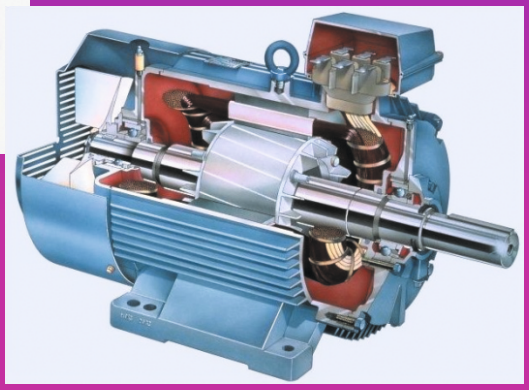
Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина
Уральский энергетический институт

Н. Н. НОВИКОВ

ВИРТУАЛЬНАЯ ЛАБОРАТОРИЯ ПО ИСПЫТАНИЯМ ТРАНСФОРМАТОРОВ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Практикум



Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

Н. Н. Новиков

ВИРТУАЛЬНАЯ ЛАБОРАТОРИЯ ПО ИСПЫТАНИЯМ ТРАНСФОРМАТОРОВ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Практикум

Рекомендовано методическим советом
Уральского федерального университета
для студентов вуза, обучающихся по направлению подготовки
13.03.02 — Электроэнергетика и электротехника

Екатеринбург
Издательство Уральского университета
2022

УДК 621.314(075.8)
ББК 31.261я73
Н73

Рецензенты:

кафедра энергетики и транспорта Российского государственного профессионально-педагогического университета (завкафедрой, канд. пед. наук, доц. *А. О. Прокубовская*);

канд. техн. наук, доц. *С. В. Федорова*, завкафедрой энергетики Технического университета УГМК

Научный редактор — д-р техн. наук, проф. *И. В. Черных*

Иллюстрации для оформления обложки взяты с открытых источников: https://5watt.ua/blog/stati/pochemu-transformator-gudit-pri-rabote; https://ies-drives.ru/news/4556/.

Новиков, Николай Николаевич.

Н73 Виртуальная лаборатория по испытаниям трансформаторов и электрических машин : практикум / Н. Н. Новиков ; М-во науки и высшего образования РФ. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2022. — 127, [1] с.

ISBN 978-5-7996-3602-9

Практикум содержит краткие теоретические сведения и методические указания по выполнению лабораторных работ (виртуальная лаборатория) студентами Уральского федерального университета в рамках изучения дисциплины «Электрические машины».

Книга рекомендуется для студентов, обучающихся по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника».

УДК 621.314(075.8)
ББК 31.261я73

ISBN 978-5-7996-3602-9

© Уральский федеральный университет, 2022

Предисловие

Виртуальная лаборатория по дисциплине «Электрические машины» создается как дополнительная форма обучения наряду с традиционной формой на базе физической лаборатории в связи с необходимостью перехода на дистанционный режим обучения по форс-мажорным обстоятельствам. Она включает описание и методические указания по удаленному выполнению восьми лабораторных работ в соответствии с учебным планом подготовки бакалавров по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника». В качестве базовой среды удаленного общения используется «Microsoft Teams».

Лабораторные работы выполняются в составе отдельных подгрупп с использованием доступных социальных форм коммуникаций. Состав подгрупп формируется из трех-пяти студентов и остается неизменным на весь период проведения лабораторных работ. Лабораторная работа завершается единым отчетом от всей подгруппы.

Отчет по выполненной лабораторной работе предоставляется до следующей лабораторной работы от ответственного за этот отчет. Фамилию ответственного за оформление сообщают в часы проведения лабораторных работ по расписанию. Следующий отчет оформляется очередным членом подгруппы.

Лабораторные работы реализованы в пакетах MATLAB, Simulink, Simscape. В практикуме используются версии MATLAB 2018b-2020 и Simulink 9.2–10.0. Специализированные блоки взяты из библиотеки Simscape Electritcal соответствующих версий Simulink [1; 2].

В отладке лабораторных работ в 2020 году принимали участие студенты третьего курса кафедры «Автоматизированные электрические системы» Уральского федерального университета М. Шакиров, В. Биргалин, В. Куликова, Д. Рыженко, Е. Филиппенко и Н. Вакорин.

Основные вопросы теории электрических машин изложены в учебном пособии [3]. Для подготовки к лабораторным работам и проверки знаний можно воспользоваться контрольными вопросами [8], прил. 1–4.

Лабораторная работа № 1
Исследование трехфазного двухобмоточного трансформатора

Цель работы — ознакомление с методикой определения параметров схемы замещения по паспортным данным и по данным испытания трансформатора в режимах холостого хода и короткого замыкания. Снятие и расчет основных эксплуатационных характеристик трансформатора.

1. Программа работы и рекомендации по ее выполнению

1. При подготовке к данной работе необходимо до начала выполнения провести исследования по данным, приведенным в табл. 1.1. Трансформаторы — трехфазные двухобмоточные масляные. Линейное напряжение обмотки ВН — 10 кВ, обмотки НН — 0,4 кВ. Схема соединений обмоток ВН/НН — «треугольник/звезда» с нулевым проводом.

Таблица 1.1

Исходные данные силовых трансформаторов

№ п/п	Тип трансформатора	$S_н$, кВА	U_k, %	P_k, кВт	P_0, кВт	I_0, %
1	ТМ-63/10	63	4,5	1,28	0,22	2,80
2	ТМ-100/10	100	4,5	1,97	0,31	2,60
3	ТМ-160/10	160	4,5	2,65	0,50	2,40
4	ТМ-250/10	250	4,5	3,70	0,66	2,30
5	ТМ-400/10	400	4,5	5,50	1,15	2,10

Окончание табл. 1.1

№ п/п	Тип трансформатора	$S_н$, кВА	U_k, %	P_k, кВт	P_0, кВт	I_0, %
6	ТМ-560/10	560	5,5	6,50	1,25	2,05
7	ТМ-630/10	630	5,5	7,10	1,47	2,00
8	ТМ-1000/10	1000	5,5	12,00	2,10	1,50
9	ТМ-1600/10	1600	5,5	16,50	3,00	1,30
10	ТМ-2500/10	2500	5,5	24,00	4,35	1,10

Для лучшего понимания виртуального подхода к проведению лабораторных работ ниже будут приводиться некоторые сведения из работ в физической лаборатории на натуральных объектах исследования.

Принципиальная схема физической установки для проведения опытов холостого хода и короткого замыкания силового трехфазного трансформатора, соединенного по схеме «звезда/звезда», показана на рис. 1.1 и рис. 1.2 [4]. В качестве источника переменного регулируемого напряжения в ней используется индукционный регулятор (ИР) на базе асинхронной машины с фазным ротором.

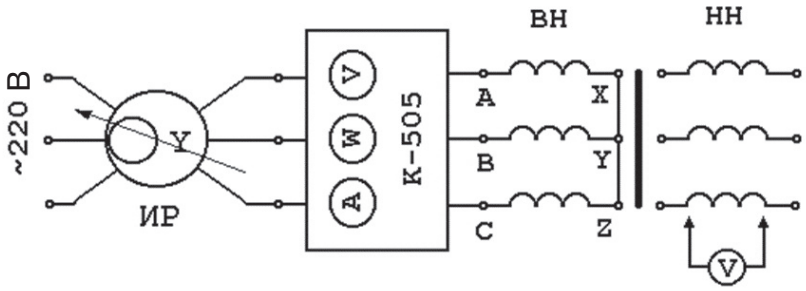


Рис. 1.1. Принципиальная схема опыта холостого хода трансформатора

Виртуальный трехфазный трансформатор состоит из трех одинаковых однофазных трансформаторов равной мощности. Поэтому испытания достаточно провести для одного однофазного трансформатора и распространить результаты испытаний на трехфазный трансформатор. При таком подходе следует считать трансформатор симметричным устройством, в том числе и его магнитную систему. На самом деле

большинство силовых трансформаторов имеет в качестве сердечника трехстержневой магнитопровод со связанными стержнями. В таком сердечнике фаза обмотки, расположенная на среднем стержне, имеет индуктивное сопротивление больше, чем на других фазах. Это приводит к несимметрии намагничивающих токов по фазам и потребляемой активной мощности на холостом ходу.

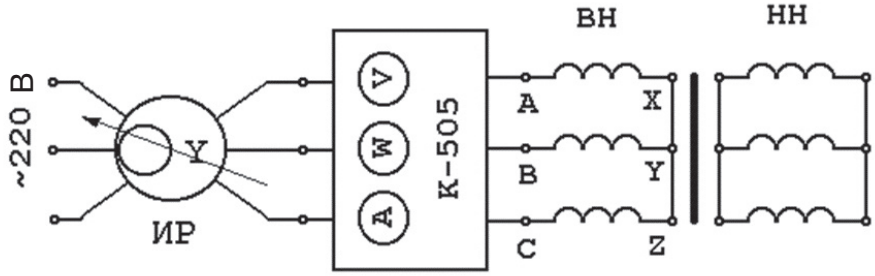


Рис. 1.2. Принципиальная схема опыта короткого замыкания трансформатора

2. Собрать имитационную модель однофазного трансформатора с необходимыми элементами управления и сбора информации на базе MATLAB. При выборе модели остановиться на линейной модели трансформатора *Linear Transformer* (рис. 1.3). В такой модели не учитывается нелинейность магнитной характеристики, вызванной явлением насыщения электротехнической стали и гистерезисным эффектом. Это допущение оправдано при анализе рабочих установившихся режимов, когда насыщение магнитопровода относительно незначительно и сказывается только на величине намагничивающего тока, которая весьма мала и составляет всего несколько процентов.

3. Рассчитать параметры схемы замещения трансформатора как в относительных (о. е.), так и в физических (ф. е.) единицах. Следует иметь в виду, что мощность на одну фазу определяется как одна треть полной мощности трехфазного трансформатора. Это относится также к потерям короткого замыкания и холостого хода, которые нужно поделить на три. Напряжение обмоток ВН и НН нужно в зависимости от схемы соединений перевести от линейных значений к фазным. Параметры электромагнитной схемы трансформатора (рис. 1.4), которые используются в качестве исходной информации для окна настройки модели, рассчитываются в такой последовательности:

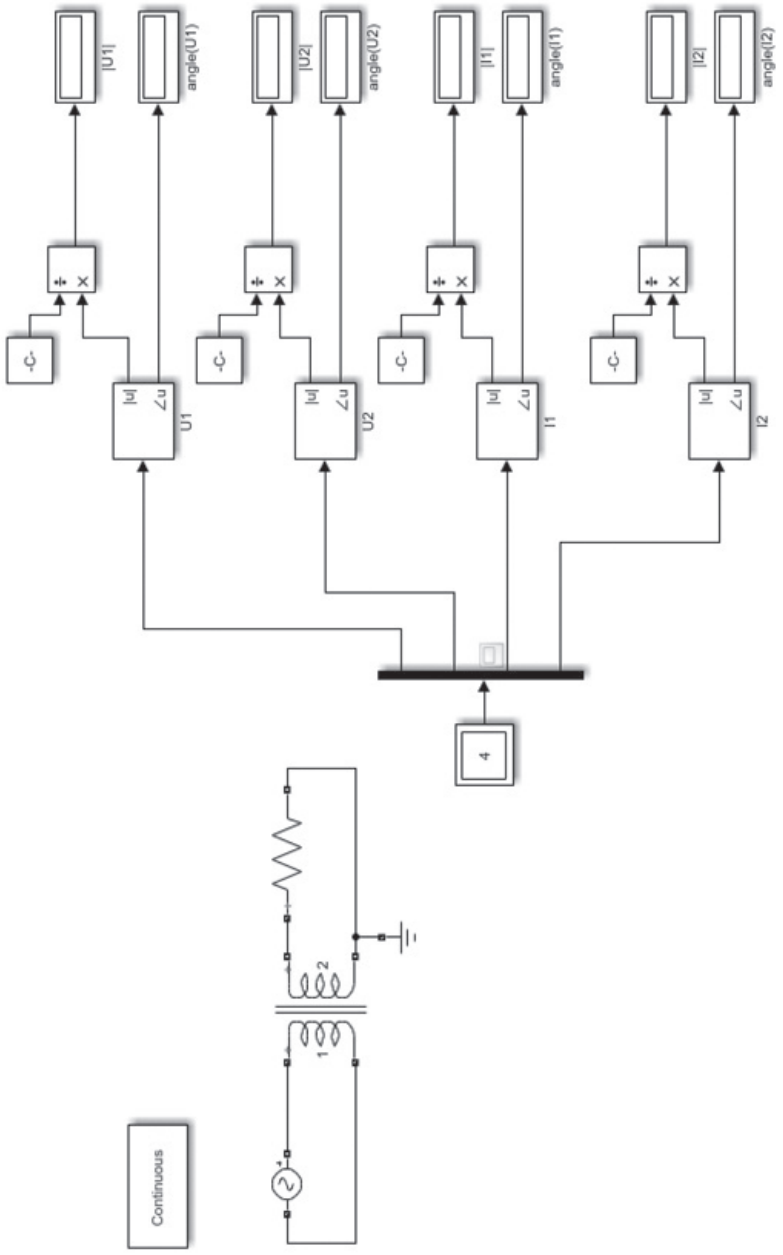


Рис. 1.3. Схема имитационной модели однофазного трансформатора (*Linear Transformer*)

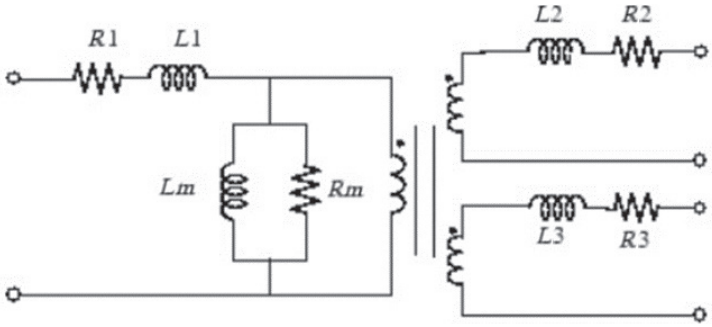


Рис. 1.4. Электромагнитная схема модели трансформатора

◆ Сначала рассчитываются в ф. е. параметры Т-образной схемы замещения по исходным данным однофазного трансформатора:

$R_к = \dfrac{P_{кф}}{I_{1ф}^2}$ — активное сопротивление короткого замыкания (КЗ) схемы замещения;

$R_1 = \dfrac{R_к}{2}$ — активное сопротивление первичной обмотки;

$R_{21} = \dfrac{R_к}{2}$ — активное сопротивление приведенной вторичной обмотки;

$Z_к = \dfrac{U_{кф}}{I_{1ф}}$ — полное сопротивление КЗ схемы замещения;

$X_к = \sqrt{\left(Z_к^2 - R_к^2\right)}$ — индуктивное сопротивление КЗ схемы замещения;

$X_1 = \dfrac{X_к}{2}$ — индуктивное сопротивление рассеяния первичной обмотки;

$L_1 = \dfrac{X_1}{314}$ — индуктивность рассеяния первичной обмотки;

$X_{21} = \dfrac{X_к}{2}$ — индуктивное сопротивление рассеяния приведенной вторичной обмотки;

$R_m = \dfrac{P_{оф}}{I_{оф}^2}$ активное сопротивление намагничивающего контура;

$Z_m = \dfrac{U_{1ф}}{I_{0ф}}$ — полное сопротивление намагничивающего контура;

$X_m = \sqrt{\left(Z_m^2 - R_m^2\right)}$ — индуктивное сопротивление намагничивающего контура;

$L_m = \dfrac{X_m}{314}$ — индуктивность намагничивающего контура.

Так как параметры X_m и R_m в Т-образной схеме замещения соединены последовательно, то для перехода к параллельному соединению в электромагнитной схеме используем соотношения для электрической проводимости

$$Y_m = \frac{1}{R_m + jX_m},$$

тогда

$$R_{m1} = \frac{1}{Real\left(Y_m\right)},$$

$$L_{m1} = \frac{1}{Im\left(Y_m\right)}.$$

◆ Затем определяются реальные параметры неприведенной вторичной обмотки, связанные с коэффициентом трансформации.

$k_{тр} = \dfrac{U_{1ф}}{U_{2ф}}$ — коэффициент трансформации;

$R_2 = \dfrac{R_{21}}{k_{тр}^2}$ — активное сопротивление вторичной обмотки;

$X_2 = \dfrac{X_{21}}{k_{тр}^2}$ — индуктивное сопротивление рассеяния вторичной обмотки;

$L_2 = \dfrac{X_2}{314}$ – индуктивность рассеяния вторичной обмотки.

◆ Для оценки правильности расчета параметров рекомендуется рассчитать параметры схемы замещения в относительных единицах и сопоставить их с рекомендуемым диапазоном их изменения для силовых трансформаторов:

$Z_б = \dfrac{U_{1ф}}{I_{1ф}}$ – базисное сопротивление;

$R_{1oe} = \dfrac{R_1}{Z_б}$; $\{0,001\ldots0,015\}$;

$R_{21oe} = \dfrac{R_{21}}{Z_б}$; $\{0,001\ldots0,015\}$;

$X_{1oe} = \dfrac{X_1}{Z_б}$; $\{0,02\ldots0,06\}$;

$X_{21oe} = \dfrac{X_{21}}{Z_б}$; $\{0,02\ldots0,06\}$;

$R_{moe} = \dfrac{R_m}{Z_б}$; $\{2\ldots10\}$;

$X_{moe} = \dfrac{X_m}{Z_б}$; $\{30\ldots200\}$.

Результаты расчетов параметров представить в форме четырех таблиц: «Исходные данные однофазного трансформатора», «Параметры схемы замещения в ф. е.», «Параметры электромагнитной схемы в ф. е.», «Параметры схемы замещения в о. е.». Пример расчета параметров для трансформатора ТМ-63/10 приведен в прил. 4. Ввести исходную информацию в модель трансформатора.

4. Провести опыт холостого хода. Изменяя напряжение первичной обмотки от нуля до 1,2 $U_н$ с шагом 0,2, измерить ток, активную мощность и коэффициент мощности. Построить зависимости этих величин от напряжения и определить их для точки номинального напряжения. Сопоставить ток и потери холостого хода с паспортными данными. Определить погрешность в процентах.

5. Провести опыт короткого замыкания. Изменяя напряжение первичной обмотки от нуля до 1,2 $U_к$ с шагом 0,2, измерить ток, активную мощность и коэффициент мощности. Построить зависимости этих величин от напряжения и определить их для номинального напряжения. Сопоставить ток и потери короткого замыкания с паспортными данными. Определить погрешность в процентах.

