении напряжений на обмотках трансформатора токи в обмотках текут в разных направлениях?
18. Определение внешней характеристики.
19. Влияние типа нагрузки (резистивной, резистивно-индуктивной, резистивно-ёмкостной) на вид внешней характеристики.



## Исследование статических характеристик двигателя постоянного тока

**Цель работы:** исследование статических режимов в двигателе постоянного тока с электромагнитным возбуждением.

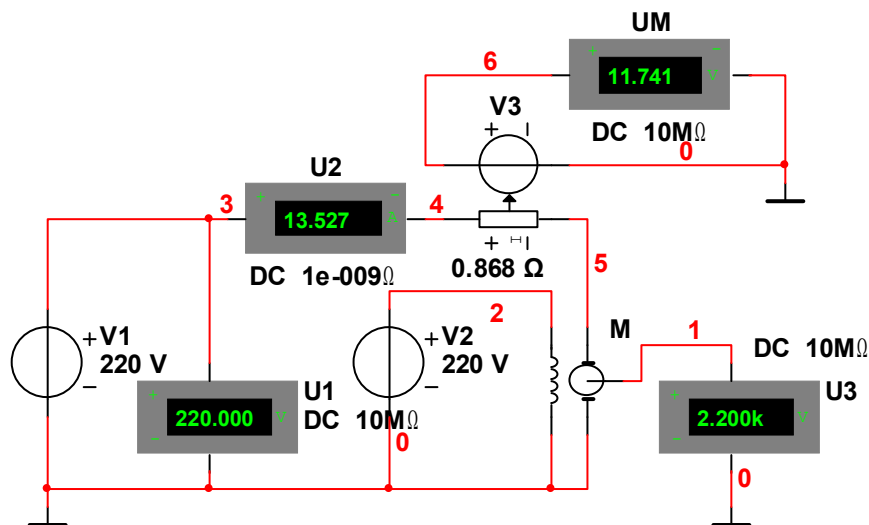
В работе студенты создают схемы для проведения виртуальных экспериментов, с помощью которых получают механические и передаточные характеристики двигателя постоянного тока (ДПТ) при различных способах управления.

Анализируют результаты моделирования. Исследуют ограничения мощности на валу двигателя в первой зоне регулирования и момента на валу двигателя во второй зоне регулирования.


Виртуальные эксперименты проводятся на базе пакета *MultiSim 10*. Используются библиотечные модели контрольно-измерительных приборов и компонент.


## 1. Построение механических характеристик двигателя постоянного тока с независимым возбуждением

1.1.Сформировать схему для проведения виртуальных экспериментов согласно рис.1.



**Рис.1. Схема виртуального эксперимента для построения идеальных механических характеристик ДПТ с независимым возбуждением**

1.2. Нажатием кнопки  в виртуальной библиотеке вызвать меню раздела компонентов смешанного типа *Miscellaneous Components*.

В этом меню выбрать библиотечную модель двигателя постоянного тока (Virtual Motor). Нажатием левой кнопки мыши активировать модель двигателя , перевести ее на поле и зафиксировать положение модели.

Закр<sup>1</sup>ыть ок<sup>1</sup>но *Miscellaneous...*

Модели заземлений, идеальных источников постоянного напряжения  $I1$ , питающего цепь якоря;  $I2$ , питающего обмотку возбуждения; амперметра  $U2$

и вольтметров  $U1$ ,  $U3$  и  $UM$  вызываются из виртуальной библиотеки. Источник напряжения  $V3$  (источник напряжения, управляемый током) вызывается из промышленной библиотеки из семейства источников ( $CONTROLLED\_VOLTAGE\_SOURCES$ ) в группе управляемых источников напряжения ( $CURRENT\_CONTROLLED\_VOLTAGE\_SOURCES$ ). Модели источников выводятся на поле с очередным номером  $IN\#$ . Рекомендуется переименовать их для цепи якоря двигателя и для цепи обмотки возбуждения, как указано выше. Измерительные приборы выводятся с одинаковым именем  $U1, U2...UK$ . Некоторые из них для удобства по желанию исполнителя можно переименовать. Например, вольтметр, измеряющий напряжение управляемого источника  $V3$ , назвать  $UM$ , так как он показывает величину электромагнитного момента и аналогично изменить другие имена.

1.3. Входной резистор управляемого источника  $V3$  включается в цепь обмотки якоря ДПТ. Выходное напряжение источника  $V3$  будет пропорционально току якоря  $I_a$ . При задании значения коэффициента передачи источника учитывается константа двигателя  $K_M$ , где  $K_M = C_M \Phi = const$ . Выходное напряжение источника будет равно значению электромагнитного момента  $M$ , или пропорциональной ему величине. Входной резистор является только коэффициентом преобразования тока якоря в напряжение, пропорциональное электромагнитному моменту и его сопротивление не влияет на общее сопротивление якорной цепи.

1.4. Разместить все элементы и соединить их между собой согласно схеме рис. 1.

По заданию преподавателя выбрать для исследования из табл. П.2 приложения вариант ДПТ с электромагнитным возбуждением. Паспортные данные двигателя занести в табл. 1.

**Таблица 1**

**Технические данные исследуемого двигателя**

Тип двигателя	Мощность	Напряжение питания на обм. якоря	Частота вращения		КПД	Сопротивление обмотки при 15 °С			Индуктивность цепи якоря	Момент инерции
			но-ми н.	максим.		якоря	добав. полюсов	Возбуждения		
	кВт	В	об/мин.		%	Ом			мГн	кг·м <sup>2</sup> (Н·м·с <sup>2</sup> /рад)
	$P_{ном.}$	$U_{аном.}$	$n_{но м.}$	$n_{max}$	$\eta_{ном}$	$R_a$	$R_{доб.}$	$R_f$	$L_a$	$J$

Можно выписать данные не изображая таблицу, но в табличной форме:

Тип двигателя....

2ПН112Мухл4

Мощность

кВт  $P_{ном.} = 5, 0$

Напряжение питания на обмотке якоря

В  $U_{аном} = 220$

и так далее в соответствии со столбцами табл. 1.

Примечание.

Так как в пакете программ *MultiSim 10* в окнах задания параметров все величины и индексы обозначаются на английском языке по другим стандартам, то в табл.1 и последующих расчётах заменяем индексы "я" (якорь) параметров цепи якоря на английскую букву "a" (*armature*), а индексы "в" параметров цепи возбуждения на английскую букву "f"- начальную букву слова *field* (поле).

1.5. Рассчитать значения параметров модели ДПТ на основе данных табл.1. При расчётах необходимо приводить все величины к единой системе, учитывая коэффициенты порядка величин. Мощность должна быть выраженной в Вт, то есть  $5 \text{ кВт} = 5000 \text{ Вт} = 5 \cdot 10^3 \text{ Вт}$ , КПД  $70 \% = 0,70$  единиц.

- Полное активное сопротивление цепи якоря при наличии добавочных полюсов:

$$R_{a\Sigma} = R_a + R_{\text{доб.}} \text{ Ом.}$$

Если машина выполнена без добавочных полюсов, то  $R_{a\Sigma} = R_a$ .

- Угловая скорость в номинальном режиме:

$$\Omega_{\text{ном.}} = \pi \cdot n_{\text{ном.}} / 30 \text{ рад/с.}$$

- Номинальный момент на валу двигателя при мощности, заданной в "Вт":

$$M_{2 \text{ ном.}} = P_{\text{ном.}} / \Omega_{\text{ном.}} \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

- Мощность, потребляемая двигателем из сети в номинальном режиме

$$P_{1 \text{ ном.}} = \frac{P_{\text{ном.}}}{\eta_{\text{ном.}}} \text{ Вт.}$$

Значение  $\eta_{\text{ном.}}$  берётся в долевых единицах.

- Мощность, потребляемая обмоткой возбуждения в номинальном режиме

$$P_{f \text{ ном.}} = U_{f \text{ ном.}}^2 / R_f \text{ Вт.}$$

Значение напряжения на обмотке возбуждения  $U_{f \text{ ном.}}$  в номинальном режиме задается преподавателем. Двигатели серии 2П изготавливаются с независимым возбуждением. Напряжение возбуждения может быть выбрано равным 110 В или 220 В независимо от номинального напряжения на обмотке якоря. В зависимости от величины выбранного напряжения источника питания для обмотки возбуждения изменяются параметры самой обмотки возбуждения. При напряжении 220 В величина сопротивления обмотки равна верхнему значению в ячейке столбца  $R_f$  каталога, а при напряжении 110 В - нижнему значению.

Мощность, потребляемая обмоткой якоря в номинальном режиме:

$$P_{a \text{ ном.}} = P_{1 \text{ ном.}} - P_{f \text{ ном.}} \text{ Вт.}$$

- Статическое значение тока якоря в номинальном режиме (напряжения источников номинальные, параметры номинальные и нагрузка на валу номинальная)

$$I_{a \text{ ном.}} = P_{a \text{ ном.}} / U_{a \text{ ном.}} \text{ А.}$$

- Статическое значение ЭДС обмотки якоря в номинальном режиме:

$$E_{\text{ном.}} = U_{a \text{ ном.}} - R_{a\Sigma} \cdot I_{a \text{ ном.}} \text{ В.}$$

- Постоянный коэффициент ЭДС двигателя при неизменном потоке полюса:

$$K_E = E_{\text{ном.}} / \Omega_{\text{ном.}} \text{ В·с/рад.}$$

- Постоянный коэффициент электромагнитного момента двигателя при неизменном потоке полюса:

$$K_M = K_E \text{ Н·м/А.}$$

- Электромагнитный момент двигателя в номинальном режиме:

$$M_{\text{э ном.}} = K_M \cdot I_{a \text{ ном.}} \text{ Н·м.}$$

- Собственный статический момент сопротивления (момент трения двигателя) в номинальном режиме:

$$M_{\text{т ном.}} = M_{\text{э ном.}} - M_{2 \text{ ном.}} \text{ Н·м.}$$

- Коэффициент вязкого скоростного трения двигателя при допущении линейности момента трения во всем скоростном диапазоне работы ДПТ:

$$\beta_f = M_{\text{т ном.}} / \Omega_{\text{ном.}} \text{ Н·м·с/рад.}$$

- Значение пускового тока якоря при прямом пуске двигателя:

$$I_{a \text{ п}} = U_{a \text{ ном.}} / R_{a\Sigma} \text{ А.}$$

- Пусковой электромагнитный момент двигателя при прямом пуске:

$$M_{\text{п}} = K_M \cdot I_{a \text{ п}} \text{ Н·м}$$

- Индуктивность обмотки возбуждения можно принять приближенно равной индуктивности обмотки якоря:

$$L_f \approx L_a \text{ Гн.}$$

- Электромагнитная постоянная времени двигателя:

$$T_{\text{э}} = L_a / R_{a\Sigma} \text{ с.}$$

- Электромеханическая постоянная времени двигателя:

$$T_{\text{м}} = J \cdot R_{a\Sigma} / (K_E K_M) \text{ с.}$$

1.6. Полученные в п. 1.5 значения параметров модели и паспортные данные табл.1, необходимые при работе со схемами виртуальных экспериментов, внести в соответствующие графы табл. 2.