6. Снять внешние и рабочие характеристики при номинальном напряжении сети, нагружая вторичную обмотку активным сопротивле-

нием. Величину активного сопротивления следует изменять от максимально возможной, соответствующей близкому к режиму холостого хода, и до такого значения, когда ток становится равным или чуть больше номинального.

7. Рассчитать внешнюю характеристику $U_{2л} = f(I_{2л})$ для трехфазного трансформатора в физических единицах. Постройте ее график и определите в процентах изменение напряжения при номинальном токе.

8. Рассчитать рабочие характеристики КПД, cosφ, $I_{1л}$, $P_1 = f(P_2)$ для трехфазного трансформатора в физических единицах. Постройте в одних координатных осях эти зависимости. Определите их номинальные значения, а также максимальный КПД и соответствующую ему нагрузку. Сравните с оптимальным коэффициентом нагрузки, определяемым соотношением потерь холостого хода и короткого замыкания.

2. Процедура проведения опытов

1. Задать параметры трансформаторов в окнах настроек

Окна настроек для каждого из блоков приведены ниже. На рисунке 2.1 отображено окно настроек параметров конфигурации однофазного линейного трансформатора *Linear Transformer*. Параметры трансформатора могут задаваться либо в относительных единицах, либо в физических. В лабораторной работе рассматривается двухобмоточный трансформатор, поэтому убираем галочку перед третьей обмоткой *Three windings transformer*, и тогда останется две обмотки.

В полях окна настройки последовательно задаются следующие параметры:

В первой строке *Nominal power and frequency* указывается полная мощность трансформатора в вольт-амперах и частота в герцах.

Примечание: полная мощность обычно обозначается буквой *S*, однако в поле окна она обозначается через *P*, это следует помнить и не путать полную мощность с активной.

В следующей строке *Winding 1 parameters* задается действующее фазное напряжение первичной обмотки в вольтах, активное сопротивление в омах и индуктивность рассеяния первичной обмотки в генри.

В третьей строке *Winding 2 parameters* вводятся действующее фазное напряжение и параметры вторичной обмотки.

В выпадающем меню поля *Measurements* задаются переменные состояния трансформатора, которые измеряются блоком *Multimeter*. Для того чтобы подключить мультиметр необходимо в графе *Measurements* выбрать *All voltages and currents*.

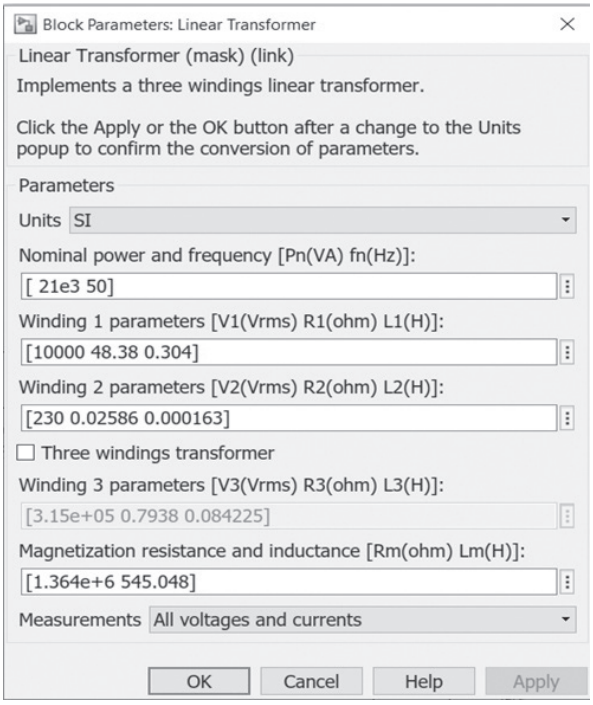


Рис. 2.1. Окно настроек параметров конфигурации однофазного линейного трансформатора *(Linear Transformer)*

На рисунке 2.2 приведено окно настроек источника напряжения *AC Voltage Source*. В первой строке записывается фазное амплитудное напряжение в вольтах *Peak amplitude*. Вторая строка задает начальную фазу напряжения, но так как трансформатор однофазный, фазу напряжения удобно принять равной нулю. В третьей строке указывается частота в герцах. Строка *Sample time* задает шаг расчета. По умолчанию это значение равно нулю. Это значит, что шаг расчета наследуется от блока *Powergui* — блока графического интерфейса пользователя (в данной работе необходимо лишь его наличие в схеме, его настройки не будут подвергаться каким-либо изменениям, а следовательно, отдельно блок не будет рассматриваться). Для проведения опытов его параметры следует оставить равными значениям по умолчанию.

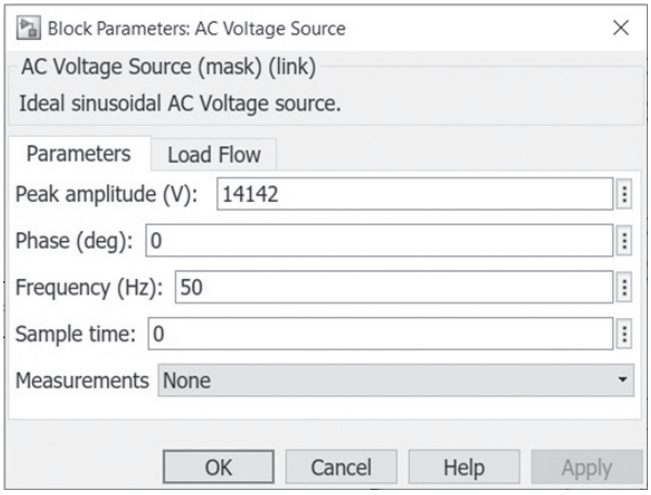


Рис. 2.2. Окно настроек параметров *AC Voltage Source*

Окно настроек параметров блока нагрузки *RLC Branch* отображены на рис. 2.3. В поле *Branch type* указывается только активная нагрузка *R*. В поле *Resistance* в омах задается значение активной нагрузки.

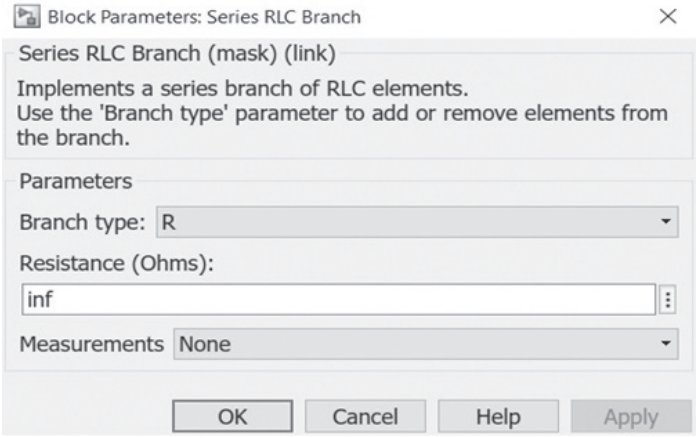


Рис. 2.3. Окно настроек параметров нагрузки *(RLC Branch)*

На рисунке 2.4 отображены параметры мультиметра *Multimeter*. Для измерения в мультиметре выбираем токи и напряжения первичной и вторичной обмотки.

На рисунке 2.5 отображены параметры блока *Fourier*. Блок позволяет раскладывать входящий в него периодический сигнал на два выходных значения (амплитуду и угол в градусах). В первой строке необ-

ходимо установить частоту равной частоте сети. Значения остальных строк выставить в соответствии с примером.

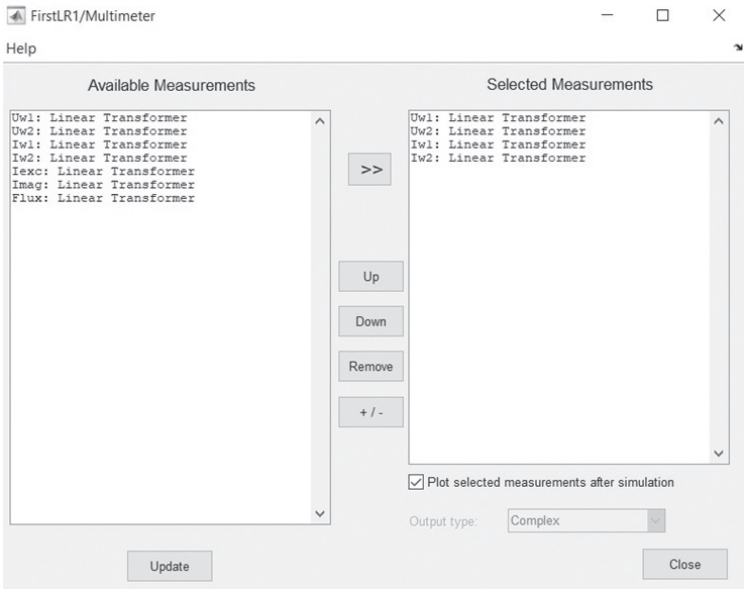


Рис. 2.4. Окно настроек параметров *Multimeter*

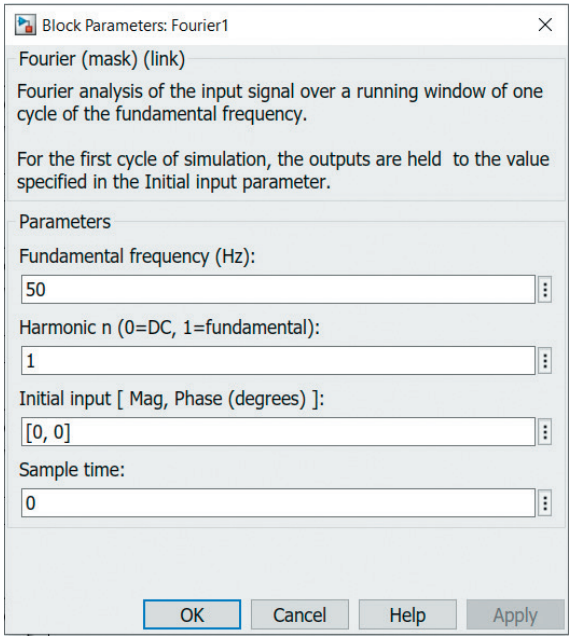


Рис. 2.5. Параметры блока *Fourier*

Блок *Demux* нужен, чтобы выводить все измеренные значения, а блок *Display* — выводить полученные значения.

2. Снять характеристики в режиме холостого хода

После задания параметров трансформатора убедитесь, что вторичная обмотка трансформатора разомкнута. Далее в блоке *AC Voltage Source* изменяйте напряжение в соответствие с п. 4 на с. 10 (напряжение указывается амплитудное, следовательно, убедитесь, чтобы действующее значение было умножено на $\sqrt{2}$) и снимайте показания с приборов на экране. Рассчитайте по известным формулам активную мощность и коэффициент мощности. И далее все согласно п. 4 с. 10.

3. Снять характеристики в режиме короткого замыкания

Замкните накоротко вторичную обмотку трансформатора. Далее в блоке *AC Voltage Source* изменяйте напряжение в соответствие с п. 5, с. 10 и снимайте показания с приборов на экране. Рассчитайте по известным формулам активную мощность и коэффициент мощности. И далее все согласно п. 5, с. 10.

4. Снять внешние и рабочие характеристики при номинальном напряжении сети

Выставьте в блоке *AC Voltage Source* номинальное напряжение сети. Далее подключите к вторичной обмотке трансформатора нагрузку — активное сопротивление. Для этого используйте блок *Series RLC Branch* (см. рис. 2.3). Подберите сопротивление согласно п. 6, с. 10–11, т.е. повышайте сопротивление таким образом, пока напряжение U_2 не будет изменяться в тысячных долях (и можно будет считать, что этот режим близок к режиму холостого хода). Понижая с подобранным шагом (на больших сопротивлениях параметры меняются незначительно, следовательно и шаг можно делать больше), каждый раз снимайте показания с приборов до момента, когда ток вторичной обмотки будет примерно равен номинальному.

5. Рассчитать внешние и рабочие характеристики при номинальном напряжении сети

С помощью параметров, полученных в п. 4, с. 15, рассчитать характеристики согласно п. 8, с. 11.

Отчет выполнить один на бригаду в соответствии с требованиями прил. 1. В нем привести общий вид трансформатора именно того типа и мощности, которые заданы вашей бригаде, и дать краткое описание конструкции.

Лабораторная работа № 2
Изучение схем и групп соединений обмоток трехфазного трансформатора

Цель работы — изучение особенностей работы трехфазного трансформатора при различных схемах соединения обмоток первичной и вторичной обмоток. Оценка влияния маркировки обмоток на группы соединений обмоток. Применение топографической векторной диаграммы для опытного определения группы соединений обмоток трансформатора.

1. Программа работы и рекомендации по ее выполнению

При подготовке к данной лабораторной работе необходимо следующее:

1. Провести исследование по данным, приведенным в табл. 1.1. Трансформаторы — трехфазные двухобмоточные масляные. Линейное напряжение обмотки ВН — 10 кВ, обмотки НН — в соответствии с коэффициентом трансформации $K_т$. Основная схема соединений обмоток — «треугольник/звезда» (Δ/Y).

Таблица 1.1

Исходные данные трехфазных трансформаторов

№ п/п	Тип трансформатора	$S_н$, кВА	U_k, %	P_k, кВт	P_0, кВт	I_0, %	$K_т = W_1/W_2$
1	ТМ-63/10	63	4,5	1,28	0,22	2,80	1,5
2	ТМ-100/10	100	4,5	1,97	0,31	2,60	2,0

Окончание табл. 1.1

№ п/п	Тип трансформатора	$S_н$, кВА	$U_к$, %	$P_к$, кВт	P_0, кВт	I_0, %	$K_т = W_1/W_2$
3	ТМ-160/10	160	4,5	2,65	0,50	2,40	2,5
4	ТМ-250/10	250	4,5	3,70	0,66	2,30	3,0
5	ТМ-400/10	400	4,5	5,50	1,15	2,10	3,5
6	ТМ-560/10	560	5,5	6,50	1,25	2,05	4,0
7	ТМ-630/10	630	5,5	7,10	1,47	2,00	4,5
8	ТМ-1000/10	1000	5,5	12,00	2,10	1,50	5,0
9	ТМ-1600/10	1600	5,5	16,50	3,00	1,30	5,5
10	ТМ-2500/10	2500	5,5	24,00	4,35	1,10	6,0

2. Собрать имитационную модель трехфазного трансформатора с необходимыми элементами управления и сбора информации на базе MATLAB. При выборе модели остановиться на линейной модели трансформатора *Tree-Phase Transformer* (*Two Windings*) (рис. 1.1). В модели не учитывается нелинейность магнитной характеристики.

3. Рассчитать параметры одной фазы схемы замещения трансформатора как в относительных (о. е.), так и в физических (ф. е.) единицах. Методика расчета приведена в лабораторной работе № 1.

Представить результаты расчетов параметров в форме четырех таблиц (табл. 1.2–1.5).

Таблица 1.2

Исходные данные одной фазы трехфазного трансформатора

$S_ф$, ВА	$P_{кф}$, Вт	$P_{оф}$, Вт	$U_{кф}$, %	$I_{оф}$, %	$U_{1ф}$, В	$U_{2ф}$, В	$I_{1ф}$, А	$I_{2ф}$, А	$I_{оф}$, А	$U_{кф}$, В

Таблица 1.3

Параметры схемы замещения, ф. е.

$R_к$, Ом	R_1, Ом	R_{21}, Ом	$Z_к$, Ом	$X_к$, Ом	X_1, Ом	X_{21}, Ом	R_m, Ом	Z_m, Ом	X_m, Ом

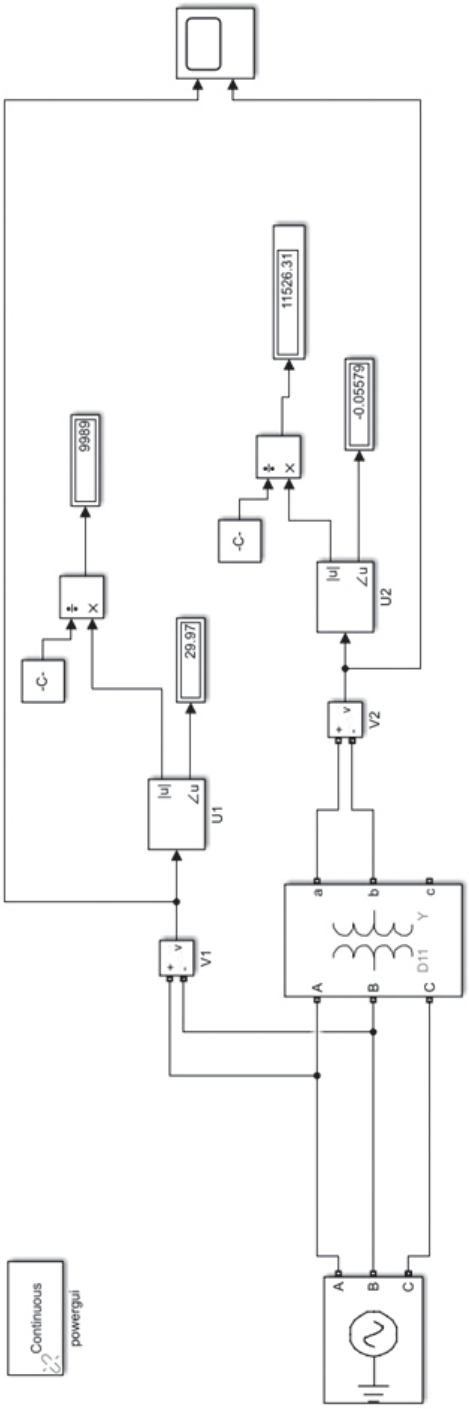


Рис. 1.1. Схема имитационной модели трехфазного трансформатора

Таблица 1.4

Параметры электромагнитной схемы замещения, ф. е.

$R_к$, Ом	R_1, Ом	R_2, Ом	$Z_к$, Ом	$X_к$, Ом	L_1, Гн	X_2, Ом	L_2, Гн
R_m, Ом	Z_m, Ом	X_m, Ом	L_m, Гн	$U_{1\,ф}$, В	$U_{2\,ф}$, В	$I_{1\,ф}$, А	$I_{2\,ф}$, А

Таблица 1.5

Параметры схемы замещения, о. е.

$Z_б$, Ом	R_1	R_{21}	X_1	X_{21}	R_m	X_m

4. Провести исследование режима работы трехфазного трансформатора на холостом ходу для одного варианта из девяти схем соединения обмоток (табл. 1.6) и шести из 18 вариантов маркировки (табл. 1.7, рис. 1.2).

Таблица 1.6

Варианты соединения обмоток

№ варианта	Схема обмоток	
	ВН	НН
1	Y	Y
2	Y	D11
3	Y	D1
4	D11	Y
5	D11	D11
6	D11	D1
7	D1	Y
8	D1	D11
9	D1	D1

Таблица 1.7

Исходные данные вариантов маркировки обмоток

№ варианта	Маркировка					
	ВН			НН		
	A	B	C	a	b	c
1	1	2	3	7	8	9
2	1	2	3	10	11	12
3	1	2	3	8	9	7
4	1	2	3	11	12	10
5	1	2	3	9	7	8
6	1	2	3	12	10	11
7	2	3	1	7	8	9
8	2	3	1	10	11	12
9	2	3	1	8	9	7
10	2	3	1	11	12	10
11	2	3	1	9	7	8
12	2	3	1	12	10	11
13	3	1	2	7	8	9
14	3	1	2	10	11	12
15	3	1	2	8	9	7
16	3	1	2	11	12	10
17	3	1	2	9	7	8
18	3	1	2	12	10	11

Записать режимные параметры для каждого варианта в табл. 1.8. Угол φ_A задается источником и соответствует фазовому углу фазы *A* источника, φ_1 рассчитывается на модели как фазовый угол сдвига линейного напряжения U_{AB} первичной стороны, угол φ_2 рассчитывается на модели как фазовый угол сдвига линейного напряжения U_{ab} вторичной стороны, угол $\alpha = \varphi_1 - \varphi_2$ и определяет группу соединения обмоток.

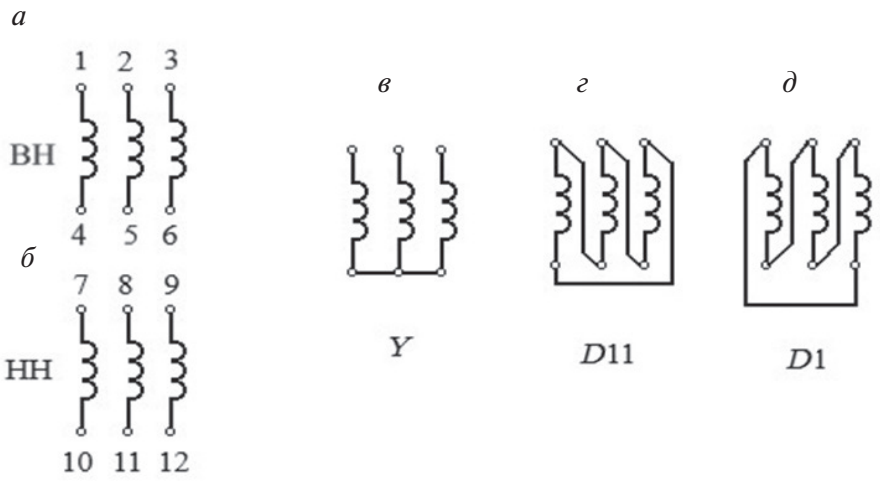


Рис. 1.2. Маркировка и схемы соединений обмоток:
а — маркировка обмотки ВН; *б* — маркировка обмотки НН;
в — схема «звезда»; *г* — схема «треугольник»;
д — схема «обратный треугольник»

Таблица 1.8

Результаты исследования трехфазного трансформатора

№ варианта	Измерения								
	U_A, В	φ_A, град	U_{AB}, В	φ_1, град	U_a, В	U_{ab}, В	φ_2, град	α, град	Группа соединений
1									
...									
6									

5. Построить топографические векторные диаграммы для каждого варианта с расчетом или измерением реперных точек диаграммы. Дополнить векторные диаграммы таблицей напряжения (табл. 1.9) с учетом выбранного масштаба. Определить группу соединений обмоток трехфазного трансформатора. Привести принципиальные электрические схемы соединения обмоток трехфазного трансформатора для каждого варианта с маркировкой зажимов

Таблица 1.9

Масштаб к построению топографических диаграмм

№ варианта	U_{AB}/l, В/мм	U_{ab}/l, В/мм	U_{Bb}/l, В/мм	U_{Cb}/l, В/мм	U_{Cc}/l, В/мм	U_{Bc}/l, В/мм	Группа соединений обмоток
1							
2							
...							
6							

Топографическая векторная диаграмма строится следующим образом [4]:

1) выбрать масштаб для напряжения таким, чтобы длина линейного вектора напряжения *l* обмотки ВН была не менее 50 мм;

2) построить в этом масштабе треугольник линейных напряжений обмотки ВН;

3) пристроить к этому треугольнику треугольник вторичных напряжений (рис. 1.3), потенциалы точек «*A*» и «*a*» искусственно совмещают, а положения точек «*b*» и «*c*» соответствуют величине искомых напряжений, определяемых засечкой при помощи циркуля в выбранном масштабе.

4) измерить угол между одноименными линейными напряжениями, отсчитываемыми от НН к ВН против часовой стрелки, и поделить его на 30 градусов, в результате получится число, определяющее номер группы соединения

Ниже приводится пример построения топографической векторной диаграммы для группы Y/Δ — 3 при $к_{тр} = W_1/W_2 = 2$.

Пусть:

напряжение сети: $U_{AB} = 380$ В;

фазные напряжение и ЭДС обмотки ВН: $U_A = E_A = 220$ В;

фазные напряжение и ЭДС обмотки НН: $Ua = Ea = E_A/к_{тр} = 220/2 =$ $= 110$ В.

В результате построения топографической векторной диаграммы

$U_{Bb} = 396{,}6$ В; $U_{Cb} = 291{,}1$ В; $U_{Cc} = 396{,}6$ В; $U_{Bc} = 479{,}5$ В.

Угол между линейными напряжениями составляет 90 градусов, а значит, топографическая диаграмма соответствует 3-й группе соединений обмоток.

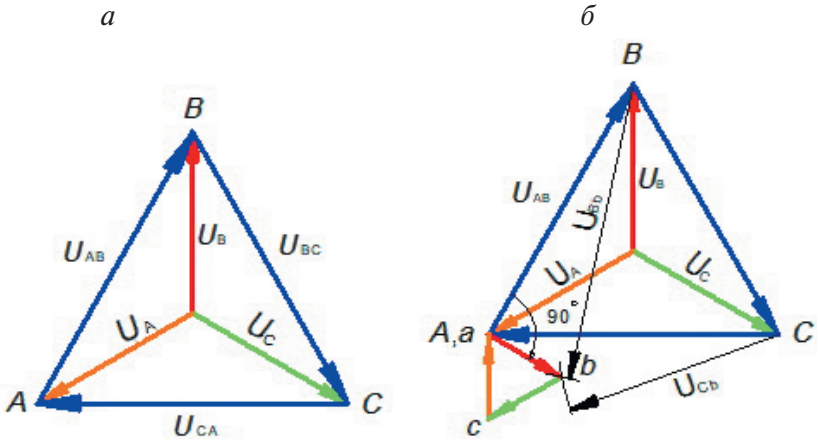


Рис. 1.3. Пример построения топографической векторной диаграммы:

а — треугольник линейных напряжений и звезда фазных напряжений обмотки ВН; *б* — топографическая диаграмма для группы Y/Δ — 3

2. Процедура проведения опытов

1. Задать параметры транформаторов

Окна настроек приведены ниже для каждого из блоков. На рисунке 2.1 представлено окно настроек конфигурации трехфазного двухобмоточного трансформатора *Three-Phase transformer (two windings)*. В первой строке *Winding 1 connection* (*ABC terminals*) выбираем вариант соединения первичной обмотки из табл. 1.6, с. 19. Аналогично и для второй строки *Winding 2 connection (abc terminals)* выбираем вариант соединения вторичной обмотки из табл. 1.6, с. 19. Тип выбираем такой, который показан на рис. 2.1, измерения (*measurements*) производятся по напряжениям на обмотке (*winding voltages*).

На рисунке 2.2 показано окно настроек параметров трансформатора. Сначала выбираем в каких единицах проводим измерения — это строка *units*.

В следующей строке указываем *Nominal power and frequency* указывается полная мощность трансформатора для одной фазы в вольт-амперах и частота в герцах. Примечание: полная мощность обычно обозначается буквой *S*, однако в поле окна она обозначается через *P*, это следует помнить и не путать полную мощность с активной.

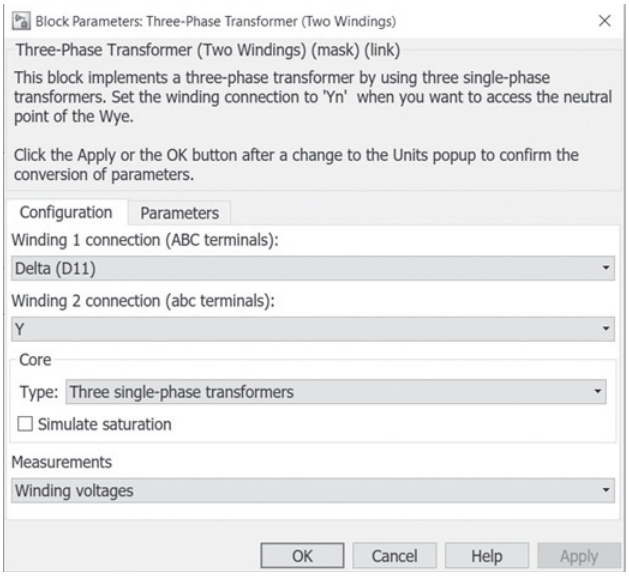


Рис. 2.1. Окно настроек конфигурации трехфазного двухобмоточного трансформатора *(Three-Phase transformer (Two Windings))*

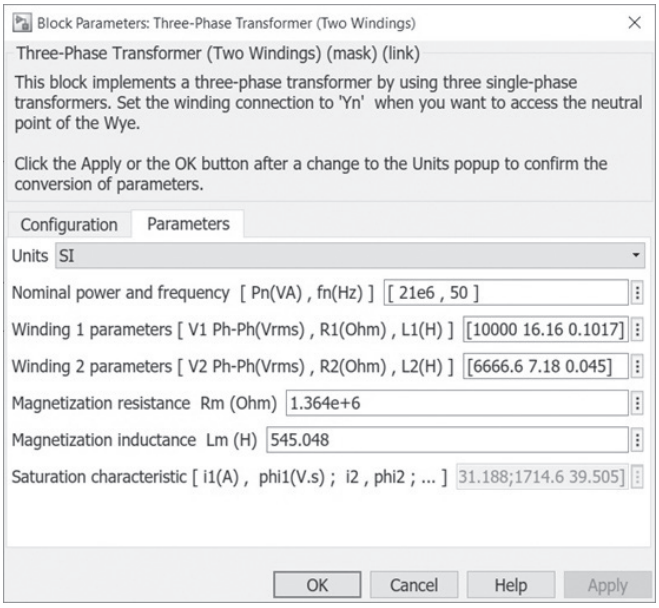


Рис. 2.2. Окно настроек параметров трехфазного двухобмоточного трансформатора *(Three-Phase transformer (Two Windings))*

В строке *Winding 1 parameters* задается линейное напряжение первичной обмотки в вольтах, активное сопротивление в омах и индуктивность рассеяния первичной обмотки в генри.

В строке *Winding 2 parameters* пишутся линейное напряжение вторичной обмотки в вольтах, активное сопротивление в омах и индуктивность рассеяния вторичной обмотки в генри.

В последующих двух строках указываются сопротивление намагничивания в омах, а также индуктивность намагничивания в генри.

В качестве примера выбран трансформатор ТМ-63/10 с Кт = 1,5

В данной лабораторной работе используется трехфазный источник питания (*three-phase source*). Его окно настроек параметров представлено на рис. 2.3.

В качестве конфигурации источника выбираем *Yg* — это означает, что три источника напряжения соединены по оси *Y* с внутренней заземленной нейтралью.

В первой строке *Phase-to-phase voltage* указываем линейное напряжение первичной обмотки в вольтах. Фазовый угол фазы *A* ставим 0 градусов, частоту выставляем 50 Гц.

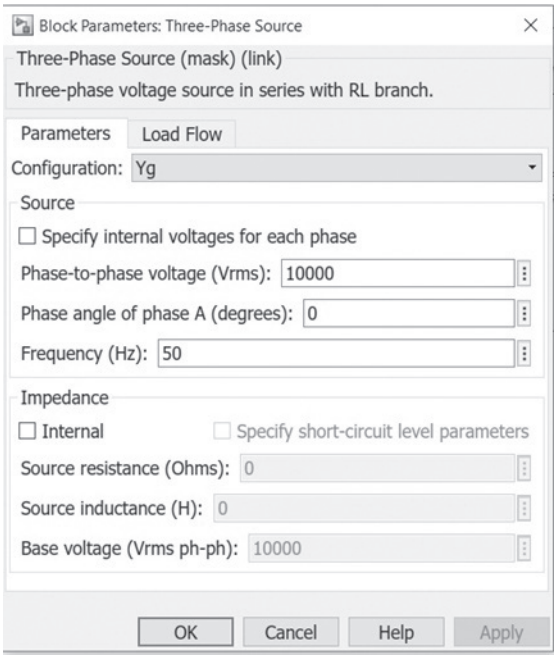


Рис. 2.3. Окно настроек параметров трехфазного источника питания *(Three-Phase source)*

На рисунке 2.4 отображены параметры блока *Fourier*. Блок позволяет раскладывать входящий в него периодический сигнал на два выходных значения (амплитуду и угол в градусах). В первой строке необходимо установить частоту равной частоте источника питания. Значения остальных строк выставить в соответствии с примером.

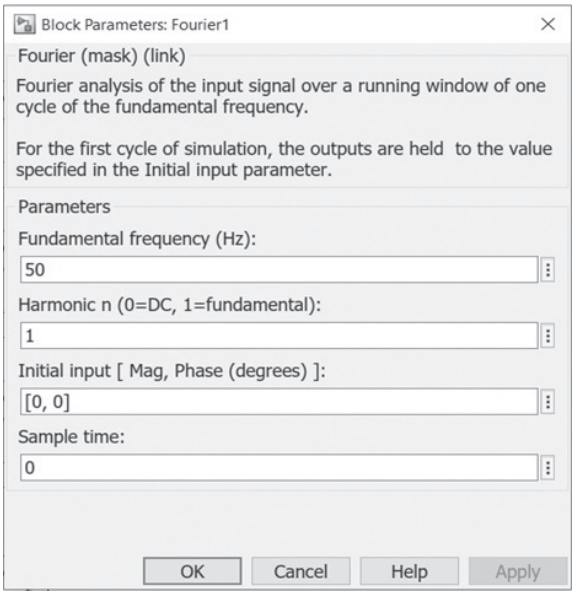


Рис. 2.4. Параметры блока *Fourier*

Так как *Fourier* выводит амплитудное значение, то используется блок деления и константы, чтобы получить действующее значение.

Powergui — блок графического интерфейса пользователя. В данной работе необходимо лишь его наличие в схеме. Его настройки не будут подвергаться каким-либо изменениям, а следовательно, отдельно блок не будет рассматриваться.

Display нужен для вывода полученных значений.

Scope — осциллограф, строит графики исследуемых сигналов в функции времени, позволяет наблюдать за изменениями сигналов в процессе моделирования.

2. Исследовать режим работы трехфазного трансформатора

У трансформатора выбираем соответствующее соединение обмоток из табл. 1.6, с. 19, выставляем ранее рассчитанные параметры, снимаем показания режима работы трансформатора на холостом ходу и резуль-

таты заносим в табл. 2.1. Значения напряжений U_A и U_a — это рассчитанные значения, значения U_{AB} и U_{ab} снимаются с дисплея. Проводим опыт с заданными вариантами схемы соединений и маркировки обмоток. По каждому из вариантов определяем группу соединения обмоток и строим топографические диаграммы. Результаты по топографическим диаграммам заносятся в табл. 2.2.

Опыты проведены на примере трансформатора ТМ-63/10. Полученные результаты представлены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Результаты исследования трехфазного трансформатора ТМ-63/10

№ варианта / схема маркировки	U_A, В	φ_A, град	U_{AB}, В	φ_1, град	U_a, В	U_{ab}, В	φ_2, град	α, град	Группа соед. обмоток
4/1	10000	0	9991	29,98	6666,7	11528,79	–0,04	30	D/Y-1

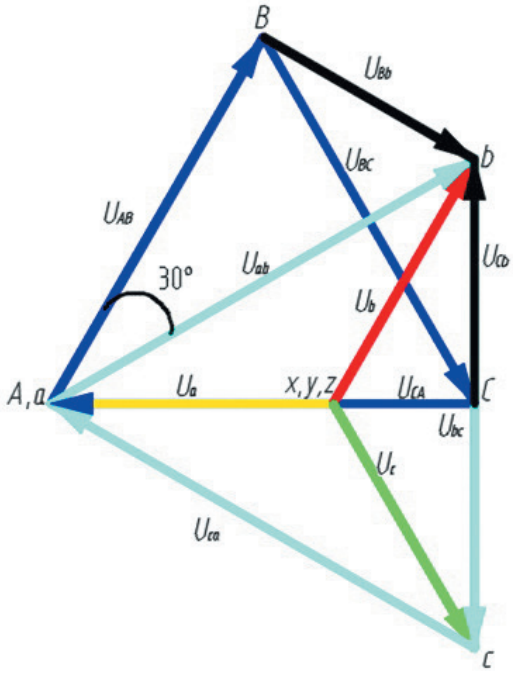


Рис. 2.5. Топографическая диаграмма для 1-го варианта (М:10000 В/50 мм)

Как видно из топографической диаграммы, угол между линейными напряжениями первичной и вторичной стороны, а именно U_{AB} и U_{ab}, равен 30 градусам.

Таблица 2.2

Пример для 1-го варианта

Схема / маркировка	U_{AB}/l, В/мм	U_{ab}/l, В/мм	U_{Bb}/l, В/мм	U_{Cb}/l, В/мм	U_{Cc}/l, В/мм	U_{Bc}/l, В/мм	Группа соединений обмоток
4/1	10 000/ 50	11 550/ 57	5 770/ 29	5 770/ 29	5 770/ 29	15 280/ 76	D/Y-1

На рисунке 2.6 представлены формы первичных и вторичных линейных напряжений, снятых с экрана дисплея, подтверждающих результаты анализа. Фазовый угол между напряжениями действительно составляет 30 градусов, что соответствует группе соединений обмоток D/Y-1.