Таблица 2

**Параметры модели исследуемого двигателя**

№ п/п	Параметры	Обозначение параметра		Значение	Размерность
		стандарт	MultiSim		
1	2	3	4	5	6
1.	Сопротивление обмотки якоря (цепи якоря)	$R_a$ ( $R_{a\Sigma}$ )	$Ra$		Ом
2.	Индуктивность обмотки якоря	$L_a$	$La$		мГн
3.	Сопротивление обмотки возбуждения	$R_f$	$Rf$		Ом

Окончание таблицы 2					
4.	Индуктивность обмотки возбуждения	$L_f$	$Lf$		мГн
5.	Коэффициент вязкого скоростного трения	$\beta_f$	$Bf$		Н·м·с/рад
6.	Момент инерции ротора двигателя	$J$	$J$		Н·м·с <sup>2</sup> /рад=кг·м <sup>2</sup>
7.	Частота вращения ротора в номинальном режиме	$n_{ном.}$	$NN$		об/мин
8.	Ном. напряжение питания обмотки якоря	$U_{аном.}$	$Van$		В
9.	Ток в обмотке якоря в номинальном режиме	$I_{аном.}$	$Ian$		А
10.	Ном. напряжение питания обмотки возбуждения	$U_{fном.}$	$Vfn$		В
11.	Момент статической нагрузки на валу двигателя	$M_{сн}$	$Tl$		Н·м
12.	Угловая скорость в номинальном режиме	$\Omega_{ном.}$			рад/с
13.	Коэффициент ЭДС двигателя при неизменном потоке полюса	$K_E$			В·с/рад
14.	Коэффициент электромагнитного момента при неизменном потоке полюса	$K_M$			Н·м/А
15.	Электромагнитный момент двигателя в номинальном режиме.	$M_{эном.}$			Н·м
16.	Пусковой электромагнитный момент двигателя при прямом пуске с номинальным напряжением на обмотке якоря	$M_п$			Н·м
17.	Электромагнитная постоянная времени двигателя	$T_\tau$			с
18.	Электромеханическая постоянная времени двигателя	$T_M$			с

1.7. Двойным щелчком мыши на пиктограмме двигателя открыть окно редактирования параметров двигателя *MOTOR VIRTUAL*. Задать параметры библиотечной модели двигателя на закладке *Value*, используя паспортные данные и необходимые расчётные данные из табл. 2. Привести в соответствие размерности вводимых величин с размерностями этих величин по умолчанию в окне. Закрыть окно параметров двигателя.

1.8. Амперметр  $U2$ , вольтметры  $U1$ ,  $U3$  и  $UM$  должны быть установленными в режим работы по постоянному току *DC* (по умолчанию *DC*).

1.9. Отладка модели и проверка расчётов.

При моделировании любого объекта, даже относительно простого, необходимо убедиться в соответствии модели и исследуемого устройства. Для


этого используется контрольная задача, для которой легко вычислить или экспериментально определить результаты. В данной работе такой задачей является исследование номинального режима работы двигателя. Поэтому задаётся в первом расчёте номинальный режим работы с номинальной нагрузкой на валу:  $M_{\text{сн}}(Tl) = M_{2\text{ном}}$ . Модель кнопкой запускается на расчёт и в результате должны получить номинальное значение тока якоря  $I_{\text{аном}}$ , номинальное значение электромагнитного момента  $M_{\text{эном}}$ , номинальную частоту вращения вала двигателя  $n_{\text{ном}}$ . При несоответствии результатов проверки с паспортными и расчётными данными необходимо найти ошибку.

1.10. Снять статическую характеристику при номинальных значениях напряжений на якоре и обмотке возбуждения.


1.10.1. В окне настройки параметров двигателя в строке *Load Torque (Tl)* задать момент нагрузки равным нулю:  $M_{\text{сн}}(Tl)=0$ . Режим будет соответствовать режиму реального холостого хода двигателя, при котором моментом сопротивления будет только собственный статический момент трения  $M_{\text{т}}$ . Установить номинальные значения напряжений на идеальных источниках постоянного напряжения  $V1$ , питающего цепь якоря, и  $V2$ , питающего обмотку возбуждения. Задать параметр датчика момента (источника напряжения, управляемого током)  $V3$ , равный константе  $K_{\text{м}}$ .

При таком значении коэффициента передачи напряжение на выходе источника  $V3$  в вольтах будет соответствовать значению электромагнитного момента  $M_{\text{э}}$  в Н·м.

1.10.2. Провести виртуальный эксперимент снятия одной точки естественной механической характеристики ДПТ с независимым возбуждением. Для этого необходимо:

- Запустить модель переключателем .
- Зафиксировать показания вольтметров и амперметра.
- Показание вольтметра  $U3$  в вольтах будет соответствовать значению частоты вращения  $n$  в об/мин.

**Замечание.** Показания всех приборов следует фиксировать по завершении переходных процессов измерения в вычислительном эксперименте.

- Отключить модель переключателем .
- Данные занести в табл. 3.

-Вычислить значение статического момента трения  $M_{\text{т}} = M_{\text{э}} - M_{\text{сн}}$  Н·м и занести его в соответствующую графу табл.3. В первом расчёте первой характеристики был задан момент нагрузки равным нулю. Поэтому  $M_{\text{т}} = M_{\text{э}}$ .

1.10.3. Задаваясь последовательно рядом значений момента  $M_{\text{сн}}(Tl)$  в диапазоне  $M_{\text{сн}}=0 \dots M_{\text{п}}$  в окне задания параметров двигателя, повторить операции п.1.10.1 и 1.10.2 для трех-четырех точек механической характеристики. Среди этих точек следует иметь точки при  $M_{\text{сн}} = M_{2\text{ном}}$ ,  $M_{\text{с}} = 0.5 M_{2\text{ном}}$  и  $M_{\text{сн}} = M_{\text{п}}$ . Данные экспериментов занести в табл.3.

Таблица 3

**Естественная (идеальная) механическая характеристика ДПТ с независимым возбуждением**

№ п/п	$n$	$M_э$	$I_a$	$U_a$	$M_{сн}$	$M_T$	Примечание
	об/мин	Н·м	А	В	Н·м	Н·м	
1					0		реальный хол.ход
2							
3					$M_{2\text{ ном}}$		
4	0				$M_{п}$	0	режим пуска

1.11. Построить искусственную механическую характеристику ДПТ с независимым возбуждением при пониженном напряжении питания обмотки якоря.

- По заданию преподавателя установить значение напряжения источника питания обмотки якоря  $U_1$  в диапазоне  $U_a = (0,6 \dots 0,8) U_{\text{ном}}$ . Напряжение источника  $U_2$ , подаваемое на обмотку возбуждения, остаётся номинальным. В этом и следующем пунктах регулировать напряжения только источников. Параметры двигателя не изменяются. В окне настройки параметров двигателя может изменяться только момент статической нагрузки.

Таблица 4

**Искусственная механическая характеристика ДПТ с независимым возбуждением при пониженном напряжении на обмотке якоря**

№ п/п	$n$	$M_э$	$I_a$	$U_a$	$M_c$	$M_T$	Примечание
-	об/мин	Н·м	А	В	Н·м	Н·м	-
					0		реальный хол.ход
							режим пуска

-Задать параметру  $M_{сн}(Tl)$  его исходное значение  $Tl=0$ .

-Вычислить значение пускового момента при пониженном напряжении  $U_a$  на обмотке якоря  $M_{п} = K_M \cdot U_a / R_{a\Sigma}$  Н·м. Значения постоянного коэффициента  $K_M$  и сопротивления обмотки якоря  $R_a$  берутся из табл. 2.

- Повторить операции п.п.(1.10.1-1.10.3).

- Результаты экспериментов занести в соответствующие графы табл.4.

1.12. Построить искусственную механическую характеристику ДПТ с независимым возбуждением при пониженном напряжении питания на обмотке возбуждения и номинальном напряжении на обмотке якоря.

Примем упрощающее допущение о ненасыщенности магнитопроводов индуктора (статора) и якоря (ротора). В этом случае в пределах допустимой погрешности можно считать, что магнитный поток  $\Phi$  полюса индуктора будет практически пропорционален току  $I_f$  и напряжению  $U_f$  на обмотке

возбуждения. Механическая характеристика, определяемая при пониженных значениях напряжения  $U_f$ , является характеристикой при пониженных значениях магнитного потока возбуждения  $\Phi$ .

- Установить значение напряжения источника питания обмотки якоря  $U$  равным исходному значению  $U_{a\text{ном.}}$  из табл.2.

- Задать параметру  $M_{\text{сн}}(Tl)$  его исходное значение  $Tl=0$ .

- По заданию преподавателя установить значение напряжения источника питания обмотки возбуждения  $U_f$  в диапазоне  $U_f=(0,6\dots0,8)U_{f\text{ном.}}$ .

- Вычислить значение пускового момента при пониженном напряжении  $U_f$  на обмотке возбуждения (пониженном значении магнитного потока возбуждения  $\Phi$ ) и номинальном значении напряжения  $U_a$  на обмотке якоря, используя выражение

$$M_{\text{п}} = (K_{\text{м}} \cdot U_f / U_{f\text{ном.}}) \cdot U_{a\text{ном.}} / R_{a\Sigma}, \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Значения  $K_{\text{м}}$ ,  $U_{f\text{ном.}}$ ,  $R_{a\Sigma}$  берутся из табл.2.

- Повторить операции п.п. (1.10.1-1.10.3). Результаты экспериментов занести в табл.5.

**Таблица 5**

**Искусственная механическая характеристика ДПТ с независимым возбуждением при пониженном значении магнитного потока возбуждения и  $U_a=U_{a\text{ном.}}$**

№ п/п	$n$	$M_{\text{э}}$	$I_a$	$U_a$	$U_f$	$M_{\text{с}}$	$M_{\text{т}}$	Примечание
-	об/мин	Н·м	А	В	В	Н·м	Н·м	-
						0		реальный хол.ход
								режим пуска

1.13. По данным табл.3.3, 3.4 и 3.5 построить на одной координатной сетке графики естественной и искусственных механических характеристик.

1.14. Провести сравнительный анализ характеристик и сделать выводы (оценить величины токов якоря и электромагнитных моментов в сравнении с номинальными значениями).

## **2.Определение границы допустимых значений момента статической нагрузки двигателя постоянного тока с независимым возбуждением при регулировании скорости изменением потока**

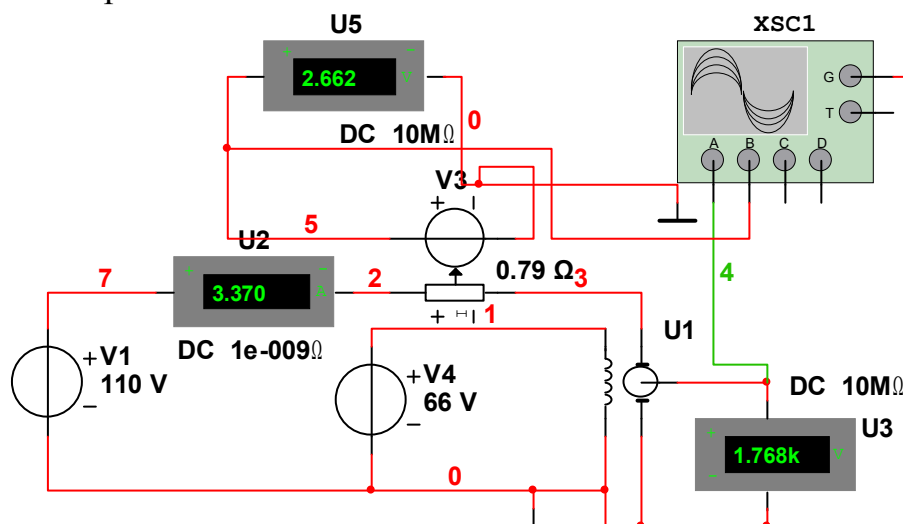
2.1. Статические характеристики аналитически или моделированием вычисляются с любым моментом нагрузки вплоть до момента пускового. Однако, по условиям нагрева машины в статическом длительном режиме допускается работа двигателя с током якоря  $I_a \leq I_{a\text{н}}$ , то есть с электромагнитным моментом  $M_{\text{э}} \leq M_{\text{эн}}$  Н·м. В первой зоне это условие выполняется и границей является вертикальный отрезок от точки на



естественной характеристике при номинальной нагрузке на валу до оси координат моментов (рис.3).