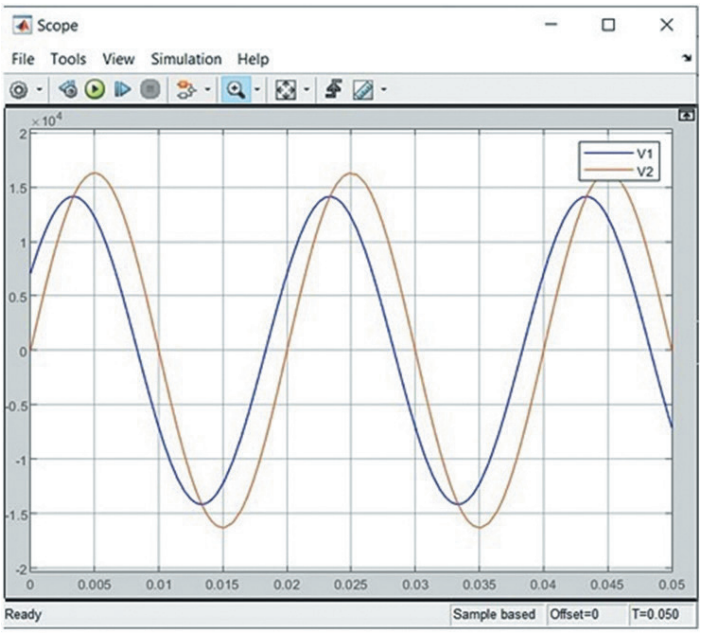


Рис. 2.6. График напряжений
для 1-го варианта соединения обмоток

Отчет выполнить один на бригаду в соответствии с требованиями прил. 1.

Лабораторная работа № 3
Исследование трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

Цель работы — изучение основных характеристик асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

1. Программа работы и рекомендации по ее выполнению

1. Провести исследование по данным, приведенным в табл. 1.1, в которой представлены асинхронные двигатели новой серии *RA* (российский асинхронный) Ярославского электромеханического завода. Линейное напряжение сети $U_л = 380$ В. Частота сети $f = 50$ Гц. Схема обмотки статора — «звезда».

Таблица 1.1

Исходные данные асинхронных двигателей

№ п/п	Тип двигателя	$P_н$, Вт	m, кг	$n_н$, об/мин	КПД, η %	cos φ	$I_н$, А	$I_п/I_н$ (k_I)	$M_п/M_н$ ($m_п$)	$M_{max}/M_н$ ($m_{макс}$)	J, кг · м^2
1	RA90S2	1500	13	2835	79	0,87	3	6,5	2,8	3	0,0010
2	RA90L4	1500	15,5	1420	78,5	0,80	4	5,5	2,3	2,8	0,0042
3	RAI00L6	1500	22	925	76	0,76	4	4,5	2	2,1	0,0063

Окончание табл. 1.1

№ п/п	Тип двигателя	$P_н$, Вт	m, кг	$n_н$, об/мин	КПД, η %	cos φ	$I_н$, А	$I_п/I_н$ (k_I)	$M_п/M_н$ ($m_п$)	$M_{max}/M_н$ ($m_{макс}$)	J, кг · м^2
4	RA90L2	2200	15	2820	82	0,87	4	6,5	2,9	3,4	0,0015
5	RAIOOLA4	2200	22	1420	79	0,82	5	6	2,2	2,6	0,0048
6	RA112M6	2200	36	960	78	0,74	5	5,5	1,9	2,5	0,0185
7	RAI00L2	3000	20	2895	83	0,86	6	7	2,4	2,6	0,0038
8	RAI00LB4	3000	24	1420	81	0,81	7	6,2	2,2	2,6	0,0058
9	RA132S6	3000	41	960	79	0,79	7	5,9	2,2	2,6	0,0252
10	RA112M2	4000	41	2895	84	0,87	9	6,8	2,2	3,3	0,0082
11	RA112M4	4000	37	1430	85,5	0,84	9	6,5	2,2	2,9	0,0103
12	RA132MA6	4000	50	960	80	0,80	9	6	2,2	2,6	0,0368

На рисунке 1.1 приведена принципиальная электрическая схема лабораторной физической установки для испытания асинхронного двигателя [5]. В состав физической установки входят индукционный регулятор (ИР), предназначенный для регулирования напряжения статора, и генератор постоянного тока (ГПТ), выполняющий роль механической нагрузки на валу двигателя. Так как напряжение сети равно 220 В, то обмотка статора соединена в «треугольник» в отличие от двигателя виртуальной лабораторной работы, где принята схема «звезда» при напряжении сети 380 В.

Физическая установка позволяет снять все характеристики, которые входят в программу виртуальной лаборатории. В то же время виртуальная лаборатория располагает более широкими возможностями

для глубокого исследования двигателя и визуализации как переходных, так и установившихся процессов.

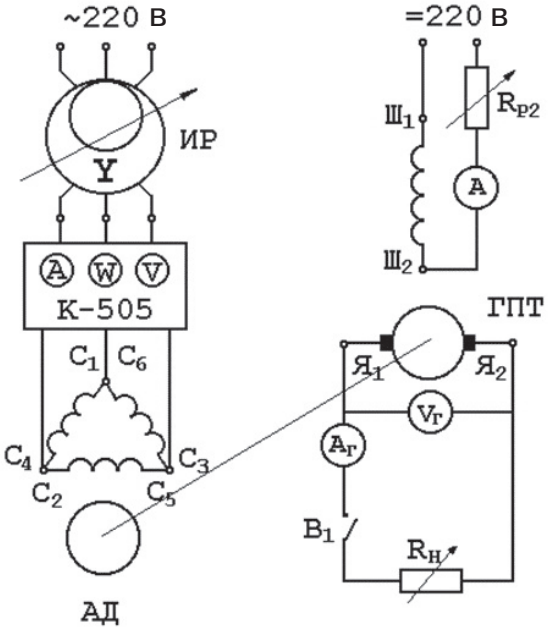


Рис. 1.1. Схема физической установки
для испытания асинхронного двигателя

2. Собрать имитационную модель трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором с необходимыми элементами управления и сбора информации на базе MATLAB. При выборе модели остановиться на модели двигателя *Asynchronous Machine* (рис. 1.2). В модели не учитываются потери в ферромагнитном сердечнике и добавочные потери, а также нелинейность магнитной характеристики.

3. Рассчитать параметры Г-образной схемы замещения (рис. 1.3, *б*) асинхронного двигателя при условии, что коэффициент *C* равен единице. Этот коэффициент появляется в параметрах ротора при переходе от Т-образной к Г-образной схеме. Обычно диапазон его изменения от 1,02 до 1,05, поэтому ошибка в определении параметров при таком допущении не превысит 5 %.

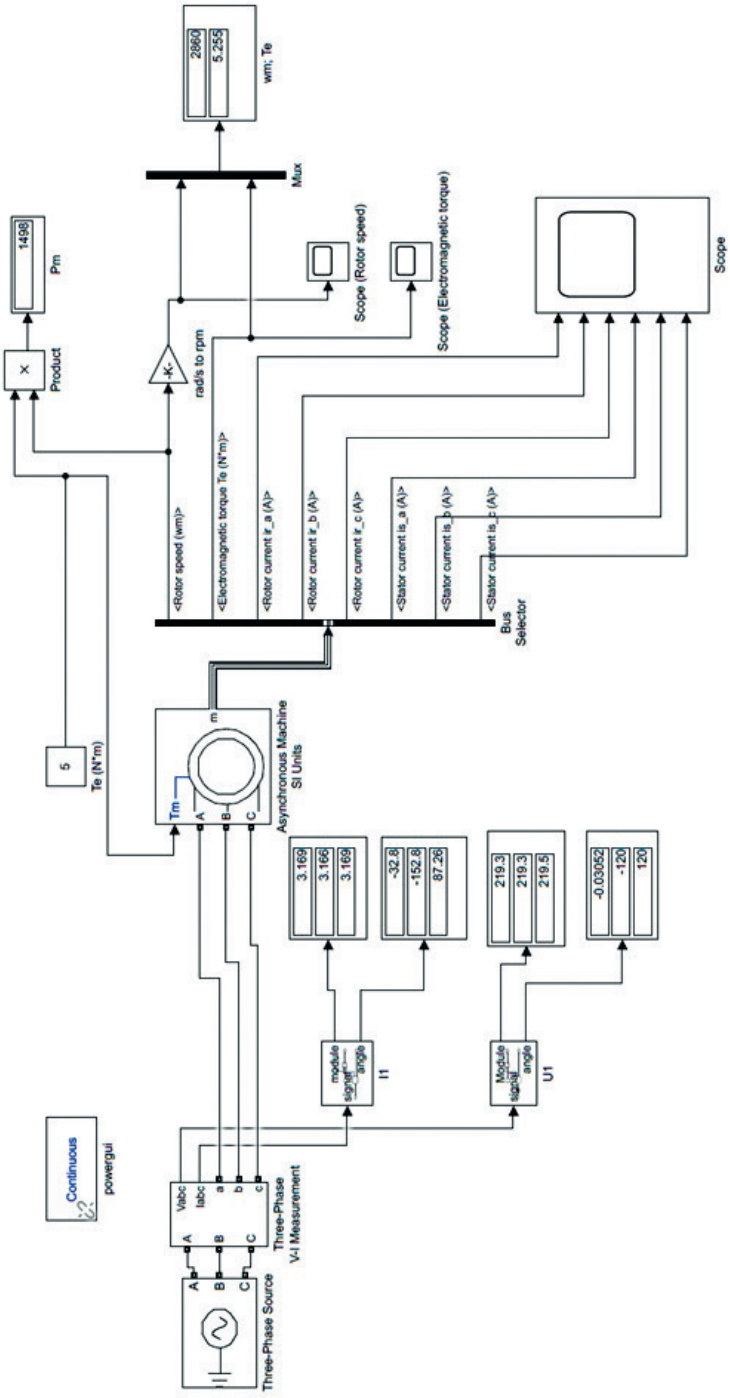


Рис. 1.2. Схема имитационной модели трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

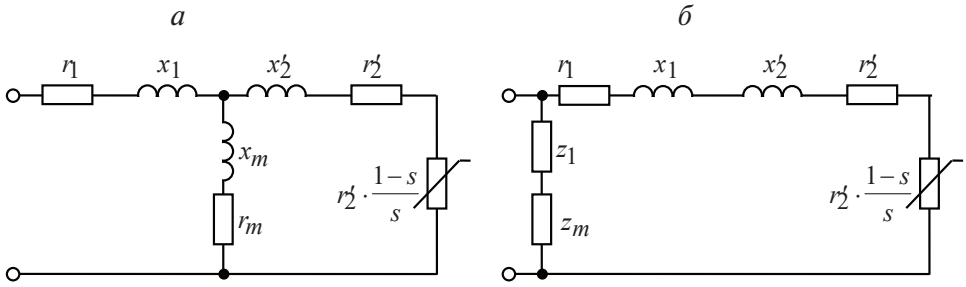


Рис. 1.3. Схемы замещения двигателя
а — Т-образная; *б* — Г-образная

По данным табл. 1.1, с. 29–30, определяются:

1) частота вращения магнитного поля, об/мин

$$n_1 = \frac{60f}{p},$$

где p — число пар полюсов;

2) величина номинального скольжения:

$$s_н = \frac{n_1 - n_н}{n_1};$$

3) номинальная угловая частота вращения ротора, рад/с:

$$\omega_н = \frac{\pi n_н}{30};$$

4) угловая частота вращения магнитного поля, рад/с:

$$\omega_1 = \frac{2\pi f}{p};$$

5) номинальный, максимальный и пусковой моменты, Нм:

$$M_н = \frac{P_н}{\omega_н};$$

$$M_{макс} = m_{максН} M_н;$$

$$M_п = m_{пН} M_н;$$

6) критическое скольжение:

$$s_{кр} = s_н (m_{макс} + \sqrt{m_{макс}^2 - 1});$$

7) механические потери (ориентировочно), Вт:

$$П_{мех} = 0{,}05\ Р_н;$$

8) приведенное активное сопротивление ротора, Ом:

$$r_2' = \frac{P_н + П_{мех}}{3\left(I_н^2 \frac{1 - s_н}{s_н}\right)};$$

9) активное сопротивление статора, Ом, принимаем

$$r_1 = r'_2;$$

10) приведенная индуктивность рассеяния ротора, Гм:

$$L_2' = \frac{U_ф}{4} \frac{1}{\pi f k_I I_н},$$

здесь $U_ф$ — фазное напряжение обмотки статора.

Для схемы «Y» $U_ф = U_л/1{,}73$;

11) индуктивность рассеяния статора, Гн, принимаем

$$L_1 = L'_2;$$

12) полная индуктивность статора, Гн:

$$L_{1m} = \frac{U_ф}{2\pi f I_н \sqrt{1 - \cos\varphi^2} - \frac{4\pi f M_{макс}}{3pU} \frac{s_н}{s_{кр}}}$$

13) индуктивность контура намагничивания, Гн:

$$L_m = L_{1m} — L_1:$$

14) активное сопротивление контура намагничивания:

$$R_m = 0,$$

т. к. потери в сердечнике не учитываются;

15) коэффициент $C = 1$, $C_1 = 1$;

16) коэффициент трения, Нм · с:

$$F = \frac{П_{мех}}{\left(\frac{2\pi n_н}{60}\right)^2}.$$

Представить результаты расчетов параметров в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Исходные расчетные данные двигателя

$M_н$, Нм	r_1, Ом	r'_2, Ом	L_1, Гн	L'_2, Гн	R_m, Ом

4. Провести настройку виртуальной модели и произвести пробный пуск двигателя на холостом ходу. Привести осциллограммы пускового тока статора и электромагнитного момента, оценить время пуска, максимальные величины электромагнитного момента и тока статора в начале пуска.

5. Снять пусковые и механическую характеристики асинхронного двигателя.

Они снимаются в физической лаборатории при изменении нагрузочного момента на валу двигателя обычно в диапазоне от нуля до 1,2 номинального момента двигателя с шагом $0{,}1M_н$. Однако на цифровой модели не удается их снять, так как после подключения напряжения сети происходит быстрый пуск и зарегистрировать установившееся значение частоты вращения ротора невозможно. Поэтому снятие на цифровой модели производится следующим способом. Сначала увеличивают инерционную постоянную ротора J на три — шесть порядков больше реальной. Ротор становится настолько «тяжелым», что его частота вращения практически не будет изменяться. Затем задается скольжение в диапазоне от 1 до 0 с шагом 0,1 и измеряются частота вращения, момент и действующее значение тока статора.

Результаты свести в табл. 1.3, построить механическую характеристику $n = f(\text{М})$ и в одних осях графики пусковых характеристик $M = f(s)$ и $I = f(s)$.

Привести осциллограммы частоты вращения, момента, токов статора и ротора (для тока статора можно значение одной из фаз) при $s = 1$; 0,5 и 0. Обратить внимание на изменения частоты тока в роторе и скорость затухания электромагнитных процессов при различных скольжениях и дать физическое обоснование этому изменению.

Таблица 1.3

Результаты снятия механической и пусковых характеристик

№ опыта	*S*, о. е.	*M*, Нм	*n*, об/мин	*I*, А
1	1			
2	0,9			
3	0,8			
...	...	...	...	...
11	0			

6. Снять зависимость скольжения от величины напряжения сети при постоянном номинальном моменте нагрузки. Напряжение сети изменять от номинального до такого значения, при котором двигатель опрокинется (остановится). Запуск двигателя осуществлять на холостом ходу и только потом нагружать номинальным моментом. Не забудьте восстановить паспортную величину инерционной постоянной ротора, измененную в п. 5, с. 35. Заполнить табл. 1.4 результатами исследования и построить график изменения скольжения.

Таблица 1.4

Зависимость скольжения от напряжения

№ опыта	*U*, В	*n*, об/мин	*S*, о. е.
1	380		
2	360		
3	340		
...	...		

7. Снять рабочие характеристики двигателя при изменении нагрузочного момента в пределах от 0 до 1,2 номинального момента с шагом 0,2 $M_н$. Напряжение сети должно быть номинальным и равным 380 В. Заполнить табл. 1.5 результатами исследования и провести соответствующие расчеты.

Таблица 1.5

Рабочие характеристики двигателя

М, Нм	Измерения					Вычисления						
	$I_{ф1}$, А	φ_I, град	$U_{ф1}$, В	φ_U, град	n, об/мин	φ, град	cos φ	P_1, Вт	Q_1, ВАр	P_2, Вт	η, %	s, %

Вычисления производятся по выражениям:

$$\varphi = \varphi_U - \varphi_I;$$

m =3 (число фаз);

$$P_1 = mI_{ф1}U_{ф1}\cos\varphi;$$

$$Q_1 = mI_{ф1}U_{ф1}\sin\varphi;$$

$$P_2 = M\frac{2\pi n}{60};\ \ \eta = \frac{P_2}{P_1};\ \ s = \frac{n_1 - n}{n_1}.$$

Рабочие характеристики P_1, I_1, n, cos φ, η, $s = f(P_2)$ строятся в единых координатных осях. На графике надо указать номинальный режим при $P_2 = P_н$, то есть какие значения будут у рабочих характеристик при номинальном режиме. Заполнить табл. 1.6 номинальными данными (P_1, I_1, n, cos φ, η, s)$_{ном}$, определенными из графика.

Таблица 1.6

Номинальные данные

P_2, Вт	cos φ	P_1, Вт	I_1, А	n, об/мин	η, %	s, %
...						

2. Процедура проведения опытов

1. Задать параметры трансформаторов в окнах настроек

Ниже приводится описание виртуальной лабораторной установки.

Блок *Three-Phase Source* реализует сбалансированный трехфазный источник напряжения с внутренним сопротивлением RL. Три источника напряжения соединены по схеме Y с нейтральным соединением, кото-

рое может быть заземлено изнутри или выполнено доступным. На рисунке 2.1 показано окно настройки параметров блока *Three-Phase Source*.

В качестве конфигурации источника выбираем Yg — это означает, что по умолчанию три источника напряжения соединены по оси Y с внутренней заземленной нейтралью.

В первой строке (*Phase-to-phase voltage*) указываем напряжение сети в вольтах. Фазовый угол у фазы *A* ставим 0 градусов, частоту выставляем 50 Гц.

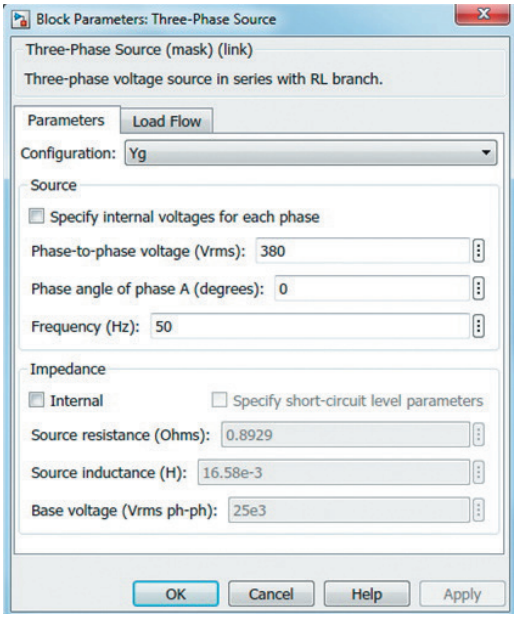


Рис. 2.1. Окно настройки параметров блока *Three-Phase Source*

Блок *Three-Phase V–I* Measurement используется для измерения мгновенных трехфазных напряжений и токов в цепи. Настройки параметров этого блока выставляем в соответствии с рис. 2.2.