Во второй зоне регулирования повышение скорости вращения достигается ослаблением потока  $\Phi$ . С ростом скорости увеличиваются собственные потери двигателя и для удовлетворения требований, указанных выше, необходимо снижать момент полезной нагрузки на валу двигателя.

Методика проведения эксперимента сопровождается конкретным примером для двигателя общего назначения типа 2ПН90МУХЛ4. Схема эксперимента аналогична схеме для снятия статических характеристик и показана на рис.2.



**Рис.2. Схема виртуального эксперимента для построения границы ограничения момента нагрузки двигателя независимого возбуждения при понижении напряжения источника питания обмотки возбуждения**

2.2. Для расчёта допустимого момента нагрузки необходимо снять ряд статических характеристик, включая естественную характеристику. Для всех характеристик снимаются по два режима (по 2 точки). Так как эксперимент виртуальный, можно один из режимов взять с номинальной нагрузкой двигателя, а второй режим с моментом, равным половине номинального. Результаты расчётов заносятся в таблицы, аналогичные таблицам 3 и 5, только с двумя строками для снятых исходных данных.

**Таблица 6**

**Естественная (идеальная) механическая характеристика ДПТ с независимым возбуждением**

№ п/п	$n$	$M_o$	$I_a$	$U_a$	$M_c$	$M_T$	Примечание
	об/мин	Н·м	А	В	Н·м	Н·м	
1	1168	1,584	2,005	110	1,125	0,459	$U_f=110В$
2	1061	2,664	3,372	110	2,25	0,414	$U_f=110В$

2.3. Снять 3-4 характеристики с ослабленным потоком. результаты занести в табл. 7.

Таблица 7

**Искусственная механическая характеристика ДПТ с независимым  
возбуждением для  $\Phi=0,7\Phi_n$**

№ п/п	$n$	$M_{\Sigma}$	$I_a$	$U_a$	$M_c$	$M_T$	Примечание
	об/мин	Н·м	А	В	Н·м	Н·м	
1	1542	2,474	3,131	110	1,125	1,349	$U_f=77В$
2	1331	3,958	5,01	110	2,25	1,708	$U_f=77В$

2.4. На рис.3 для пояснения методики расчёта предельно допустимых значений статического момента нагрузки показаны участки двух характеристик с нанесёнными значениями электромагнитных моментов и соответствующих им моментов статических нагрузок. Точки *A* и *C* соответствуют половине номинальной нагрузки, а точки *B* и *D* - номинальной нагрузке. Вертикальная линия проходит через точку номинального режима на естественной характеристике и для рассматриваемого примера соответствует моменту 2,664 Н·м. В длительном статическом режиме не допускается работа двигателя с моментами, большими номинального, то есть правее вертикальной границы.

Для искусственной характеристики, показанной на рис.3, это превышение составляет:

$$\Delta M_{\Sigma 1} = M_{\Sigma B} - M_{\Sigma H} = 3,958 - 2,664 = 1,294 \text{ Н·м.}$$

Разность электромагнитных моментов для точек *A* и *B* равна:

$$\Delta M_{\Sigma BA} = M_{\Sigma B} - M_{\Sigma A} = 3,958 - 2,474 = 1,484 \text{ Н·м.}$$

Относительное превышение электромагнитного момента для вертикальной границы составляет:

$$(\Delta M_{\Sigma 1}) / (\Delta M_{\Sigma BA}) = 1,294 / 1,484 = 0,872.$$

Момент статической нагрузки как одно из слагаемых момента электромагнитного должен быть уменьшенным в таком же соотношении:

- величина изменения момента статического для рассматриваемых точек искусственной характеристики  $\Delta M_c = M_{cB} - M_{cA} = 2,25 - 1,125 = 1,125 \text{ Н·м};$

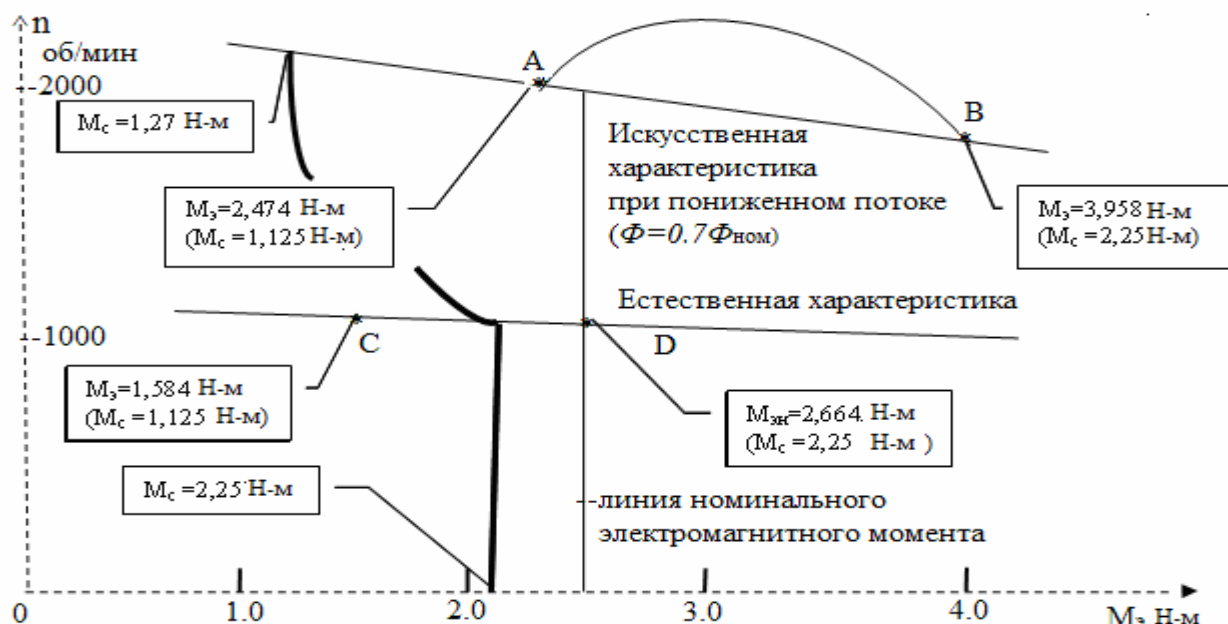
- величина уменьшения статического момента для точки *B*  $\Delta M_{cB} = \Delta M_c \cdot 0,872 = 1,125 \cdot 0,872 = 0,981 \text{ Н·м};$

- величина максимальной допустимой статической нагрузки при работе с пониженным потоком до  $0,7\Phi_n$  в таком случае будет равна:  $M_{c \text{ доп } 0,7} = 2,25 - 0,981 = 1,268 \text{ Н·м}.$

2.5. Полученная величина допустимой статической нагрузки вводится в окне параметров двигателя и проводится расчёт для проверки тока якоря и электромагнитного момента.

2.6. Пункты 2.3 - 2.5 повторяются для ряда значений ослабленного потока. Результаты аналитических расчётов и расчётов на компьютере сводятся в итоговую табл. 8.

2.7. По данным итоговой таблицы строится график допустимого статического момента в функции частоты вращения двигателя.



**Рис.3. Граница ограничения момента нагрузки двигателя независимого возбуждения при ослаблении потока возбуждения**

Рис.3 объясняет методику обработки результатов виртуального эксперимента и построения границы ограничения момента нагрузки двигателя независимого возбуждения при ослаблении потока возбуждения.

График допустимого статического момента в функции частоты вращения двигателя показан жирной линией.

### Выводы по результатам расчёта

- При выборе способа регулирования скорости вращения двигателя необходимо оценивать экономическую целесообразность глубины регулирования выше естественной характеристики по соотношению момента полезного (момент статической нагрузки) и момента собственных потерь, существенно возрастающих при увеличении скорости вращения.

- Выбор зоны регулирования ниже или выше естественной характеристики определяется прежде всего технологическим процессом и механической характеристикой момента нагрузки.

Таблица8

**Итоговая таблица результатов виртуального эксперимента для построения границы ограничения момента нагрузки двигателя**

$U_f$ В	110	99	88	77	66
$U_f$ %	100	90	80	70	60
$M_c$ Н·м	2,25	1,92	1,61	1,27	0,901
n об/мин	1060	1180	1386	1515	1768
$M_3$ Н·м	2,664	2,646	2,662	2,665	2,662
$I_a$	3,373	3,35	3,370	3,373	3,370

### 3. Построение механической характеристики ДПТ с независимым возбуждением при питании от источников конечной мощности

3.1. Заменить в схеме для построения статических характеристик идеальные источники напряжения на линейные модели источников, в которых учитываются внутренние потери в зависимости от потребляемого тока. Модель линейного источника постоянного напряжения находится в виртуальной библиотеке в семействе *Basic* и называется *Virtual Variable PullUp*. Внутренние сопротивления источников задаются в пределах 2÷5 Ом. Источники напряжения соответственно обозначены на схеме (рис.4) как  $V_a$  и  $V_f$ .

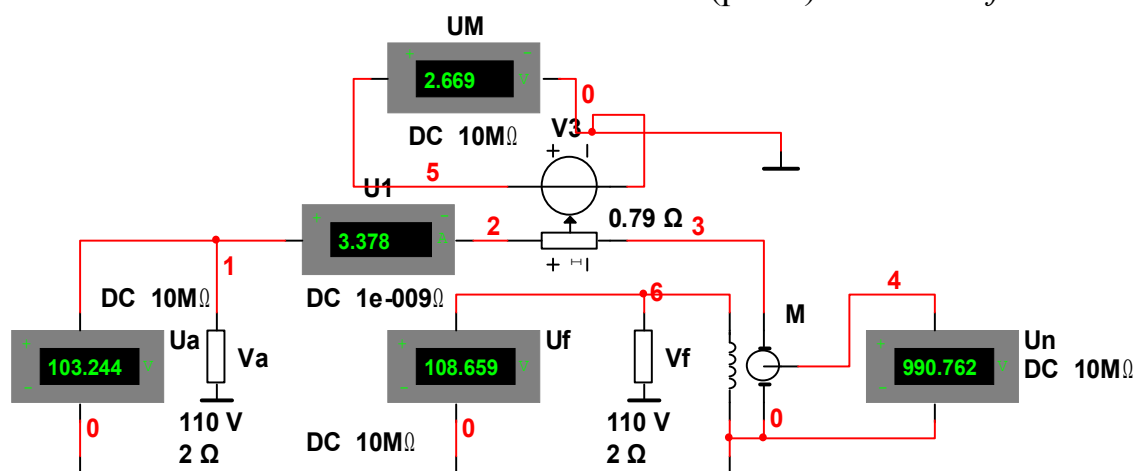


Рис.4. Схема виртуального эксперимента для построения механической характеристики ДПТ независимого возбуждения с источниками питания конечной мощности

3.2. Задать параметры линейных источников постоянного напряжения  $V_a$  и  $V_f$ . Для этого необходимо:

- установить для источников  $V_a$  и  $V_f$  номинальные значения напряжений  $U_a = U_{a\text{ном.}}$  и  $U_f = U_{f\text{ном.}}$  соответственно варианту двигателя;
- установить значения внутренних сопротивлений.

3.3. Параметры моделей источника  $V_3$  (датчика момента) и двигателя  $M$  оставить неизменными в соответствии с принятыми на схеме (рис.2).

Провести виртуальный эксперимент построения механической характеристики для трёх-четырёх точек в диапазоне изменения параметра  $M_c(Tl) = 0 \dots M_n$ .

Данные экспериментов занести в табл.9.

Таблица 9

Механическая характеристика ДПТ с независимым возбуждением при питании от источников конечной мощности

№ п/п	$n$	$M_3$	$I_a$	$U_a$	$M_c$	$M_T$	Примечание
-	об/мин	Н·м	А	В	Н·м	Н·м	-
					0		реальный хол. ход
							режим пуска

3.4. По данным табл.9 построить график механической характеристики.

Сравнить механическую характеристику ДПТ при питании от источников конечной мощности с его естественной характеристикой из п.1. Сделать выводы.

### **Контрольные вопросы**

1. Способы создания магнитного потока в машинах постоянного тока.
2. Определения статических характеристик.
3. Понятие номинального режима двигателя.
4. Способы регулирования скорости двигателей постоянного тока.
5. Понятия статического и динамического режимов двигателей.
6. Причина недопустимости прямого пуска большинства машин постоянного тока.
7. Уравнения баланса моментов двигателя в статическом и динамическом режимах.
8. Физические причины возникновения потерь момента двигателя.
9. Отличие реального холостого хода от идеального в электрических машинах.

## Лабораторная работа 4

### Исследование динамических характеристик двигателя постоянного тока

**Цель работы:** исследование динамических режимов в двигателе постоянного тока с электромагнитным возбуждением.

Помимо исследования переходных процессов, обусловленных непосредственно параметрами двигателя, студенты исследуют влияние на длительность процессов приведённого момента инерции нагрузки и ограничения тока якоря и электромагнитного момента, формируемых любой системой автоматического управления (САУ) электроприводом.

Студенты создают схемы для проведения виртуальных экспериментов и численного анализа, настраивают элементы САУ. Анализируются результаты моделирования. Виртуальный эксперимент и численный анализ проводятся на базе пакета *MultiSim 10*. Используются библиотечные модели контрольно-измерительных приборов и компонент.

#### 1. Построение и исследование переходных характеристик ДПТ с независимым возбуждением

В качестве переходных характеристик в работе рассматриваются реакции двигателя на ступенчатое воздействие заданного уровня. В этом случае используется включение ДПТ на постоянные напряжения на обмотках якоря и возбуждения. Исследуемыми реакциями являются частота вращения вала  $n(t)$  и электромагнитный момент  $M_3(t)$ .

1.1. Сформировать схему для проведения численного анализа и виртуальных экспериментов согласно рис.1.

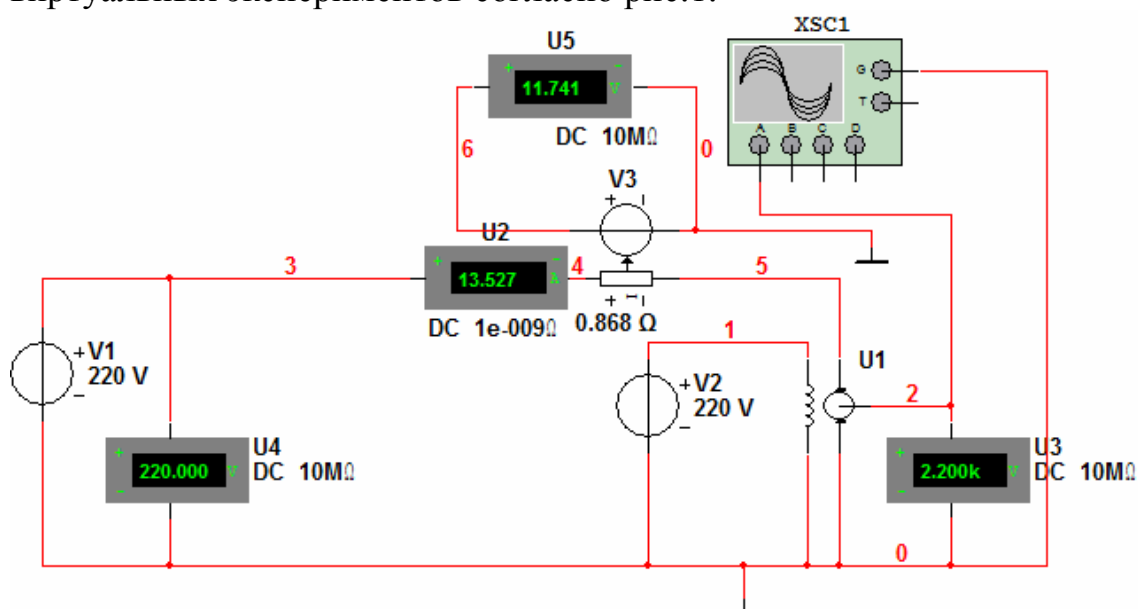


Рис.1. Схема для проведения виртуальных экспериментов и построения переходных характеристик ДПТ с независимым возбуждением в режиме численного анализа

1.1.1. В качестве источника питания обмотки якоря ДПТ с независимым возбуждением в схеме (рис.1) может быть использован как функциональный генератор сигналов *XFG1*, так и источник постоянного напряжения *V*.

1.1.2. Для измерения и регистрации установившихся значений тока якоря  $I_a$ , напряжения на обмотке якоря  $U_a$ , электромагнитного момента двигателя  $M$ , и частоты вращения вала  $n$  используются приборы: амперметр *U2*; вольтметры *U4*, *U5* и *U3* соответственно. Двигатель постоянного тока также имеет библиотечное имя *U1*. Цифровые номера присваиваются автоматически по мере извлечения устройств из библиотеки.

**Примечание.** При желании имена могут быть изменены с целью указания их функции. Например: амперметр *A1*, вольтметры  $U_a$  для измерения напряжения на якоре,  $U_m$  для измерения электромагнитного момента в Вольтах на выходе преобразователя *V3* тока якоря в электромагнитный момент,  $U_n$  для измерения частоты вращения двигателя в единицах 1Вольт/1оборот в мин., источника напряжения *V3* (датчика момента).

1.1.3. Для регистрации и последующего измерения мгновенных значений частоты вращения  $n(t)$  при построении частотных характеристик двигателя в режиме виртуального эксперимента используется четырёхканальный осциллограф *XSC1*.

1.1.4. Модели заземлений, идеального источника постоянного напряжения, амперметра, вольтметров и модель двигателя постоянного тока расположены в виртуальной библиотеке.

1.1.5. Датчик момента (на схеме *V3*) находится в промышленной библиотеке в семействе источников в группе управляемых источников напряжения и имеет имя Источник Напряжения Управляемый Током (*CURRENT CONTROLLED VOLTAGE SOURCE*).

1.1.6. Функциональный генератор *XFG1* и четырёхканальный осциллограф *XSC1* находятся в библиотеке приборов.

1.1.7. После извлечения всех элементов из библиотек следует разместить их в соответствии со схемой (рис.1), соединить и отредактировать численные значения источников и параметры двигателя для своего варианта.

Затем задать параметру  $M_{сн}$  момента статической нагрузки (в окне настройки параметров двигателя имеет имя *Tl*) его исходное значение  $Tl=0$ . Динамические характеристики самого двигателя должны определяться при отсутствии внешней нагрузки в режиме реального холостого хода.

1.1.8. При использовании в качестве источника сигнала функционального генератора *XFG1* следует задать его параметры:

- Выбрать в качестве функции сигнала прямоугольные разнополярные импульсы, нажав кнопку с изображением этого сигнала на лицевой панели генератора.

- В разделе *Signal Option* в строке *Frequency* задать значение частоты сигнала  $f = 0$  Гц. В этом случае в окне появляется значение  $f = 0,001$  пГц ( $0,001$  pHz), что соответствует машинному нулю этого параметра.

- В строке *Duty Cycle* задать значение скважности сигнала 50 % (по умолчанию 50 %).

- Установить в строке *Amplitude* значение амплитуды выбранного сигнала  $U_m=0$ . В соответствующем окне появляется значение 0,001 pV, что соответствует машинному нулю этого параметра.



- В строке *Offset* установить значение напряжения смещения (постоянную составляющую сигнала)  $U_{см.} = U_{аном.}$ . В. Значение номинальной величины напряжения якоря  $U_{аном.}$  берется из таблицы вариантов двигателей.

При таком задании параметров сигнала на выходе генератора обмотка якоря двигателя будет включаться на постоянное напряжение  $U_{аном.}$ . Включение схемы обеспечивает подачу на обмотки двигателя ступенчатых воздействий, имеющих соответствующие уровни  $U_{аном.}$  и  $U_{фном.}$ , а реакции будут являться переходными характеристиками.

1.1.9. Параметр модели источника напряжения, управляемого током,  $I_3$  (датчика момента) задать равным  $K_m$  - коэффициенту, связывающему ток якоря и электромагнитный момент.

Амперметр и вольтметры должны быть включены в режим работы по постоянному току *DC* (по умолчанию *DC*).

1.1.10. Провести виртуальный эксперимент определения установившихся значений  $n(\infty)$  и  $M_3(\infty)$  для соответствующих переходных характеристик. Для этого необходимо:

- запустить модель переключателем .
- зафиксировать показания амперметра  $U_2$  и вольтметров  $U_3$ ,  $U_4$  и  $U_5$ ;
- отключить модель переключателем .
- данные занести в соответствующие графы табл.1 для  $t=\infty$ ;
- независимые начальные условия  $n(t_0)$  и  $M_3(t_0)$  являются нулевыми и заносятся в графы табл.1 для  $t_0=0$ .

Остальные точки переходных характеристик  $n(t)$  и  $M_3(t)$  определяются в режиме численного анализа *Transient Analysis*.

Таблица 1

Переходные характеристики ДПТ с независимым возбуждением

$t$ с	0						$t_{рас}=\dots$	$\infty$
$M_3$ Н·м	0							
$n$ об/мин	0							

1.1.11. Подготовить схему (рис.1) для определения переходных характеристик в режиме численного анализа.

- Выбрать узлы, соответствующие узловым напряжениям переходных характеристик: напряжению  $U_3$  (узел 2) для  $n(t)$  и напряжению источника  $I_3$  (узел 6) для  $M_3(t)$ . Номера узлов даны для схемы на рис.1. Номера узлов задаются программой автоматически в порядке подключения очередного элемента цепи и при сборке одной и той же схемы могут быть разными.

1.1.12. В главном меню выбрать режим численного анализа *Simulate*, выбрать вид численного анализа *Transient* и задать его параметры. Используя окно задания параметров анализа *Transient Analysis*, закладку *Analysis Parameters* выбрать в разделе *Initial Conditions* вид независимых начальных условий в перечне падающего меню: *Set to zero* – нулевые (по умолчанию



*Automatically determine initial* – автоматическое определение начальных условий).

- В разделе *Parameters* в строке *Start time (TSTART)* установить значение нижнего предела интегрирования (момент включения)  $t_0=0$ .

- В строке *End time (TSTOP)* установить значение верхнего предела интегрирования  $t_{\text{рас.}}=(6\dots 10)\cdot T_M$  в секундах, где значение электромеханической постоянной времени двигателя  $T_M$  берется из каталожных данных или из таблицы вариантов для заданного типа двигателя, выбранного по указанию преподавателя.