Блок *Asynchronous Machine SI Units* реализует трехфазную асинхронную машину. На рис. 2.3 приведено окно настройки конфигурации. Тип ротора (*Rotor type*) выбираем короткозамкнутый (*Squirrel-cage*). Изменяем значение параметра *Preset model* на *No*. В строке механический ввод (*Mechanical input)* выбираем крутящий момент, приложенный к валу (*Torque Tm*), в качестве системы отсчета выбираем ротор (*Reference frame: Rotor*).

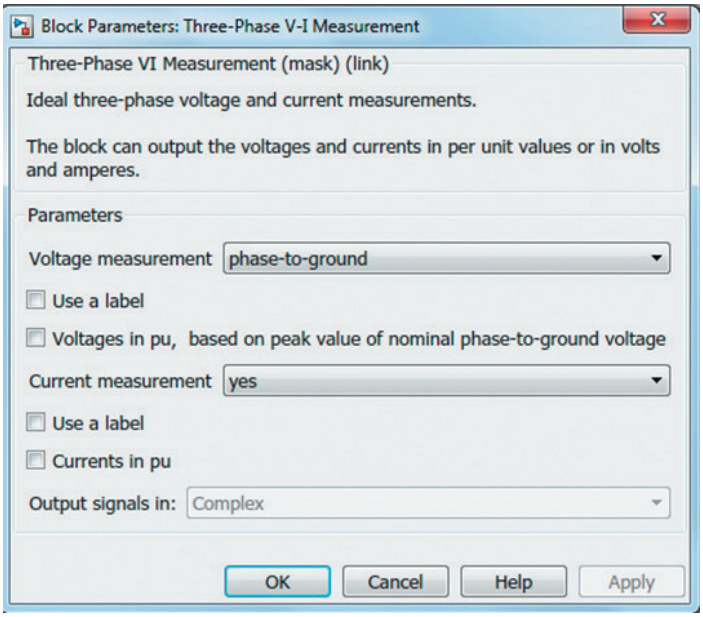


Рис. 2.2. Окно настройки параметров блока *Three-Phase VI Measurement*

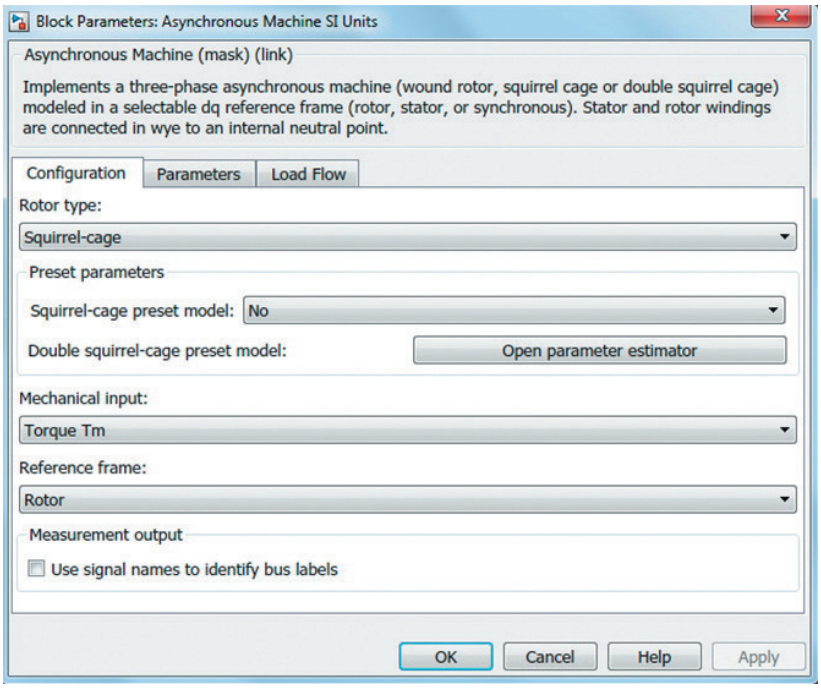


Рис. 2.3. Окно настройки конфигурации блока *Asynchronous Machine SI Units*

На рисунке 2.4 приведено окно настройки параметров блока *Asynchronous Machine SI Units*, все параметры указываются в физических единицах измерения.

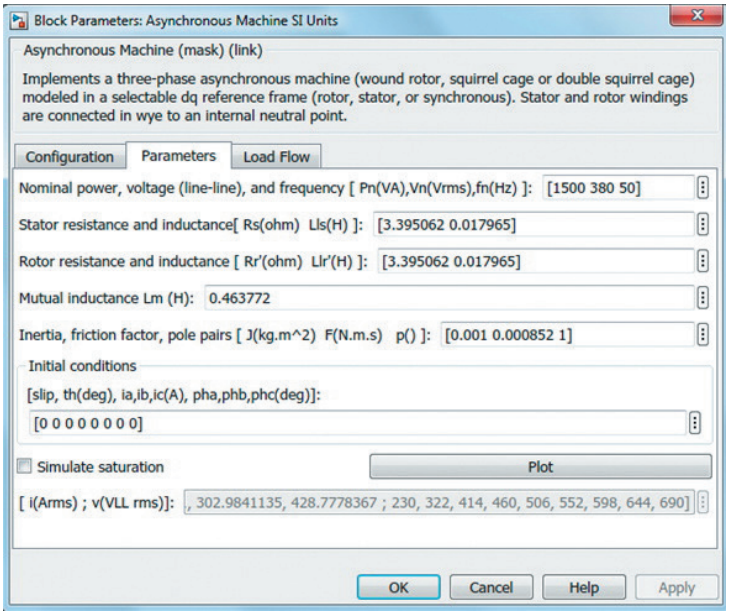


Рис. 2.4. Окно настройки конфигурации блока *Asynchronous Machine SI Units*

В первой строке задаются значения номинальной мощности, действующего линейного напряжения и номинальной частоты. В следующей строке указываются параметры статора, а именно активное сопротивление и индуктивность. Примечание: в качестве индуктивности статора задается $L_S = L'_2$, в качестве активного сопротивления статора $R_S = R'_2$. В третьей строке вписываются параметры ротора, а именно активное сопротивление и индуктивность. Ниже указывается взаимная индуктивность (*Mutual inductance*). Потом задаются момент инерции, коэффициент трения и число пар полюсов. В последней строке указываются начальные условия [slip, th (deg), ia, ib, ic (A), pha, phb, phc (deg)]: скольжение, фаза, начальные значения токов статора, начальные фазы токов статора.

Подсистема U_1, которая представлена на рис. 2.5, собрана из набора блоков.

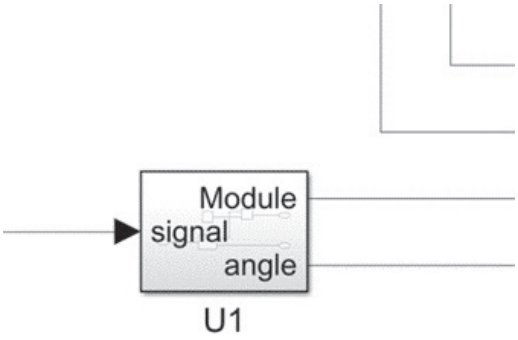


Рис. 2.5. Подсистема U_1

Данная подсистема (рис. 2.6) собрана из уже известных элементов, таких как: *constant, fourier, divide*. Элементы *signal, module, angle* представлены блоком In_1 и для удобства подписаны.

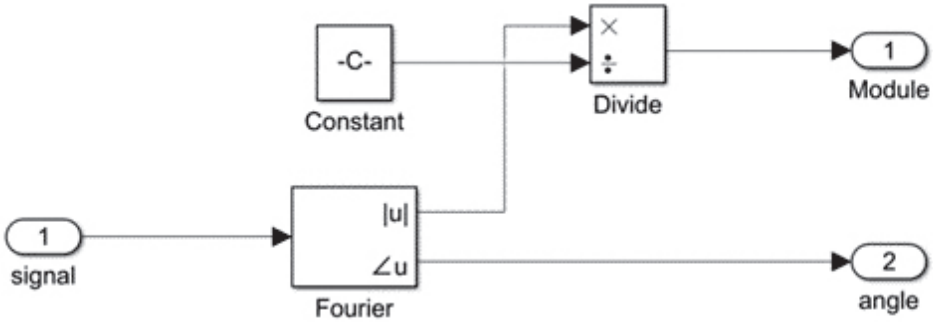


Рис. 2.6. Схема подсистемы U_1

Настройка блока *Signal* представлена на рис. 2.7, указываем только номер порта, то есть 1.

Настройка блока *Module* представлена на рис. 2.8, указываем только номер порта, то есть 1.

Настройка блока *Angle* представлена на рис. 2.9, указываем только номер порта, то есть 2.

После сбора схемы с рис. 2.6, ее можно включить в подсистему. (рис. 2.10).

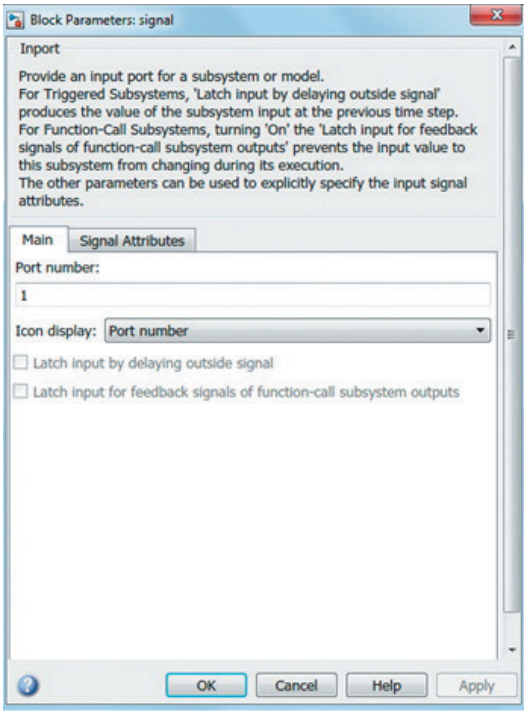


Рис. 2.7. Настройка блока *Signal*

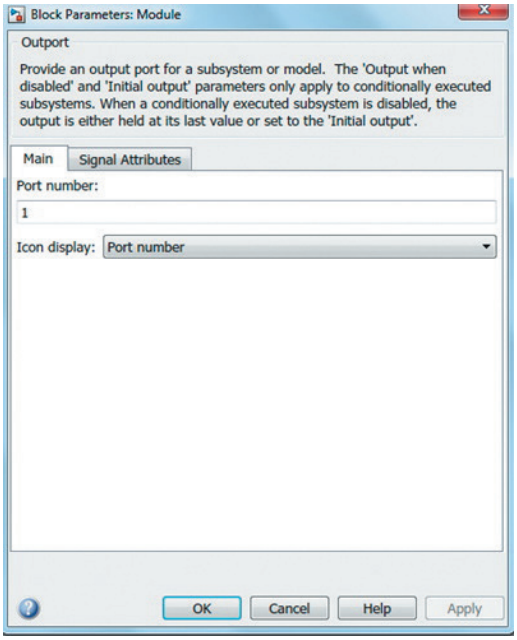


Рис. 2.8. Настройка блока *Module*

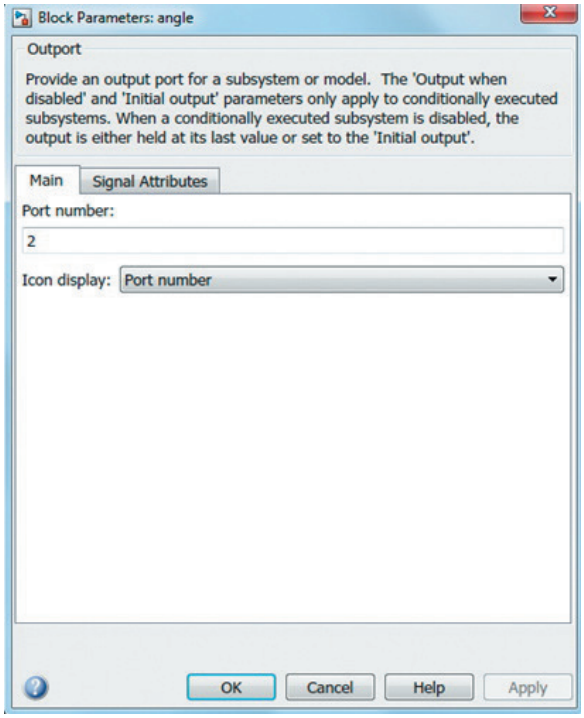


Рис. 2.9. Настройка блока *Angle*

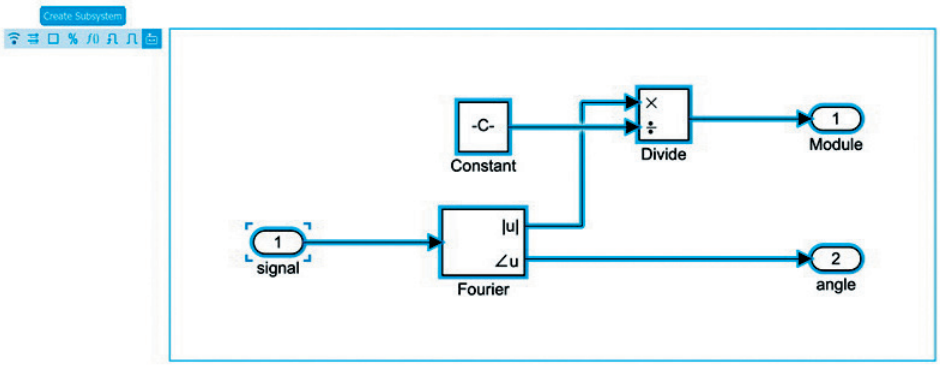


Рис. 2.10. Создание подсистемы

Подсистема I_1, которая представлена на рис. 2.11, состоит из набора блоков, собирается аналогичным способом, что и подсистема U_1.

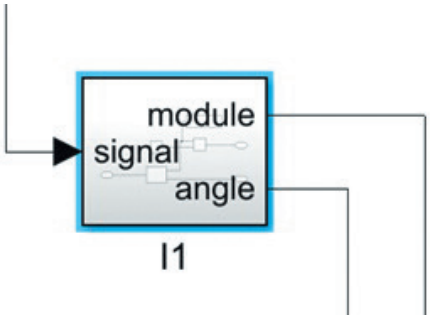


Рис. 2.11. Подсистема I_1

Данная подсистема (рис. 2.12) собрана из уже известных элементов, таких как: *Constant, Fourier, Divide, Display*. Элементы *Signal, Module, Angle* представлены блоком I_1 и для удобства подписаны.

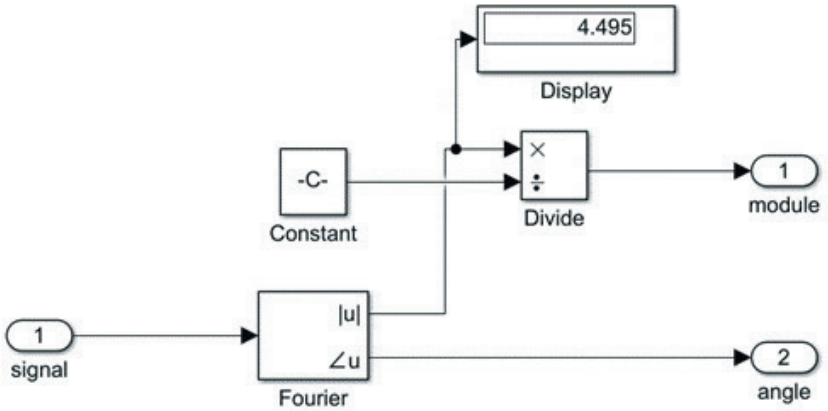


Рис. 2.12. Схема подсистемы I_1

Блок *Mux* объединяет входные данные с одинаковым типом данных и сложностью в векторный выход. Сигнал мультиплексора упрощает внешний вид модели за счет объединения двух или более сигнальных линий в одну. На рисунке 2.13 в окне настройки параметров указывается количество входных сигналов.

Блок *Bus Selector* выводит элементы, которые вы выбираете из входной шины. Вам нужно будет выбрать их в соответствии с рис. 2.14.

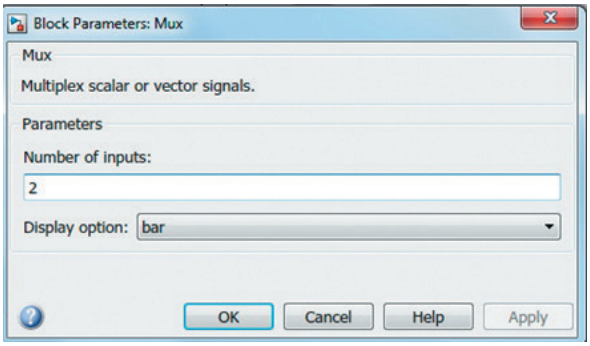


Рис. 2.13. Окно настроек параметров *Mux*

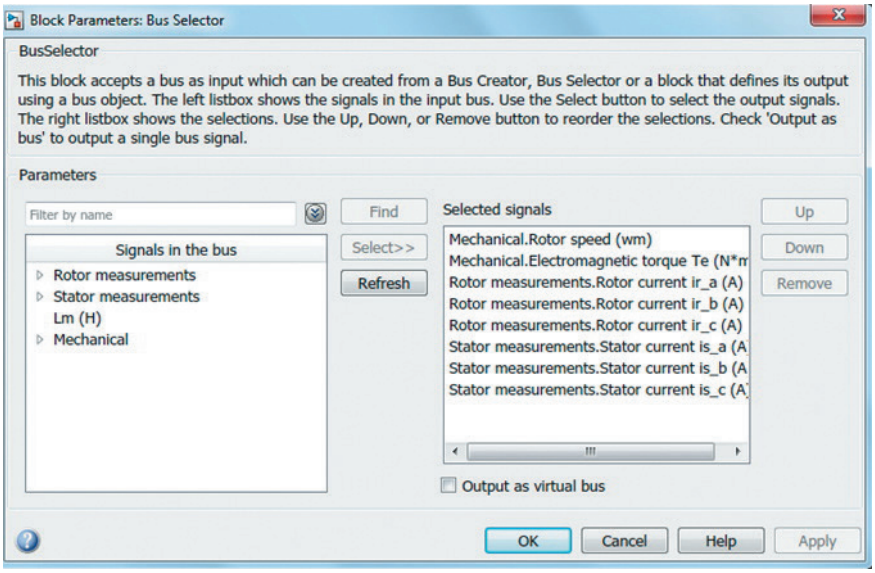


Рис. 2.14. Окно настроек параметров *Bus Selector*

Powergui — блок графического интерфейса пользователя. В данной работе необходимо лишь его наличие в схеме. Его настройки не будут подвергаться каким-либо изменениям, а следовательно, отдельно блок не будет рассматриваться.

Display нужен для вывода полученных значений.

Scope — осциллограф, строит графики исследуемых сигналов в функции времени. Позволяет наблюдать за изменениями сигналов в процессе моделирования.

Блок *Te* на схеме — это блок константы, окно настроек параметров представлено на рис. 2.15, на месте константы указывается величина номинального момента.

Блок *Product* выводит результат умножения двух входов.

Блок *Gain* умножает вход на постоянное значение. Блок и окно настройки параметров приведены на рис. 2.16.

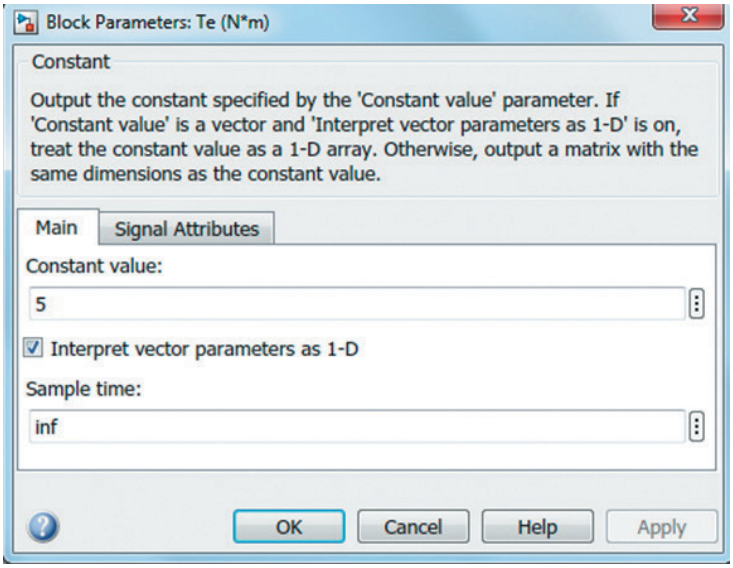


Рис. 2.15. Окно настроек параметров *Te*

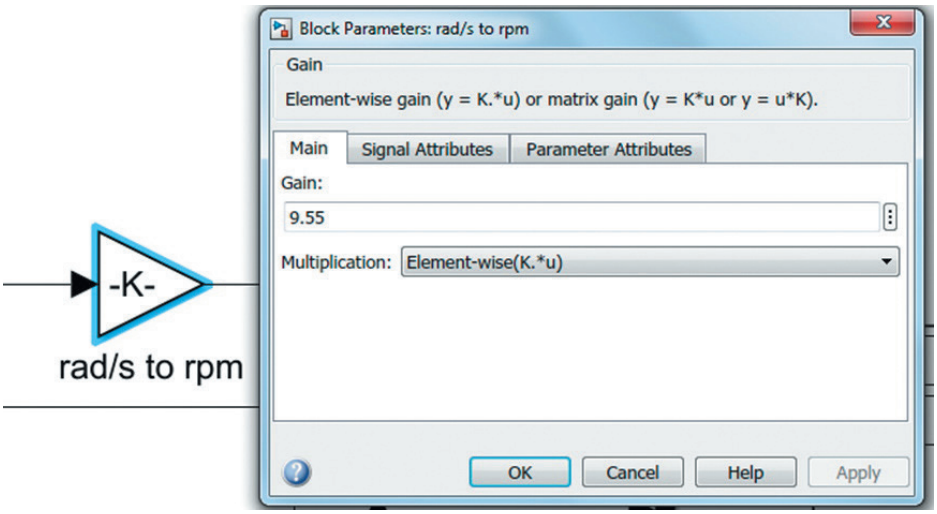


Рис. 2.16. Блок *Gain* и его окно настроек параметров

2. Настроить виртуальную модель и пробный пуск двигателя на холостом ходу

Перед тем как сделать пробный пуск двигателя на холостом ходу, в асинхронной машине необходимо выставить рассчитанные параметры. В качестве примера приведем испытание двигателя RA90S2. Ниже представлена заполненная табл. 2.1 с рассчитанными параметрами.

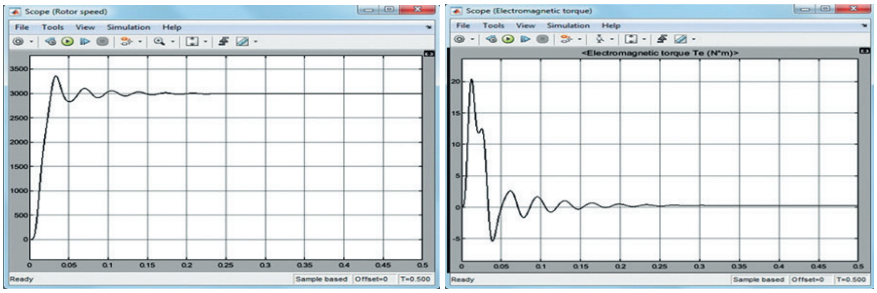
Таблица 2.1

Исходные расчетные данные двигателя

$M_н$, Нм	r_1, Ом	r_2, Ом	L_1, Гн	L_2, Гн	R_m, Ом	L_m, Гн
5	3,395	3,395	0,01796	0,01796	0	0,4637

При запуске двигателя на холостом ходу установить величину внешнего момента равной нулю ($Te = 0$), а также выставить в начальных условиях асинхронной машины скольжение равное 1 ($s = 1$), *stop time* выставляем 0,5 с. Снимаем осциллограммы частоты вращения ротора, момента и тока статора при пуске. Примеры приведены ниже на рис. 2.17.

а *б*



в

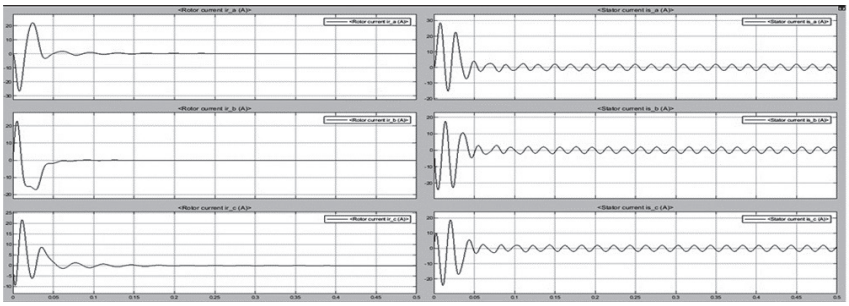


Рис. 2.17. Осциллограммы пуска асинхронного двигателя на холостом ходу:

а — частоты вращения ротора; *б* — электромагнитного момента; *в* — токов статора и ротора

При открытии осциллограммы выбираем *View-Layout*, чтобы графики располагались так, как показано на рис. 2.17, дальше появятся квадратики и вам нужно выбрать расположение двух первых столбцов в трех строках (рис. 2.18).

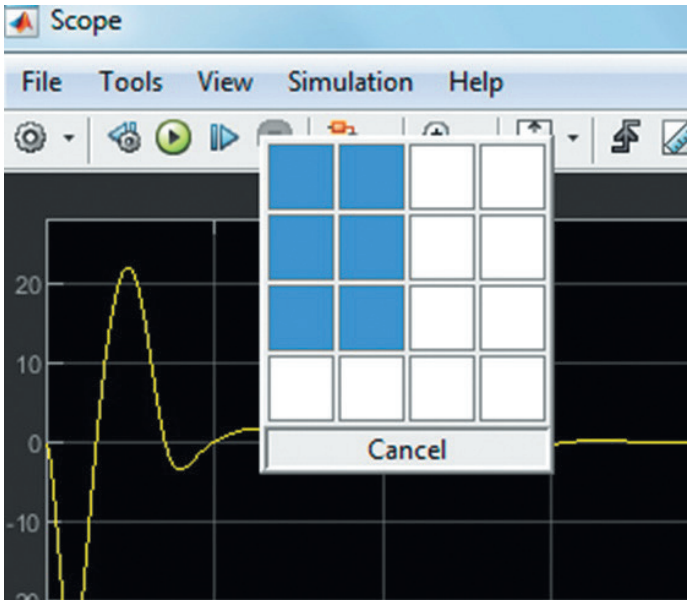


Рис. 2.18. Настройка расположения графиков

3. Снять пусковые и механические характеристики асинхронного двигателя

Для проведения данного опыта руководствуемся рекомендациями п. 5, с. 35. В начальных условиях асинхронного двигателя величину скольжения устанавливаем равной единице ($s = 1$), инерцию ротора увеличиваем не менее чем в 1000 раз, момент нагрузки берем равным нулю ($Te = 0$), *stop time* — 0,5 с или больше в зависимости от времени завершения переходного процесса. Частоту вращения ротора можно посмотреть на дисплее (*wm, Te*). Опыт проводится 11 раз в диапазоне скольжения от единицы до нуля с шагом 0,1, заполняется табл. 1.3, строятся соответствующие графики. Учитывайте, что в табл. 1.3 значения токов действующие, а по осциллограмме вы определяете амплитудное значение после окончания переходного процесса, то есть в таблицу заносится $I_{sa} = \frac{I_{sa\,\max}}{\sqrt{2}}$; аналогично для тока ротора. Привести

осциллограммы для момента, тока статора и ротора со скольжением, равным 1; 0,5; 0. На рисунках 2.19–2.21 приведены аналогичные осциллограммы для двигателя RA90S2.

а *б*

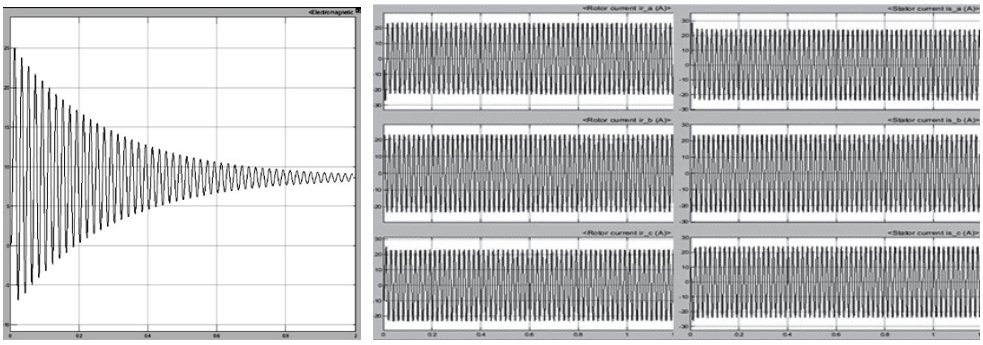


Рис. 2.19. Осциллограммы электромагнитного момента (*а*) и токов ротора и статора (*б*) при скольжении, равном 1

а *б*

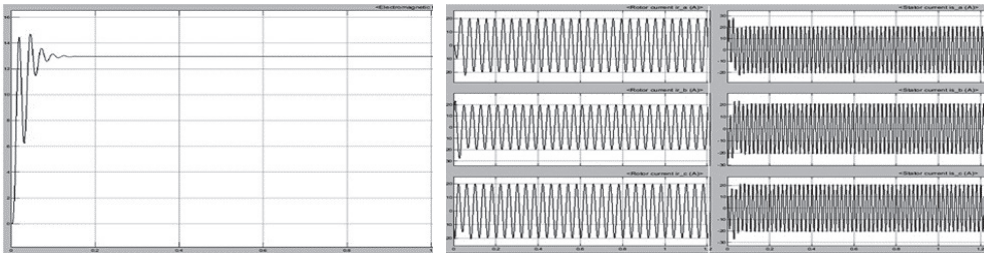


Рис. 2.20. Осциллограммы электромагнитного момента (*а*) и токов ротора и статора (*б*) при скольжении, равном 0,5

а *б*

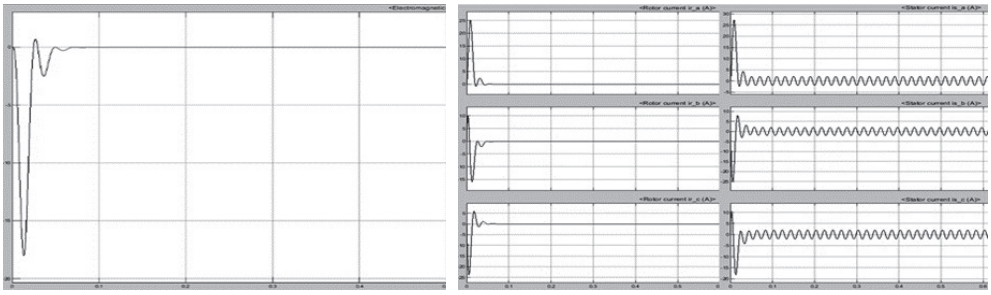


Рис. 2.21. Осциллограммы электромагнитного момента (*а*) и токов ротора и статора (*б*) при скольжении, равном 0

4. Снять зависимость скольжения от величины напряжения сети при постоянном номинальном моменте нагрузки

Не забудьте восстановить прежнее значение инерционной постоянной J. Напряжение сети изменяйте от номинального значения до такого, пока двигатель не опрокинется (остановится). При частоте вращения ротора меньше или равной нулю двигатель считается остановившемся. Нагружаем двигатель номинальным моментом, регистрируем частоту вращения ротора, рассчитываем скольжение по формуле, %: $s = \frac{100(n_1 - n)}{n_1}$, результаты заносим в табл. 1.4, с. 36. По данным таблицы строим график зависимости скольжения от величины напряжения сети.

5. Снять рабочие характеристики двигателя

Напряжение сети должно быть номинальным и равным 380 В, скольжение в начальных условиях асинхронного двигателя — ноль, *stop time* 0,5 с. Изменяем нагрузочный момент в пределах от 0 до 1,2 номинального момента с шагом 0,2 $M_н$. С модели снимаются следующие значения: фазный ток, угол сдвига тока, фазное напряжение, угол сдвига напряжения, частота вращения ротора. Остальные значения рассчитываются по формулам из п. 7, с. 36. Измеренные и рассчитанные результаты заносятся в табл. 1.5, с. 37. Строится график зависимости от P_2, по графику определяются номинальные параметры при номинальной мощности, их значения заносятся в табл. 1.6, с. 37.

Отчет выполнить один на бригаду в соответствии с требованиями прил. 1. В нем привести общий вид конкретного асинхронного двигателя именно того типа и мощности, который задан для вашей бригады. Дать краткое описание конструкции. Описание конструкции дополнить чертежом двигателя с продольным и поперечным разрезами.

Лабораторная работа № 4
Исследование трехфазного асинхронного двигателя с фазным ротором

Цель работы — изучение механических характеристик и процесса пуска асинхронного двигателя с фазным ротором.

1. Программа работы и рекомендации по ее выполнению

1. Провести исследование по данным, приведенным в табл. 1.1 [5]. Линейное напряжение сети $U_л = 380$ В. Частота сети $f = 50$ Гц. Схема обмотки статора — «звезда». Ротор с фазной обмоткой. Схема обмотки ротора — «звезда». Эффективный коэффициент трансформации $K_т = (K_{обм1}W_1)/(K_{обм2}W_2)$ с учетом отношения числа витков и обмоточных коэффициентов для каждого варианта задается различным.

Таблица 1.1

Исходные данные асинхронных двигателей

№ варианта	$P_н$, Вт	$n_н$, об/мин	η, %	cos φ	$I_н$, А	$I_п/I_н$ (k_I)	$M_п/M_н$ ($m_п$)	$M_{max}/M_н$ ($m_{макс}$)	J, кг·м^2	$K_т$
1	1500	2835	79	0,87	3	6,5	2,8	3	0,0010	2,0
2	1500	1420	78	0,80	4	5,5	2,3	2,8	0,0042	2,5
3	1500	925	76	0,76	4	4,5	2	2,1	0,0063	3,0
4	2200	2820	82	0,87	4	6,5	2,9	3,4	0,0015	3,5

Окончание табл. 1.1

№ варианта	$P_н$, Вт	$n_н$, об/мин	η, %	cos φ	$I_н$, А	$I_п/I_н$ (k_I)	$M_п/M_н$ ($m_п$)	$M_{max}/M_н$ ($m_{макс}$)	J, кг·м^2	$K_т$
5	2200	1420	79	0,82	5	6	2,2	2,6	0,0048	4,0
6	2200	960	78	0,74	5	5,5	1,9	2,5	0,0185	4,5
7	3000	2895	83	0,86	6	7	2,4	2,6	0,0038	2,0
8	3000	1420	81	0,81	7	6,2	2,2	2,6	0,0058	2,5
9	3000	960	79	0,79	7	5,9	2,2	2,6	0,0252	3,0
10	4000	2895	84	0,87	9	6,8	2,2	3,3	0,0082	3,5
11	4000	1430	85	0,84	9	6,5	2,2	2,9	0,0103	4,0
12	4000	960	80	0,80	9	6	2,2	2,6	0,0368	4,5

На рисунке 1.1 приведены общий вид двигателя с продольным разрезом и его принципиальная электрическая схема. В отличие от короткозамкнутого ротора у фазного ротора обмотка такая же как и на статоре, т. е. трехфазная двухслойная из изолированного провода, только имеет другое число витков и другой обмоточный коэффициент. Поэтому в ней в период пуска не проявляется эффект вытеснения тока в пазу ротора и можно принять активное и индуктивное сопротивления практически неизменными. Это позволяет более точно снять на цифровой модели характеристики во всем диапазоне изменения частоты вращения ротора.

Так как двигатель с фазным ротором имеет лучшие пусковые и механические свойства по сравнению с короткозамкнутым ротором, то в этой лабораторной работе им уделяется основное внимание. Одним из простых способов реализации улучшенных пусковых и регулировочных свойств является подключение к обмотке ротора через неподвижные щетки и вращающиеся контактные кольца трехфазного реостата. На рисунке 1.1, *б* он обозначен как $R_{доб}$.