- Включить режим автоматического выбора максимального шага интегрирования *Maximum time step setting (TMAX)*.

- Включить режим *Minimum number of time points* (задание минимального количества точек расчета, выводимых на графики) и установить значение равное 100.

- Открыть закладку *Output variables* (Выходные переменные)

- В обоих разделах *Variables in circuit* (Переменные в цепи) и *Selected Variables for analysis* (Выбранные переменные для построения графиков) в падающих меню установить вид списка переменных *All variables* (все переменные).

- Перевести из окна раздела *Variables in circuit* в окно раздела *Selected Variables for analysis* номера узлов (узловых напряжений), соответствующих переходным характеристикам  $M_3(t)$  и  $n(t)$ . Для схемы рис.1 это будут  $V(6)$  и  $V(2)$ .

1.1.13. Запустить процесс анализа кнопкой  из любого окна настроек режима *Transient Analysis*.

- Результаты анализа отображаются в окне *Grapher View* (Обзор Графиков). Используя визиры снять с графиков координаты 4-х...6-ти точек переходной характеристики в диапазоне  $t=0\dots t_{\text{рас.}}$ :

- с горизонтальной оси "X" считываются значения  $t$  в секундах;

- с вертикальной оси "Y" считываются мгновенные значения переходных характеристик  $M_3(t)$  и  $n(t)$  в Вольтах, причем 1В соответствует 1 Н·м, если коэффициент преобразования тока якоря в момент равен  $K_{\text{м}}$ , либо надо учитывать масштаб преобразования. Масштаб преобразования момента приходится использовать при одновременном снятии обеих переходных характеристик, так как вертикальная ось имеет один масштаб для обоих графиков.

При снятии координат точек характеристики  $M_3(t)$  обязательно снять точку, соответствующую максимальному значению электромагнитного момента.

- Данные измерений занести в табл.1.

Используя данные табл.1 построить графики переходных характеристик  $M_3(t)$  и  $n(t)$ . Проанализировать характер переходных характеристик. Сделать выводы.

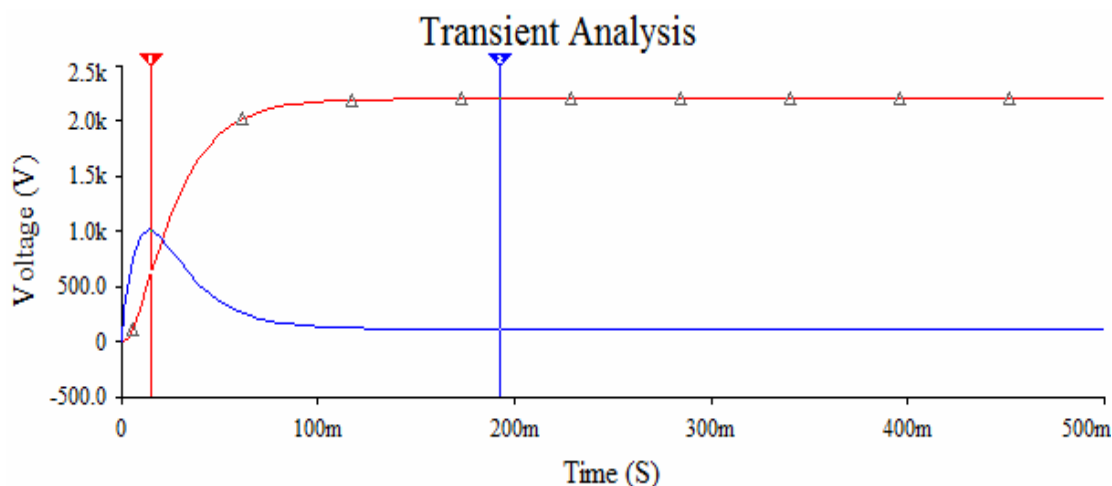
## **2. Построение и исследование характеристик ДПТ с независимым возбуждением при ограничении тока (электромагнитного момента) для различных значений момента нагрузки и различных значений приведённого момента инерции механизма**

2.1. В первом разделе лабораторной работы при исследовании переходных характеристик рассматривался режим прямого пуска электродвигателя постоянного тока при отсутствии момента нагрузки на валу двигателя. Двигатели постоянного тока в своём большинстве не допускают прямого пуска при номинальном напряжении на якоре из-за недопустимых значений пускового тока и момента.

В системах автоматического управления контролируются значения тока и момента двигателей. Зная величины этих ограничений можно получить динамические характеристики процессов в двигателе с учётом ограничений величин моментов нагрузки и приведённых моментов инерции механизма, приводимого в движение двигателем не моделируя всю систему автоматического управления. Исследованию этих процессов и посвящён второй раздел лабораторной работы.

2.2. Исследование влияния перечисленных выше факторов на длительности переходных процессов и другие характеристики проводятся сопоставлением режима работы двигателя при прямом пуске с номинальным моментом нагрузки на валу двигателя и собственным моментом инерции.

2.2.1. Исследование переходного процесса в режиме работы двигателя при прямом пуске с номинальным моментом нагрузки на валу двигателя и собственным моментом инерции проводится по схеме (рис.1). Графики переходного процесса показаны на рис.2.



**Рис.2. Графики электромагнитного момента и частоты вращения при прямом пуске двигателя с номинальной нагрузкой**

На рис.2 первый курсор отмечает в момент времени 14,87 мс значения электромагнитного момента 100 Н·м и частоту вращения (отмечена треугольниками) 600 об/мин; второй курсор в момент времени 192,4 мс отмечает достижение процессом расчётного установившегося значения -

частоты вращения  $n_{уст}=2200$  об/мин;  $M_{эуст}=11,76$  Н·м. Масштаб изображения момента равен 10.

По зависимости частоты вращения от времени видно, что этот двигатель является апериодическим звеном второго порядка. При этом зависимость электромагнитного момента двигателя от времени имеет недопустимое перерегулирование на начальном участке пуска, составляя 100 Н·м при номинальном значении, равном 11,74 Н·м, то есть превышая его в 8,5 раз. Длительность переходного процесса по частоте вращения с точностью 5 % от установившегося значения ( $n_{уст5\%}=2090$  об/мин) составила 71,56 мс.

В реальных электроприводах такие режимы недопустимы. В замкнутых системах ограничиваются величины токов и моментов.

2.3. Исследование переходного процесса в режиме работы двигателя при пуске с номинальным моментом нагрузки на валу двигателя и собственным моментом инерции при ограничении тока якоря допустимым значением.

Ограничение тока допустимым значением при переходных процессах по существу моделирует отрицательную обратную связь по току с отсечкой без моделирования структуры привода. В результате получаем информацию о реальной длительности переходных процессов пуска вхолостую, с разными моментами нагрузки и разными приведёнными к валу двигателя моментами инерции механической части привода. Схема модели с узлом ограничения тока якоря (отсечки по току) показана на рис.3.

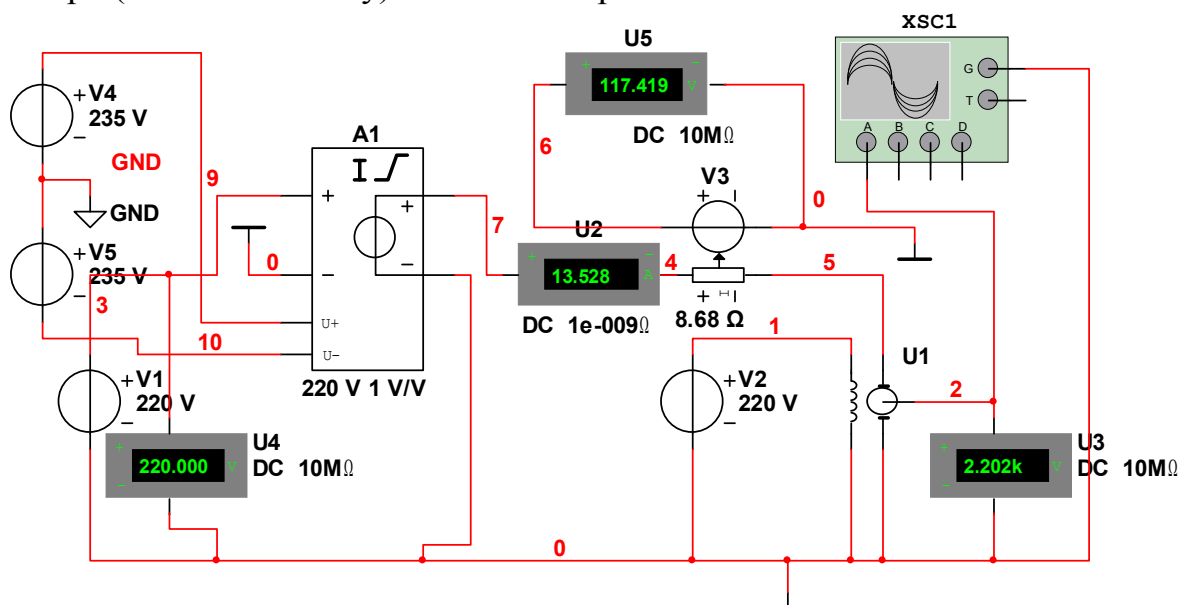


Рис.3. Схема исследования динамических характеристик двигателя при ограничении тока якоря на уровне двойного номинального тока при номинальной нагрузке  $M_c=10,85$  Н·м

Блок ограничения тока (*CURRENT LIMITER BLOCK*) находится в промышленной библиотеке в семействе источников (*SOURCES*). Настройка блока проводится в окне настройки в следующем порядке:

- вводится напряжение основного источника питания двигателя (*Input Offset Voltage*) 220 В;

- коэффициент усиления (*Gain*) оставляем равным 1  $V/V$ ;
- сопротивление выходное по положительному выходу блока (*Sourcing Resistance*) оставляем равным по умолчанию 1 Ом;
- сопротивление выходное по отрицательному выходу блока (*Sinking Resistance*) оставляем равным по умолчанию 1 Ом;
- предел выходного тока по "+" выходу (*Current Sourcing Limit*) задаём равным удвоенному номинальному току якоря 27,08 А ;
- предел выходного тока по "-" выходу (*Current Sinking Limit*) задаём равным удвоенному номинальному току якоря 27,08 А ;
- следующие 4 параметра оставляем по умолчанию.