2. Собрать имитационную модель трехфазного асинхронного двигателя с фазным ротором с необходимыми элементами управления и сбора информации на базе MATLAB. При выборе модели остановиться на модели двигателя *Asynchronous Machine Si Units* (рис. 1.2) с подключением к ротору трех одинаковых активных сопротивлений. В модели

не учитываются потери в ферромагнитном сердечнике и добавочные потери, а также нелинейность магнитной характеристики.

3. Рассчитать параметры Г-образной схемы замещения асинхронного двигателя по методике лабораторной работы № 3. Следует дополнить полученные расчеты реальными значениями роторных токов и параметров:

а *б*

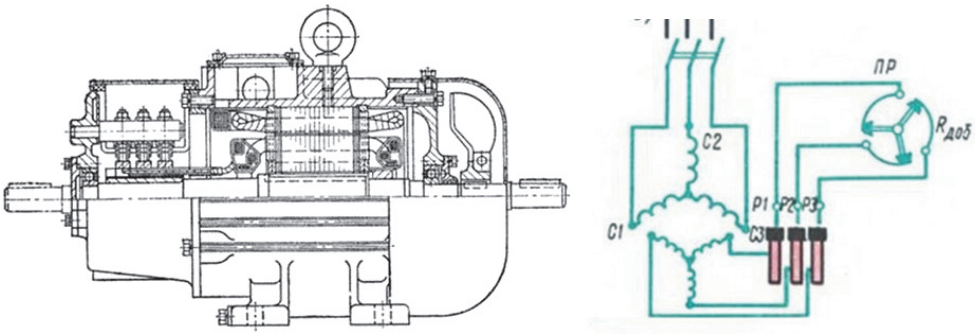


Рис. 1.1. Общий вид АД с фазным ротором (*а*)
и его электрическая схема (*б*)

1) активное сопротивление роторной обмотки, Ом:

$$R_2 = \frac{r_2'}{\mathrm{K}_{\text{т}}^2};$$

2) индуктивное сопротивление рассеяния роторной обмотки, Ом:

$$X_2 = \frac{X_2'}{\mathrm{K}_{\text{т}}^2};$$

ток ротора, А:

$$I_2 = \mathrm{K}_{\text{т}} I_2'.$$

Представить результаты расчетов параметров в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Исходные расчетные данные двигателя

$M_{\text{н}}$, Нм	r_1, Ом	r'_2, Ом	L_1, Гн	L'_2, Гн	R_m, Ом

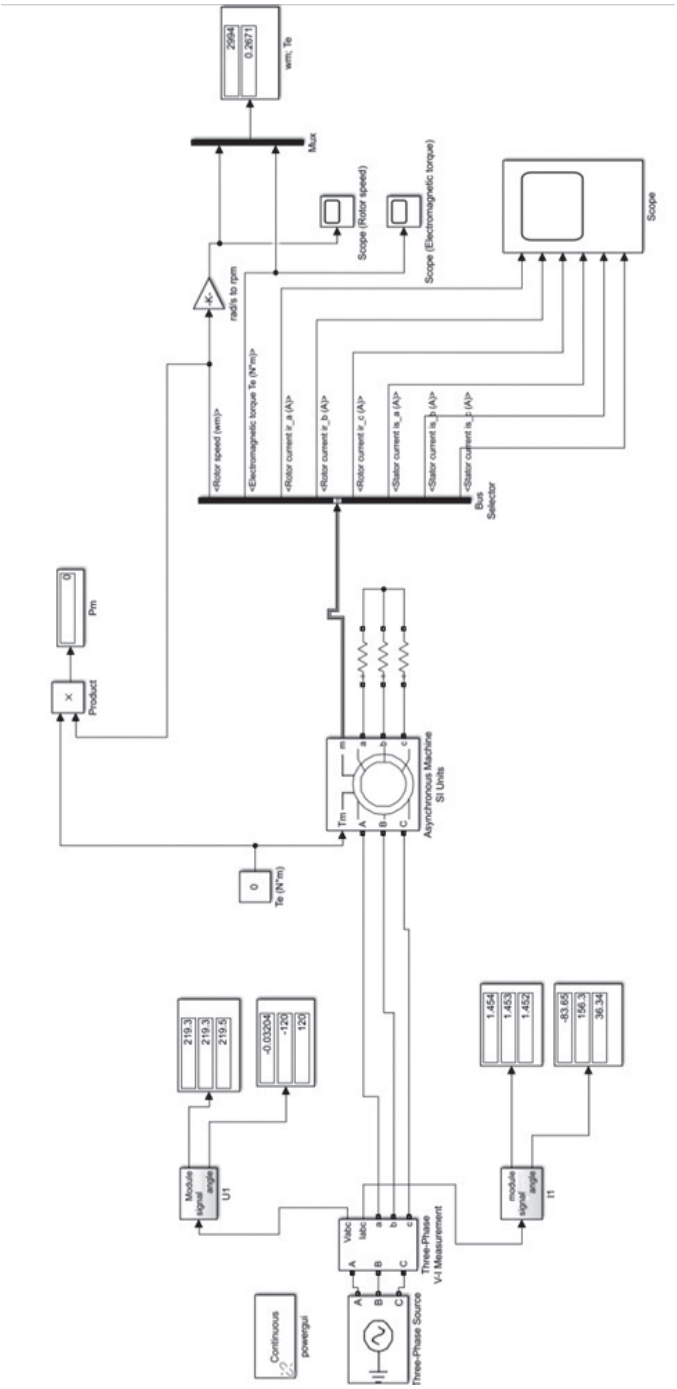


Рис. 1.2. Схема имитационной модели трехфазного асинхронного двигателя с фазным ротором

4. Провести настройку виртуальной модели и произвести пробный пуск двигателя на холостом ходу при закороченном роторе ($R_{доб} = 0$). Привести осциллограммы пуска и оценить время пуска, максимальные величины электромагнитного момента и тока статора в начале пуска.

5. Провести анализ режима пуска при различных значениях добавочного сопротивления в цепи ротора. Момент нагрузки на валу установите равным номинальному, а добавочное сопротивление изменяйте от нуля до $R_{доб} = \frac{X_к}{К_т^2}$.

Здесь $X_к = X_1 + X'_2$ — индуктивное сопротивление короткого замыкания.

Проведите четыре-пять пусков при разных $R_{доб}$. Приведите осциллограммы момента, тока статора и частоты вращения ротора. Оцените время запуска, конечную частоту вращения, максимальные значения токов статора и момента. Заполните табл. 1.3 и постройте графики $t_{пуска}$, n, M_{max}, $I_{max} = f(R_{доб})$. Дайте объяснение характера этих кривых.

Таблица 1.3

Результаты анализа режима пуска при разных сопротивлениях в роторе

$R_{доб}$, Ом	$t_{пуска}$, с	n, об/мин	M_{max}, Нм	I_{max}, А
...				
...				
...				

6. Снять пусковые и механическую характеристики асинхронного двигателя при различных значениях $R_{доб}$, таких же, как в п. 5, с. 35. Они снимаются так же, как и в лабораторной работе № 3 (см. табл.1.4, с.36; п. 5, с. 35).

Результаты свести в табл. 1.4, построить семейство механических характеристик $n = f(M)$ и графики пусковых характеристик $M = f(s)$ и $I = f(s)$ при разных добавочных сопротивлениях.

Таблица 1.4

Результаты снятия механической и пусковых характеристик $R_{доб}$ =.....

№ опыта	S, о.е.	M, Нм	n, об/мин	I, А
1	1			
2	0,9			
3	0,8			

Окончание табл. 1.4

№ опыта	S, о. е.	M, Нм	n, об/мин	I, А
...	...	...	...	...
11	0			

7. Рассчитать механические характеристики при разных добавочных сопротивлениях, как и в п. 6 по известному выражению для электромагнитного момента.

$$M = \frac{pm_1 U_1^2 \dfrac{r_2'}{s}}{2\pi f_1 \left[\left(r_1 + c_1 \dfrac{r_2'}{s} \right)^2 + \left(x_{\sigma_1} + c_1 x_{\sigma_2}' \right)^2 \right]},$$

где $x_{\sigma 1} = x_1$ — индуктивное сопротивление рассеяния статора;

$x_{\sigma 2}^{'} = x'_2$ — приведенное индуктивное сопротивление рассеяния ротора.

Принять C_1 равным единице. Заполнить табл. 1.5. Построить семейство механических характеристик и сопоставить их с расчетами по цифровой модели простановкой точек пускового и максимального моментов на семействе кривых.

Таблица 1.5

Значения электромагнитного момента, Нм

$R_{доб}$, Ом	Скольжение, S, о. е.					
	1,0	0,8	0,6	0,4	0,2	0,0
...						
...						
...						

2. Процедура проведения опытов

1. Описание виртуальной лабораторной установки

Схема аналогична рис. 1.2, с. 32. Так как ротор теперь фазный, то изменим лишь блок *Asynchronous Machine SI Units*. На рисунке 2.1 приве-

дено окно настройки конфигурации. Тип ротора выбираем — с фазным ротором (*Wound*).

На рисунке 2.2 приведено окно настройки параметров блока *Asynchronous Machine SI Units*. Все параметры указываются в физических единицах.

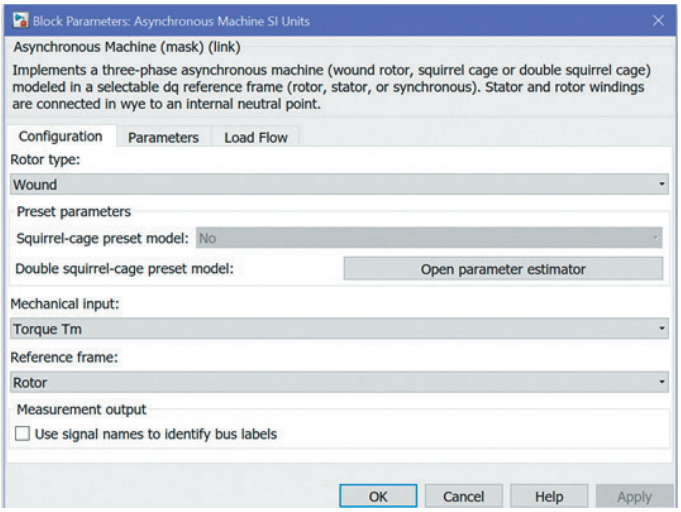


Рис. 2.1. Окно настройки конфигурации блока *Asynchronous Machine SI Units*

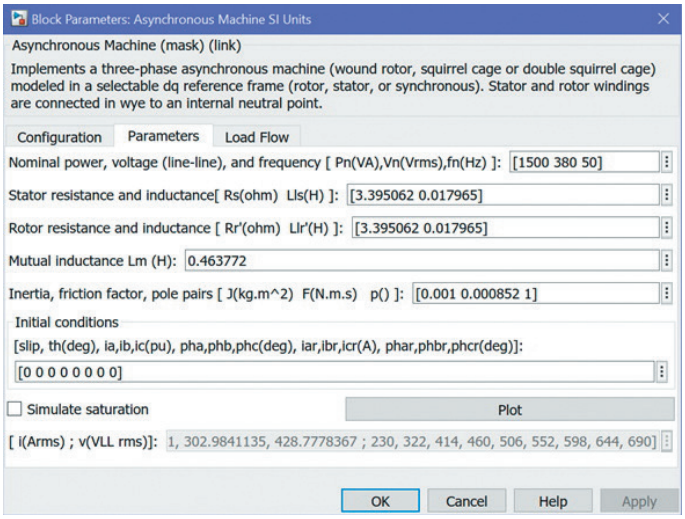


Рис. 2.2. Окно настройки конфигурации блока *Asynchronous Machine SI Units*

2. Настройка виртуальной модели и пробный пуск двигателя на холостом ходу

Перед тем как сделать пробный пуск двигателя на холостом ходу, в асинхронной машине нужно выставить рассчитанные параметры.

В качестве примера для двигателя RA90S2 мощностью 1500 Вт представлена заполненная табл. 2.1 с рассчитанными параметрами. В данной работе примем, что $L_1 = L_2'$ и $r_1 = r_2'$.

Таблица 2.1

Исходные расчетные данные двигателя RA90S2

$M_н$, Нм	r_1, Ом	r'_2, Ом	L_1, Гн	L'_2, Гн	R_m, Ом
5	3,395	3,395	0,0179	0,0179	0

При запуске двигателя на холостом ходу величина внешнего момента равна нулю ($Te = 0$), а также в начальных условиях асинхронной машины скольжение принять равным единице ($s = 1$), *stop time* выставляем 0,5 с. Снимаем осциллограммы частоты вращения ротора, момента и тока статора при пуске. Примеры приведены на рис. 2.3.

3. Анализ режима пуска при различных значениях добавочного сопротивления в цепи ротора

Для проведения данного опыта необходимо руководствоваться рекомендациями п. 5, с. 55. Для расчета добавочного сопротивления, нужно найти X_K — индуктивное сопротивление короткого замыкания ($X_К = X_1 + X_2'$). Время запуска следует определять после полного затухания колебаний ротора, а амплитудные значения момента и тока статора — в начале пуска. Например, по результатам пробного пуска двигателя на холостом ходу с закороченной обмоткой ротора, когда $R_{доб} = 0$ (см. рис. 2.3), время пуска — 1,25 с, частота вращения — почти 3000 об/мин, максимумы тока статора — 28 А, а момента — примерно 22 Нм.

4. Снятие пусковых и механической характеристики асинхронного двигателя

Они снимаются так же, как и в лабораторной работе № 3. Поскольку активное сопротивление ротора в цифровой модели используется приведенное, то и дополнительное сопротивление нужно привести к приведенным значениям, пользуясь выражением $R'_{доп} = R_{доп} К_Т^2$.

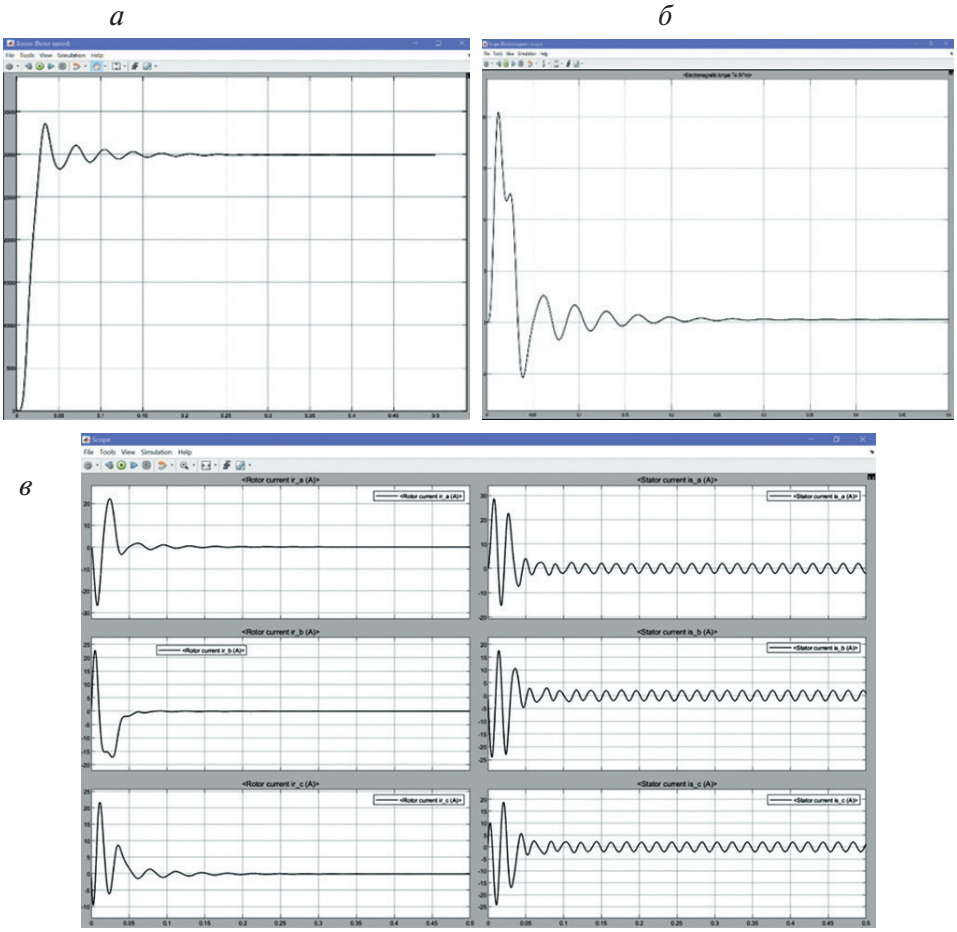


Рис. 2.3. Осциллограммы:

а — частоты вращения ротора; *б* — электромагнитного момента фазных токов ротора и статора; *в* — процесса пуска двигателя на холостом ходу при закороченной обмотке ротора

5. Расчет механических характеристик при разных добавочных сопротивлениях по аналитическому выражению для момента

Так как асинхронный двигатель имеет фазный ротор, к которому подключен трехфазный реостат, то общее активное сопротивление ротора будет отличаться от короткозамкнутого на величину $R_{доб}$. До этого использовались приведенные значения дополнительного сопротивления, здесь будут использоваться они же.

Отчет выполнить один на бригаду в соответствии с требованиями прил. 1.

Лабораторная работа № 5
Испытание синхронного генератора методом непосредственной симметричной нагрузки

Цель работы — снятие характеристик и оценка свойств по результатам испытаний синхронного генератора.

1. Программа работы и рекомендации по ее выполнению

1. Провести испытания по данным, приведенным в табл. 1.1. Линейное напряжение статора $U_н = 10$ кВ, коэффициент мощности $\cos\varphi = 0{,}9$, обмотка статора соединена в схему «звезда» с нулевым проводом.

Таблица 1.1

Исходные данные

№ в-та	$S_н$, кВА	$n_{синхр}$, об/мин	$U_{вн}$, В	$I_{вн}$, А	$I_{в0}$, А	X_d, о.е.	X_q, о.е.	R_a, о.е.	X_s, о.е.
1	1111	750	150	100	50	1,45	1,015	0,015	0,100
2	2222	750	230	100	50	1,40	0,980	0,014	0,110
3	3333	600	230	200	100	1,35	0,945	0,013	0,120
4	4444	600	200	200	100	1,30	0,910	0,012	0,130
5	5555	500	170	300	150	1,25	0,875	0,011	0,140
6	6666	500	200	300	150	1,20	0,814	0,010	0,150
7	7777	375	175	400	200	1,15	0,805	0,009	0,160
8	8888	375	200	400	200	1,10	0,770	0,008	0,170
9	10000	250	150	600	300	1,05	0,735	0,007	0,180
10	11111	250	160	600	300	1,00	0,700	0,006	0,190

В качестве характеристики холостого хода следует использовать универсальную типовую кривую (табл. 1.2).