Подключение внешних входов блока:

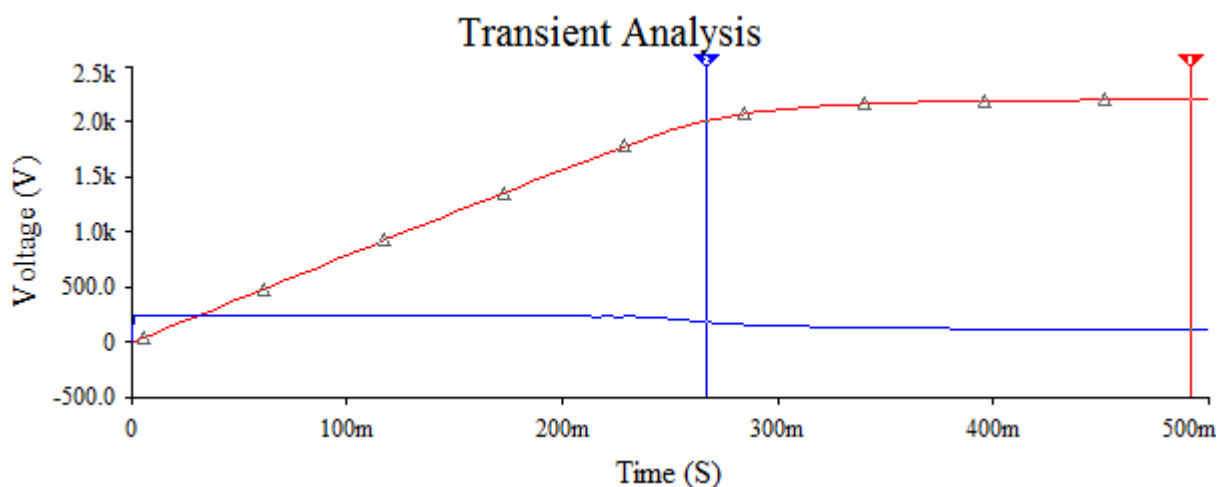
- на основные входы "+" и "-" подключается источник цепи якоря;
- на входы  $V_+$  и  $V_-$  подаются напряжения двух источников постоянного напряжения с одинаковым уровнем 235 В для обеспечения работы блока как операционного усилителя с линейной характеристикой от +220 В до -220 В с запасом.

Выход "+" подаётся на цепь якоря.

Выход "-" заземляется.

2.3.1. Численный анализ процесса проводится аналогично п.1.1.12 и 1.1.13.

В результате расчёта получаем следующие зависимости (см.рис.4).




**Рис.4. Временные зависимости электромагнитного момента и частоты вращения (отмечена треугольниками) при пуске с номинальной нагрузкой и ограничением тока якоря двойной величиной номинального значения**

Курсор 1 отмечает момент времени 492 мс, когда величина частоты вращения двигателя достигла номинального значения 2200 об/мин, а электромагнитный момент имеет номинальное значение 11,79 Н·м. Второй курсор отмечает момент времени 266,7 мс, когда частота вращения составляет 95 % от установившейся величины, то есть 2090 об/мин. В результате введения узла ограничения тока якоря электромагнитный момент  $M_2$  не имеет перерегулирования до 100 Н·м и в течение всего пуска не превышает величины

18,2 Н·м. Длительность процесса пуска с ограничением тока при этом возросла в 3,8 раза.

2.3.2. Исследование зависимости длительности пуска двигателя при разных нагрузках от 0 до номинальной при ограничении тока якоря.

В экспериментах для ряда значений статической нагрузки проводятся расчёты переходных процессов и фиксируются только значения расчётной установившейся частоты вращения  $n_{уст.расч}$ , теоретической длительности переходного процесса, длительности переходного процесса до входа в зону 5 % отклонений и саму величину частоты вращения, соответствующую заданному отклонению от теоретического значения  $n_{уст.5\%}$ .

2.3.3. Величина теоретической установившейся частоты вращения  $n_{уст.расч}$  определяется при проведении расчёта с использованием кнопки  по показаниям вольтметра  $U_3$ . Результаты занести в табл.2 во вторую и третью строки.

2.3.4. По величине теоретической установившейся частоты вращения  $n_{уст.расч}$  вычисляется величина установившейся частоты вращения при допустимом отклонении 5 %:  $n_{уст.5\%} = 0,95 n_{уст.расч}$ .

2.3.5. В режиме численного анализа *Transient Analysis* проводится расчёт процесса и по рассчитанной величине  $n_{уст.5\%}$  определяется реальная длительность процесса  $t$  с.

Измеренные величины заносятся в четвёртую и пятую строки табл.2.

**Таблица 2**

$M_{нагр}$ , Нм	2	4	6	8	10,85
$n_{уст.расч}$ , об/мин					
$t$ , с					
$n_{уст.5\%}$ , об/мин					
$t$ , с					

В табл.2 в первой строке заданы моменты нагрузки для конкретного двигателя, рассматриваемого в качестве примера. Студенты должны задавать для своего варианта двигателя значения моментов нагрузки, примерно равные 20 %, 40 %, 60 % и 80 % от значения номинального момента нагрузки.

2.3.6. Расчёт по п.2.3.4 и п.2.3.5 проводится для каждого столбца табл.2.

2.4. Исследовать зависимость длительности пуска двигателя при номинальной нагрузке и различных моментах инерции механической части привода, приведённых к валу двигателя.

2.4.1. Суммарный момент инерции вводится в окно параметров двигателя как собственный момент инерции двигателя.

Результаты экспериментов занести в табл.3, аналогичную табл.2, только в первой строке будут задаваться моменты инерции. В экспериментах фиксировать  $n_{уст.расч}$  и  $n_{уст.5\%}$  и моменты времени достижения этих значений. Момент инерции задавать в долях момента инерции ротора двигателя:  $J_{\Sigma} = 1,2 J_{дв}$ ,  $1,4 J_{дв}$ ,  $1,6 J_{дв}$ ,  $1,8 J_{дв}$ ,  $2 J_{дв}$ .

Таблица 3.

$J_{\Sigma}$ , Н·м·с/рад	$1,2 J_{\text{дв}}$	$1,4 J_{\text{дв}}$	$1,6 J_{\text{дв}}$	$1,8 J_{\text{дв}}$	$2,0 J_{\text{дв}}$
$n_{\text{уст.расч}}$ , об/мин					
$t$ , с					
$n_{\text{уст.5\%}}$ , об/мин					
$t$ , с					

По результатам экспериментов сделать выводы о влиянии приведённого момента инерции на длительность переходных процессов и на величины установившихся значений частот вращения двигателя.

### 3. Построение и исследование частотных характеристик ДПТ с независимым возбуждением

3.1. Частотные характеристики двигателя показывают возможность отработки им синусоидального входного сигнала в диапазоне изменения частоты сигнала  $\omega$  (или  $f$ ) от 0 до  $\infty$  в установившемся режиме.

В качестве воздействия в данной работе рассматривается напряжение  $u_a(t)$ , подаваемое на обмотку якоря. Реакциями являются частота вращения вала  $n(t)$  и развиваемый двигателем электромагнитный момент  $M_3(t)$ .

Наиболее важными эксплуатационными характеристиками в данном случае следует считать зависимости  $n(f)$  и  $M_3(f)$ .

В силу инерционности двигателя увеличение частоты воздействия  $f$  приводит к снижению частоты вращения ротора  $n$  в квазистационарном (установившемся) режиме.

Для практических целей частотные характеристики  $n(f)$  и  $M_3(f)$  снимаются при напряжении на обмотке якоря, близкому к номинальному значению. Это напряжение определяется функцией:

$$u_a(t) = U_{\text{см.}} + U_m \sin(\omega t + \psi_u),$$

где  $U_{\text{см.}} \cong U_{\text{аном.}}$  - напряжение смещения, В;

$U_m = (0,1 \dots 0,2) U_{\text{аном.}}$  - амплитуда переменной составляющей сигнала, В;

$\omega = 2\pi f$  рад/с;  $f$  - частота синусоидального сигнала, Гц;

$\psi_u$  - начальная фаза переменной составляющей, рад.

Учитывая допущение о линейности электрических, магнитных и механических цепей двигателя, можно для такого сигнала представить реакции в виде следующих функций:

$$n(t) = n_0 + n_m \sin(\omega t + \psi_n) \text{ об/мин};$$

$$M_3(t) = M_{30} + M_{3m} \sin(\omega t + \psi_M) \text{ Н·м.}$$

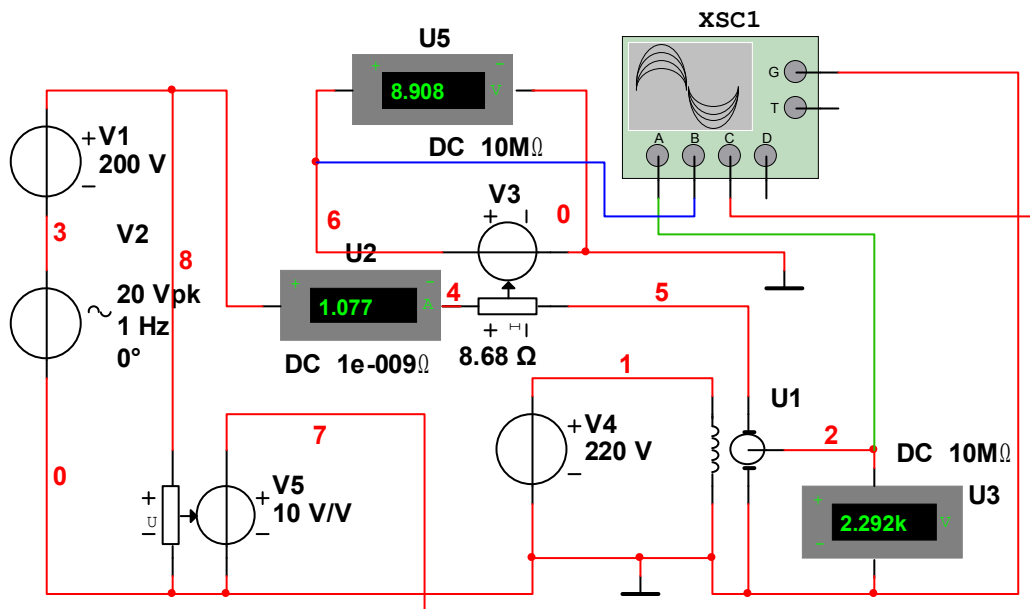
В этих выражениях:  $n_0$  и  $M_{30}$  - постоянные составляющие, равные частоте вращения ротора и соответственно значению электромагнитного момента в режиме постоянного тока, определяемые напряжением смещения  $U_{\text{см.}}$ ;  $n_m$  и  $M_{3m}$  - амплитудные значения переменных составляющих,

определяемые напряжением  $U_m$ ;  $\psi_n$  и  $\psi_M$  - начальные фазы переменных составляющих соответствующих реакций.

### 3.2. Настройка элементов схемы для проведения численного анализа

На рис.5 показана схема, позволяющая снять частотные характеристики двигателя как в режиме виртуального эксперимента, так и в режимах численного анализа. Снятие амплитудно-частотных характеристик для ряда фиксированных частот возможно как в режиме виртуального эксперимента с использованием четырёхлучевого осциллографа XSC1, так и в режиме численного анализа в режиме *Transient Analysis*.

Четырёхлучевой осциллограф XSC1 позволяет регулировать масштаб отображаемых переменных по каждому входу независимо, но требует значительно большего времени для построения графиков. Результаты численного анализа отображаются собственным визуализатором несоизмеримо быстрее, но с одним масштабом по оси  $Y$  для всех переменных. Поэтому все переменные, которые предполагается выводить на экран, должны быть согласованы с масштабом наибольшей величины. В нашем случае такой величиной является частота вращения  $n(t)$ . Поэтому масштаб  $M_3(t)$  увеличиваем в 10 раз изменением коэффициента преобразования источника  $V3$ , и результирующее напряжение источника ( $V1+V2$ ) также увеличивается для отображения на экране в 10 раз преобразователем  $V5$  (*VOULTAGE CONTROLLED VOULTAGE SOURCE*).



**Рис.5. Схема для проведения виртуальных экспериментов и построения частотных характеристик ДПТ с независимым возбуждением**

3.3. Задаются параметры испытательного сигнала, создаваемого двумя источниками  $V1$  и  $V2$ :

- значение  $U_{\text{аном.}}$  берется согласно варианту задания;

- так как значение амплитуды переменной составляющей сигнала рекомендуется брать равным  $U_m = (0,1...0,2)U_{аном.}$  В, то, чтобы напряжение на якоре в эксперименте не превышало номинального значения, напряжение постоянной составляющей (напряжение смещения  $U_{см.}$ ) задаётся равным  $U_{см.} = U_{аном.} - U_m$  В;

- примем  $U_{аном.} = 220$  В,  $U_m = 20$  В,  $U_{см.} = 200$  В;

- в источнике гармонического сигнала кроме амплитуды, сохраняющей неизменное значение в течение всего эксперимента, задаётся частота сигнала  $f = 1, 2, 3, ..., 10, 20, 30$  Гц .

3.4. Задать параметру модели двигателя  $M_{сн}(Tl)$  его исходное значение  $Tl=0$ . Частотные характеристики ДПТ должны определяться при отсутствии внешней нагрузки в режиме реального холостого хода. Все остальные параметры двигателя задаются в соответствии с каталожными данными двигателя.

3.5. В главном меню выбрать режим численного анализа Simulate, выбрать вид численного анализа Transient и задать его параметры. Используя окно задания параметров анализа *Transient Analysis*, закладку *Analysis Parameters* выбрать в разделе *Initial Conditions* вид независимых начальных условий в перечне падающего меню: *Set to zero* – нулевые (по умолчанию *Automatically determine initial* – автоматическое определение начальных условий).

В разделе *Parameters* в строке *Start time (TSTART)* установить значение начала расчёта  $t_0=0$ .

В строке *End time (TSTOP)* установить длительность расчёта в секундах, равную 4-5-ти периодам испытательного сигнала. Для каждого значения частоты  $f$  необходимо редактировать этот параметр.


Включить режим автоматического выбора максимального шага интегрирования *Maximum time step setting (TMAX)*.

Включить режим *Minimum number of time points* (задание минимального количества точек расчета, выводимых на графики) и установить значение, равное 1000.

Открыть окно *Output variables* (выходные переменные).

В обоих разделах *Variables in circuit* и *Selected Variables for analysis* в падающих меню установить вид списка переменных *All variables* (все переменные).

Перевести из окна раздела *Variables in circuit* в окно раздела *Selected Variables for analysis* номера узлов, потенциалы которых соответствуют исследуемым характеристикам  $U_a(t)$ ,  $M_s(t)$  и  $n(t)$  . В рассматриваемом примере на рис.5 это соответственно узлы  $U(7)$ ,  $U(6)$  и  $U(2)$ .

3.6. Запустить процесс анализа кнопкой .

3.7. Провести анализ результатов расчёта и провести измерения величин:

- при желании сменить чёрный фон на белый;
- вызвать сетку и курсоры;



- на установившемся участке процесса с помощью курсоров измерить  $n(t)_{\text{мин}}$ ,  $n(t)_{\text{макс}}$ , интервал временного сдвига  $n(t)_{\text{макс}}$  и  $U_a(t)_{\text{макс}}$ .

3.8. Результаты измерений для расчёта точек амплитудно-частотной и фазочастотной характеристик частоты вращения двигателя (верхний график, отмеченный треугольниками на рис.6а) заносятся в табл.4 в 1-ю и 2-ю строки.

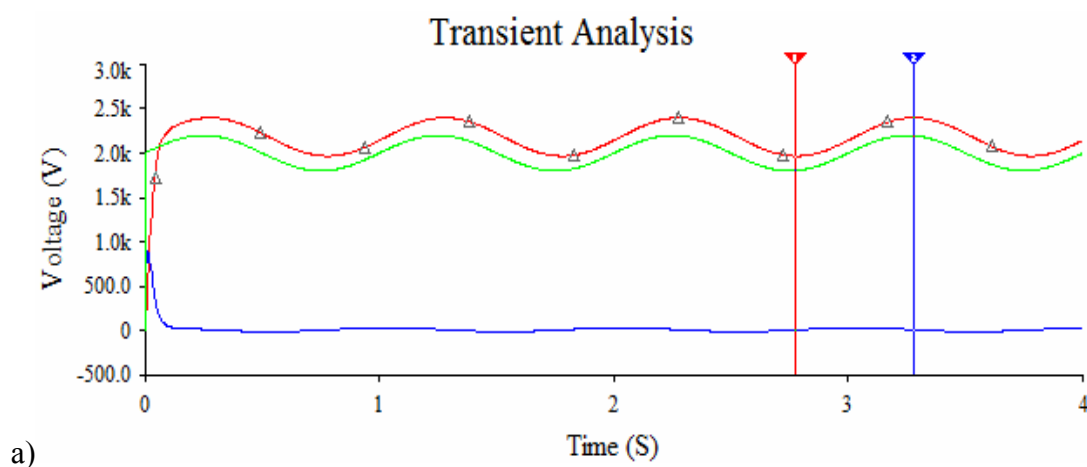
Таблица 4

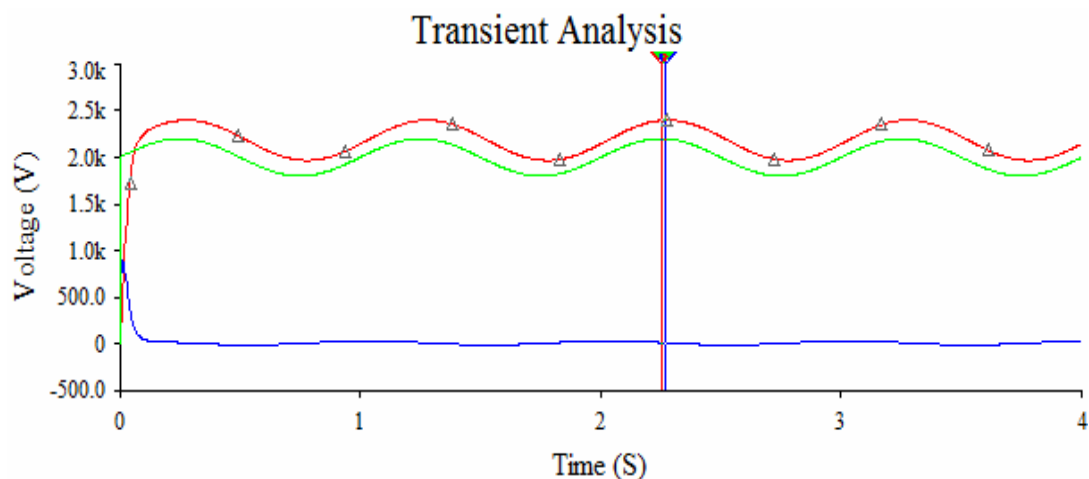
$f$ , Гц	1	2	3	4	5	6	7	10	20
$n(t)_{\text{макс}}$ , об/мин	2398				2360				
$n(t)_{\text{мин}}$ , об/мин	1966				2004				
$n(t)_{\text{макс}} - n(t)_{\text{мин}}$ , об/мин	432				355,6				
$[n(t)_{\text{макс}} - n(t)_{\text{мин}}] / [2 \cdot 20]$	10,8				8,89				
$\Delta t$ , $10^{-3}$ с	15				27,88				
$\varphi = 360^\circ \cdot f \cdot \Delta t$ , градусов	-5,4				-50,2				

На рис.6.а показано снятие максимального и минимального значений частоты вращения вала двигателя. Разность максимальной величины (измеряется курсором 2) и минимальной величины (измеряется курсором 1) является удвоенной амплитудой колебаний частоты вращения и заносится в 3-ю строку табл.4.

Верхняя синусоида отражает частоту вращения вала двигателя  $n(t)$ , средняя соответствует испытательному сигналу  $U_a(t)$ , а нижняя электромагнитному моменту  $M_e(t)$ . На рис. 6.б показано снятие временного сдвига синусоид  $n(t)$  и  $U_a(t)$ . При частоте сигнала 1Гц временное смещение составляет 15 мс или в фазовом представлении для 1Гц  $5,4^\circ$  (результаты измерения и расчёта заносятся соответственно в 5-ю и 6-ю строки).

Вывод: частота вращения отстаёт по фазе от гармонической составляющей сигнала на якоре на  $5,4^\circ$ .





б)

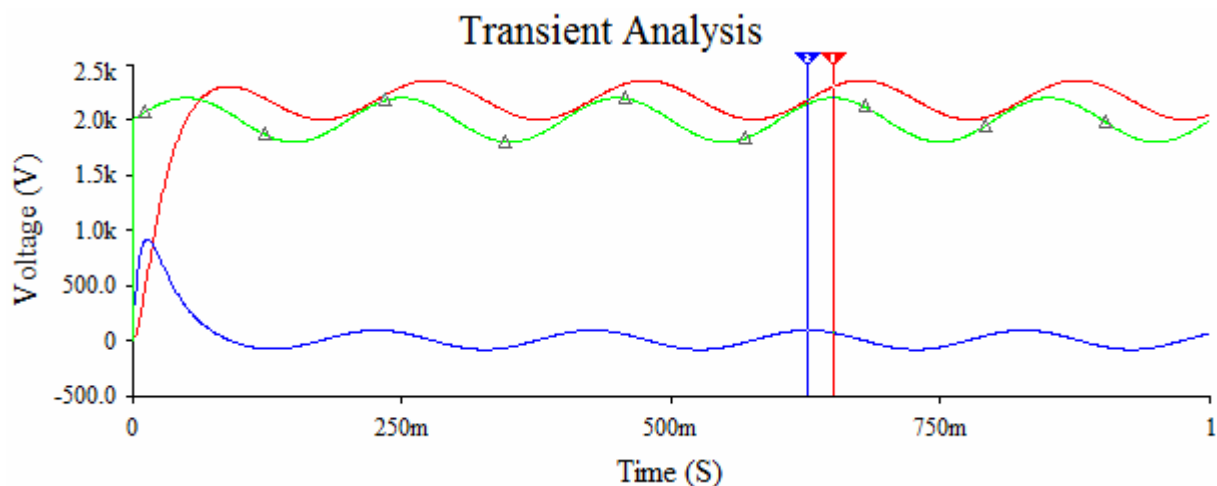
**Рис.6. Графики виртуальных экспериментов для построения частотных характеристик ДПТ с независимым возбуждением**

3.9. По данным табл.4 построить графики экспериментальных АЧХ и ФЧХ двигателя для частоты вращения вала.

3.10. Проанализировать форму характеристики. Сделать выводы о частотных свойствах ДПТ.

3.11. Для построения частотных характеристик с электромагнитным моментом в качестве выходной величины следует заполнить таблицу, аналогичную табл.4, только для  $M_3(t)$  вместо  $n(t)$ .

В качестве примера измерения фазового смещения выходного сигнала по отношению к входному для электромагнитного момента рассмотрим одну точку для гармонической составляющей входного сигнала с частотой 5 Гц.



**Рис.7. Графики виртуальных экспериментов для построения частотных характеристик ДПТ с независимым возбуждением**

Первый курсор отмечает амплитуду напряжения на якоре (220В). Второй курсор отмечает амплитуду  $M_3(t)$  -нижний график. Частота равна 5 Гц. Временной сдвиг составляет 24,16 мс, что для 5 Гц соответствует  $41,3^\circ$ .

При расчёте точек АЧХ по временным характеристикам необходимо помнить о введенных масштабах для удобства исследования. Рассмотрим пример расчёта одной точки для выходной величины  $M_3$ .

На нижнем графике (рис.7) измеряем максимальную и минимальную величины  $M_3(t)$ :  $M_{3\text{ макс}} = 96,66 \text{ Н}\cdot\text{м}$ ,  $M_{3\text{ мин}} = -78,85 \text{ Н}\cdot\text{м}$ .

Определяем двойное значение амплитуды колебания  $M_3(t)$ :

$$M_{3\text{ макс}} - M_{3\text{ мин}} = 175,51 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Определяем точку частотной характеристики:

$$(M_{3\text{ макс}} - M_{3\text{ мин}}) / (2 \cdot 10 \cdot 20) = 0,4387 \text{ Н}\cdot\text{м}/\text{В}. \text{ В этой формуле:}$$

- деление на 2 даёт амплитуду синусоидальной составляющей  $M_3(t)$ ;
- деление на 10 учитывает введённый масштаб в преобразовании тока якоря в электромагнитный момент  $M_3$  в источнике  $I3$ ;
- 20 - величина амплитуды гармонической компоненты испытательного сигнала.

#### 4. Построение и исследование частотных характеристик ДПТ с независимым возбуждением в режиме численного анализа

4.1. В главном меню выбрать режим численного анализа *Simulate*, выбрать вид численного анализа - частотный анализ *AC Analysis* и открыть окно задания параметров анализа *AC Analysis* на закладке *Frequency Parameters*.

Задать в строке *Start frequency (FSTART)* значение начальной частоты анализа  $f_{\text{нач}} = 0,1 \text{ Гц}$ . **ЗАПРЕЩЕНО ЗАДАНИЕ  $f_{\text{нач}} = 0$ .**

Задать в строке *Stop frequency (FSTOP)* значение конечной частоты анализа  $f_{\text{кон}} = 100 \text{ Гц}$ , а также соответствующий масштаб в окнах 

Hz	<input type="text"/>
----	----------------------

.

В строке *Sweep type* указать тип шкалы по горизонтальной оси частот - *Decade* (в декадах).

В строке *Number of points per decade* задать количество точек расчета в одной декаде  $N=1000$ .

В строке *Vertical scale* указать тип шкалы по вертикальной оси - *Linear* (линейный).

Открыть закладку *Output variables*. Перевести из окна раздела *Variables in circuit* в окно раздела *Selected variables for analysis* номер узла (узловое напряжения), соответствующего напряжению  $u_n(t)$  (характеристика  $n(f)$ ).

4.2. Запустить процесс анализа кнопкой 

Simulate
----------

.

Используя курсоры, снять с результатов частотного анализа координаты точек АЧХ и ФЧХ для тех значений частоты  $f$ , которые использовались в виртуальном эксперименте (см.табл.4).

С горизонтальных осей "X" считываются значения частоты  $f$  в Гц.

С оси "Y" АЧХ (верхняя координатная плоскость) считываются относительные значения амплитуды (*Magnitude*) переменной составляющей напряжения  $u_n(t)$  (переменной составляющей частоты вращения). Для типа шкалы *Linear*, принятого по оси "Y", масштаб *Magnitude* в относительных единицах. Базисным напряжением является амплитудное значение переменной составляющей  $U_m$ , заданное в п. 3.3.

Относительное значение амплитуды переменной составляющей частоты вращения ротора определяется выражением:

$$n_m^* = n_m / U_m \cdot \alpha_n, \text{ где } \alpha_n = 1 \text{ об/мин} \cdot \text{В}.$$

С оси "Y" ФЧХ (нижняя координатная плоскость) считаются значения аргументов частотной передаточной функции в градусах (*Phase (deg)*). Значение аргумента определяется как разность между начальными фазами соответствующих переменных составляющих  $\varphi_n = \psi_n - \psi_u$  для каждого значения частоты  $f$ .

4.3. Занести результаты измерения (координаты точек АЧХ и ФЧХ) в табл.5.

Сопоставить результаты численного анализа с результатами виртуального эксперимента табл.4. Сделать выводы.

4.4. Определить, используя курсоры, полосу пропускания двигателя  $\Delta f$ :

- определить значение  $n_m^*(f_{\text{нач.}})$ ;
- определить при помощи визира значение граничной частоты  $f_{\text{гр.}}$ , при которой  $n_m^*(f_{\text{гр.}}) = 0,707 n_m^*(f_{\text{нач.}})$ .

**Таблица 5**

**Результаты численного анализа: АЧХ и ФЧХ для выходной переменной (частоты вращения ротора)**

$f$ Гц								Примечания
$n_m^*$								АЧХ
$\varphi_n$ град.								ФЧХ

4.4. Определить, используя курсоры, полосу пропускания двигателя  $\Delta f$ :

- определить значение  $n_m^*(f_{\text{нач.}})$ ;
- определить при помощи курсора значение граничной частоты  $f_{\text{гр.}}$ , при которой  $n_m^*(f_{\text{гр.}}) = 0,707 n_m^*(f_{\text{нач.}})$ .

В данном случае полоса пропускания двигателя  $\Delta f = 0 \dots f_{\text{гр.}} \approx f_{\text{нач.}} \dots f_{\text{гр.}}$ , Гц. Это полоса частот, в которой ДПТ отрабатывает входной сигнал практически без искажения.

4.5. Используя данные табл.5 построить графики АЧХ и ФЧХ двигателя. Проанализировать формы характеристик. Сделать выводы.

4.6. По указанию преподавателя при выполнении работы на более высокую оценку построить и исследовать частотные характеристики  $M_s(f)$  и  $\varphi_M(f)$  в режиме численного анализа, используя в качестве реакции напряжение источника  $I_3$  (датчика момента). Так как при расчёте программа учитывает формально величину параметра источника (в схеме  $I_3$ ), то:

- или для этого расчёта параметр должен быть номинальным,
- или масштаб вертикальной оси АЧХ должен быть скорректирован в соотношении изменения параметра преобразования тока в момент (смотри пример расчёта в п. 3.11).

На ФЧХ для  $M_s$  этот параметр не влияет, как и на другие частотные характеристики.

### **Контрольные вопросы:**

1. Условия определения переходной характеристики объекта.
2. В чём причина большого пускового тока двигателя?
3. Определение величины допустимого напряжения на якоре машины в первый момент пуска.
4. Характеристики переходного процесса.
5. Сравнить длительности переходных процессов при прямом виртуальном пуске и реальном пуске с ограничением тока якоря в процессе всего пуска.
6. Как влияет на характеристики пуска величина момента нагрузки?
7. Как влияют на характеристики пуска величины моментов инерции нагрузки?
8. Как влияют величины моментов инерции нагрузки на установившиеся значения частоты вращения двигателя?
9. Как влияет величина момента нагрузки на установившееся значение частоты вращения двигателя?
10. Принцип создания гармонического испытательного сигнала для снятия частотных характеристик двигателя постоянного тока.
11. Понятие амплитудно-частотной характеристики для двигателя.
12. Понятие фазочастотной характеристики для двигателя.
13. Определение полосы пропускания устройства.
14. С какой целью снимаются частотные характеристики?

Приложение

Технические данные исследуемого двигателя

Тип двигателя	Мощность	Напряжение питания на обм. якоря	Частота вращения		КПД	Сопротивление обмотки при 15 <sup>0</sup> С			Индуктивн. цепи якоря	Момент инерции
			но-мин.	максим.		яко-ря	добав. полюсов	возбуждения		
	кВт	В	об/мин.		%	Ом			Гн	кг·м <sup>2</sup> (Н·м·с <sup>2</sup> /рад)
	$P_{ном.}$	$U_{аном}$	$n_{ном.}$	$n_{max}$	$\eta_{ном}$	$R_a$	$R_{доб.}$	$R_f$	$L_a$	$J$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
ПН90 Мухл4	0,25	220	1120	2000	57,0	15,47	11,20	610 162	297	0,004
2ПН90 Мухл4	0,37	220	1500	2250	61,5	10,61	6,66	610 162	190	0,004
2ПН90 Мухл4	0,71	220	2360	3540	70,0	3,99	2,55	470 123	79	0,004
2Мухл4 ПН90	1,00	220	3000	4000	72,5	2,52	1,47	365 92	48	0,004
2ПН112 Лухл4	1,25	220	1000	3500	68,0	2,34	2,040	202 52	34,0	0,018
2ПН112 Мухл4	1,50	220	1500	4000	70,0	1,770	1,550	181 44	19,5	0,015
2ПБ112 Лухл4	1,50	220	2240	4000	80,0	0,740	0,740	303 80	12,0	0,018
2ПБ112 Лухл4	2,00	220	3150	4000	81,0	0,413	0,411	303 80	7,1	0,018
2ПН100 Лухл4	2,20	220	3150	4000	81,0	0,52	0,510	295 81	21,0	0,012
2ПН112 Лухл4	2,20	220	1500	4000	75,0	0,968	0,848	168 44	14,0	0,018
2ПН112 Мухл4	2,50	220	2200	4000	76,0	0,788	0,682	156 39,4	9,3	0,015
2ПН112 Лухл4	3,40	220	2200	4000	78,0	0,413	0,411	125 33,5	6,2	0,018
2ПН112 Мухл4	3,60	220	3000	4000	79,0	0,420	0,356	129 33,6	4,8	0,015
2ПН132 Мухл4	4,0	220	1500	4000	79,0	0,564	0,336	134 35	11,0	0,038
2ПБ132 Мухл4	4,50	220	3150	4000	81,5	0,185	0,148	202 54,5	4,2	0,038
2ПН112 Лухл4	5,30	220	3000	4000	80,0	0,242	0,195	96,3 25,3	3,5	0,018
2ПН132 Лухл4	5,5	220	1500	4000	80,5	0,322	0,270	101 27,8	7,0	0,048
2ПН132 Мухл4	7,0	220	2240	4000	83,0	0,226	0,166	111 25,6	4,6	0,038

Окончание приложения 2										
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
2ПН132 Лухл4	8,5	220	2200	4000	84,0	0,167	0,124	89 25	3,5	0,048
2ПН132 Мухл4	10,5	220	3000	4000	84,0	0,140	0,094	111 25,6	2,8	0,038
2ПФ160 Лухл4	11,0	220	1500	4200	84,5	0,096	0,073	49,4 13,4	3,1	0,10
2ПФ160 Мухл4	13,0	220	2240	4000	87,0	0,081	0,056	82 21,9	2,2	0,083
2ПН132 Лухл4	14,0	220	3150	4000	86,0	0,080	0,066	76 20,6	1,8	0,048
2ПФ160 Мухл4	16,0	220	3150	4000	87,0	0,037	0,024	53,1 12,6	0,99	0,083
2ПФ160 Лухл4	16,0	220	2360	4000	87,0	0,044	0,031	49,4 13,4	1,4	0,10
2ПФ160 Лухл4	18,5	220	3150	4000	87,5	0,024	0,017	49,4 13,4	0,78	0,10

### **Список рекомендуемой литературы**

1. Кузовкин В.А. Моделирование процессов в электрических цепях / В.А. Кузовкин, В.В. Филатов.- М.: Изд-во "Станкин," 2006.-212с.
2. Кузовкин В.А. Электротехника и электроника: учебник для бакалавров / В.А. Кузовкин, В.В. Филатов.- М.: Юрайт, 2013. - 431с.- (Серия: Бакалавр. Углублённый курс).
3. Кузовкин В.А., Филатов В.В., Чумаева М.В. Практическая электротехника. Основные принципы описания и моделирования электрических устройств: учебное пособие / В.А. Кузовкин, В.В. Филатов, М.В. Чумаева - Старый Оскол: ТНТ, 2016. - 372с.
4. Кацман М.М. Справочник по электрическим машинам.: Учеб. пособие для студентов.- М.: Академия, 2005.- 480с.