Таблица 1.2

Типовая кривая холостого хода

$E/U_н$	0	0,58	1,00	1,21	1,33	1,41	1,46	1,51
$I_в/I_{в0}$	0	0,50	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00	3,50

Принципиальная схема физической установки показана на рис. 1.1 [6]. В качестве привода генератора в ней используется двигатель постоянного тока, позволяющий устанавливать не только строго синхронную частоту вращения ротора, но и другую произвольную частоту. Имитационная компьютерная модель синхронной машины имеет частоту вращения, соответствующую числу пар полюсов. Испытание синхронного двигателя проводится в режиме генератора. Можно считать, что он установлен на малой ГЭС и приводится во вращение гидравлической турбиной. Мощность синхронной машины от 1000 до 10000 кВт.

2. Собрать имитационную модель синхронного генератора с необходимыми элементами управления и сбора информации на базе MATLAB. При выборе модели остановиться на упрощенной модели синхронной машины *Simplified Synchronous Machine* с неявнополюсным ротором (рис. 1.2).

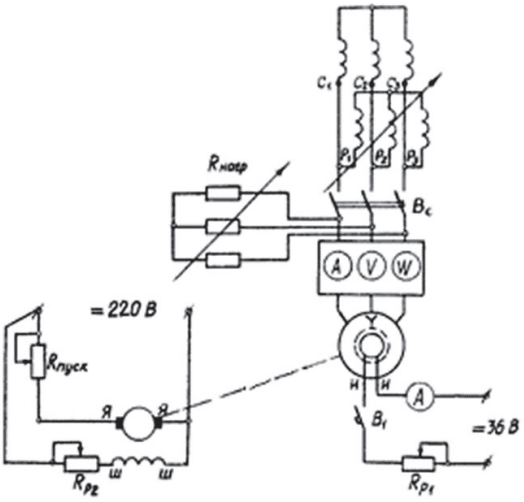


Рис. 1.1. Схема испытания трехфазного синхронного генератора

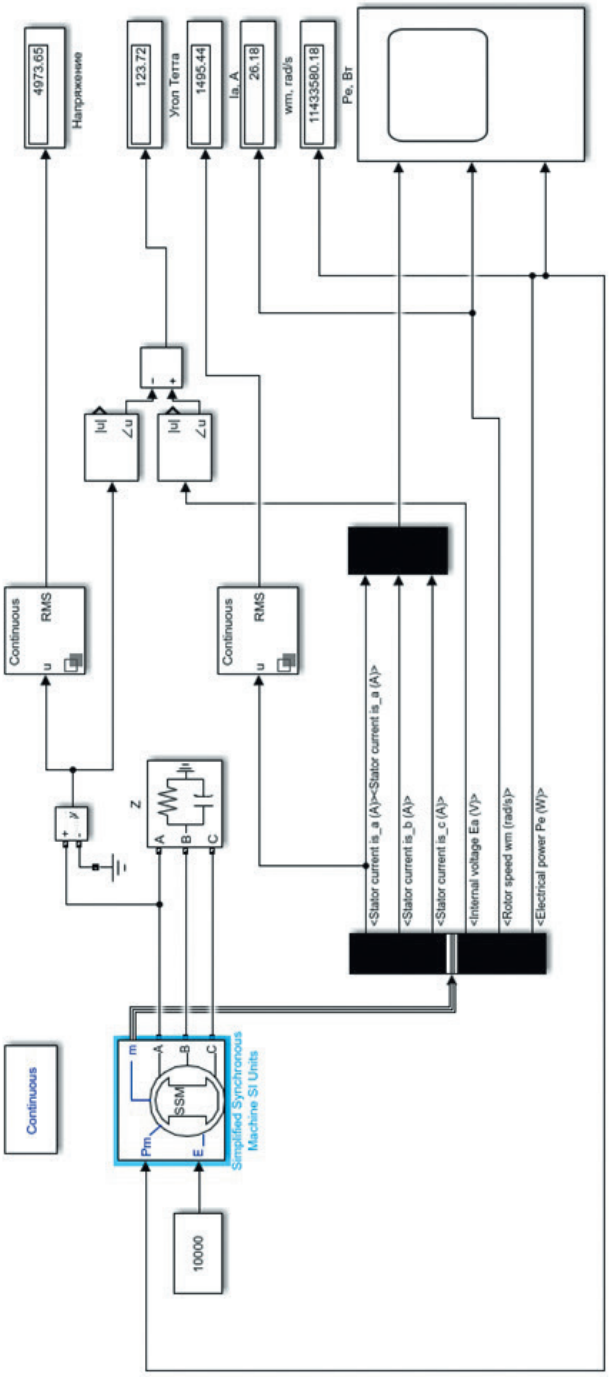


Рис. 1.2. Схема имитационной модели трехфазного синхронного генератора

3. Подготовить исходные данные как в относительных (о. е.), так и в физических (ф. е.) единицах. В качестве основных базисных единиц выбрать номинальные фазные действующие значения напряжения и тока статора. Схема статорной обмотки — «звезда» с нулевым проводом.

4. Для проверки модели установите номинальный режим генератора, задавая на нагрузке номинальные значения активной ($P_н$), реактивной ($Q_н$) мощностей, номинальную фазную ЭДС (E_0), синхронную частоту вращения. При этих данных ток и напряжение статора должны быть равными номинальным значениям.

5. Построить характеристику холостого хода (ХХХ) по данным двигателя в о. е. и в ф. е. Выделить на графике ненасыщенную линейную часть ХХХ. Дополнить эти характеристики табличными данными с целью использовать эти результаты при проведении имитационного испытания.

6. Провести анализ влияния частоты вращения ротора на ХХХ. Построить семейство ХХХ при 100 %, 75 %, 50 %, 25 % номинальной синхронной частоты вращения. Сделать вывод о влиянии частоты вращения на ЭДС статора и дать объяснение ее изменению.

7. Снять характеристики трехфазного короткого замыкания $I_{кз} = f(I_в)$ (ХКЗ) при $n = n_с$ и $n = 0{,}5n_с$. Для этого соответствующие зажимы статорной обмотки генератора замкнуть на землю, а затем, изменяя E_0, фиксировать ток статора. Для определения тока возбуждения следует использовать ХХХ (см. п. 4, 5). Построить в одних координатных осях ХКЗ. Дать оценку влияния частоты вращения на токи трехфазного КЗ.

8. Снять нагрузочные характеристики $U = f(I_в)$ при $I = I_н = \text{const}$, $n = n_н = \text{const}$ для случаев:

а) индуктивной нагрузки $\cos\varphi = 0$;

б) активной нагрузки $\cos\varphi = 1$.

При снятии характеристик ток возбуждения следует изменять от $I_{вmax}$ до такой величины, когда напряжение статора достигнет нулевого значения.

Построить их в одних координатных осях. Построить характеристический треугольник в точке КЗ. Используя ХХХ с учетом насыщения и этот треугольник, построить реальную индукционную нагрузочную характеристику.

9. Снять внешние характеристики $U = f(I)$ при $I_в = \text{const}$, $n = n_н = \text{const}$ для случаев:

а) активной нагрузки (cos φ = 1);
б) индуктивной нагрузки (cos φ = 0);
в) активно-индуктивной нагрузки (cos φ = 0,9);
г) активно-емкостной нагрузки (cos φ = 0,9).

Ток нагрузки изменять от нуля до тока короткого замыкания. Опыт следует начинать с точки холостого хода при $U = U_н$.

Построить внешние характеристики в одних координатных осях и объяснить их характер.

Используя результаты номинального режима (п. 4, с. 63) определить скачок напряжения при отключении нагрузки без учета насыщения и с учетом насыщения магнитной цепи.

Оформить отчет в соответствии с требованиями, изложенными в прил. 1.

2. Процедура проведения опытов

1. Задать параметры для блоков в окнах настроек. На рисунке 2.1 отображено окно параметров конфигурации синхронной машины. В зависимости от типа соединения различают изолированную нейтраль (*3-wire* Y), либо заземленную нейтраль (*4-wire* Y). Также в зависимости от типа входного механического сигнала различают задание непосредственно через механическую мощность на валу, Вт (*Mechanical power Pm*), либо через угловую частоту вращения ротора, рад/с (*Speed w*).

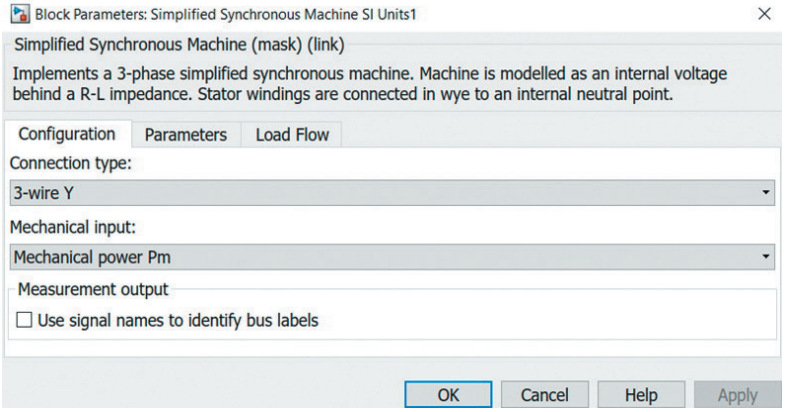


Рис. 2.1. Окно параметров конфигурации подключения блока *Simplified Synchronous Machine*

На рисунке 2.2 представлено окно настройки параметров синхронной машины. В первой строке последовательно элементами массива задается номинальная мощность, ВА, номинальное линейное напряжение на зажимах машины, В и номинальная частота напряжения, Гц.

В следующей строке задается момент инерции, $кг \cdot м^2$, коэффициент демпфирования и число пар полюсов. В случае неизвестного момента инерции его рекомендуется задать бесконечностью, вписав на его место ключевое слово *inf*. Коэффициент демпфирования для проведения текущих опытов можно оставить равным нулю.

Третья строка представляет из себя массив внутреннего сопротивления машины, где первым элементом выступает внутреннее активное сопротивление, Ом, а вторым — индуктивность внутреннего индуктивного сопротивления, Гн.

Четвертая строка заполняется в случае, когда необходимо задать начальные условия симуляции. Обычно этой строкой пользуются при моделировании различных переходных режимов. В данном практикуме эти параметры использоваться не будут. Их рекомендуется оставить такими, какие приведены на рис. 2.2.

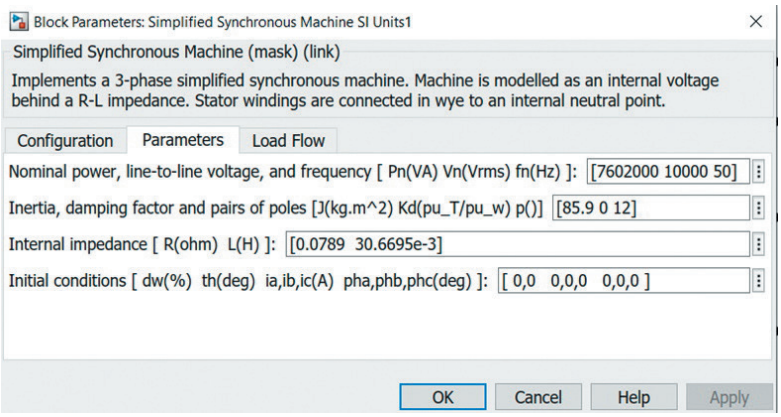


Рис. 2.2. Окно настроек параметров синхронной машины блока *Simplified Synchronous Machine*

Далее следует блок *RMS Measurement* (рис. 2.3), преобразующий сигнал определенной частоты в его среднеквадратическое значение. В первую строку необходимо вписать значение частоты входного сигнала. Вторая строка задает шаг расчета. По умолчанию это зна-

чение равно нулю. Это значит, что шаг расчета наследуется от блока *powergui* — блока графического интерфейса пользователя (в данном курсе необходимо лишь его наличие в схеме, его настройки не будут подвергаться каким-либо изменениям, а следовательно, отдельно блок не будет рассматриваться). Для проведения рассматриваемых опытов его также следует оставить равным значению по умолчанию. В некоторых блоках также можно встретить подобный параметр с различными значениями по умолчанию. Изменять его без должной необходимости не рекомендуется.

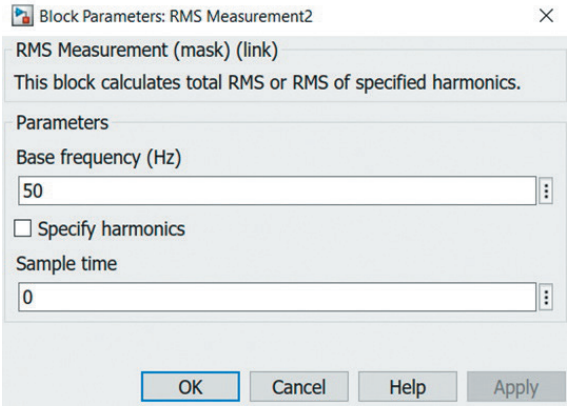


Рис. 2.3. Параметры блока *RMS Measurement*

На рисунке 2.4 отображены параметры блока *Fourier*. Блок позволяет раскладывать входящий в него периодический сигнал на два выходных значения (амплитуду и угол в градусах). В первой строке необходимо установить частоту равной частоте двигателя. Значения остальных строк выставить в соответствии с примером.

Окно настроек параметров блока нагрузки отображены на рис. 2.5. В первой строке указывается конфигурация нейтрали. Далее идет номинальное линейное действующее значение напряжения, В. В третьей строке указывается номинальная частота, Гц. В поле *Active Power* задается значение активной мощности нагрузки, Вт. Все поля могут принимать в себя различные математические выражения. В текущем примере в качестве задания активной мощности используется значение модуля полной мощности, умноженное на номинальный cos φ. Реактивная мощность в текущем блоке задается отдельно по характеру нагрузки (при индуктивной реактивной мощности следует исполь-

зовать поле Q_L. При емкостном характере следует использовать поле Q_c (задается абсолютным значением).

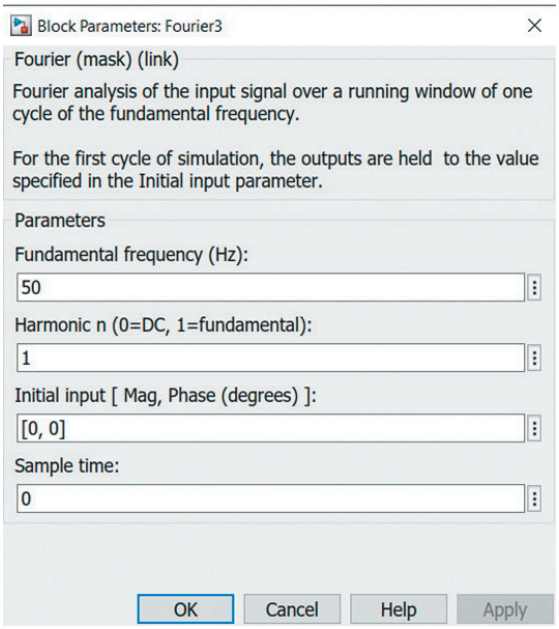


Рис. 2.4. Параметры блока *Fourier*

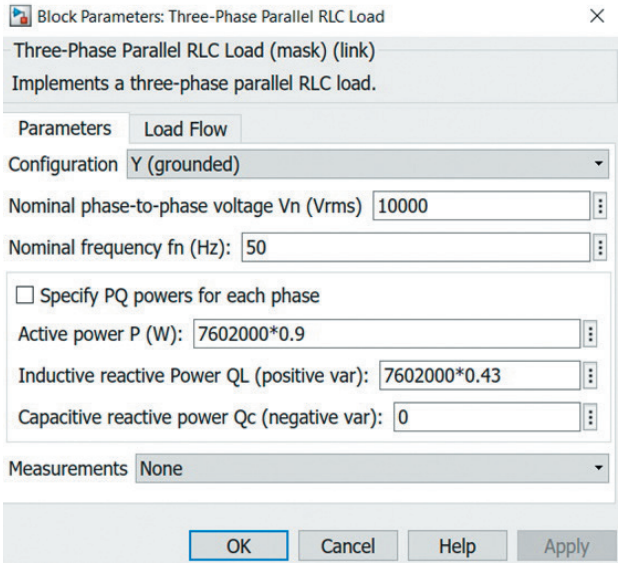


Рис. 2.5. Параметры блока *Three-Phase Parallel RLC Load*

Для разложения выходного вектора блока синхронной машины на необходимые данные используется блок *Bus Selector*. Окно его настроек представлено на рис. 2.6. Слева находятся возможные сигналы, содержащиеся в векторе *m*. В правое поле добавлены все необходимые для проведения опытов сигналы.

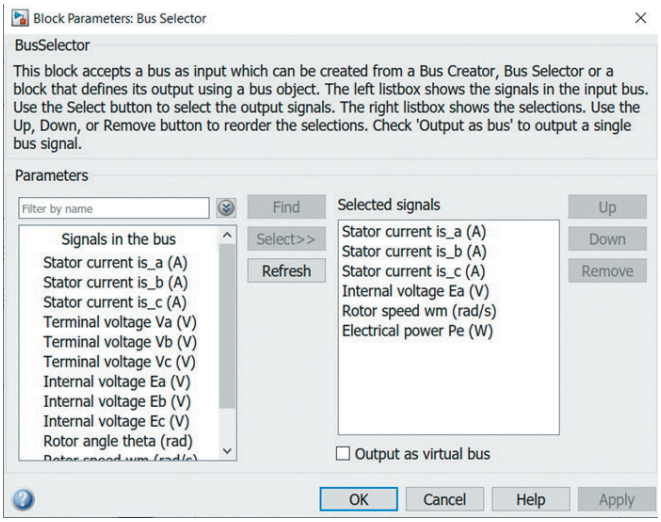


Рис. 2.6. Параметры блока *Bus Selector*

Настройки прочих блоков конъюнктурны, поэтому ограничимся только их перечислением: *Voltage Measurement* — позволяет измерять сигнал напряжения между двумя точками; *Display* — позволяет выводить значение сигнала; *Mux* (мультиплексор) — зашифровывать несколько входящих параметров в один вектор, в данной работе используется исключительно для того, чтобы передать несколько значений на блок *Display*; *Ground* — блок «земля», представляет из себя точку нулевого потенциала; *Add* — сумматор входящих значений, последовательность арифметических знаков, применяемых к каждому входящему значению, задается в настройках блока — строка *List of signs* (рис. 2.7).

2. Нахождение номинальной ЭДС

После задания номинальных параметров синхронной машины в блоке СМ, нагрузки $P_н$ и $Q_н$ в полях *P* и Q_L блока *Three-Phase Parallel RLC Load*, путем изменения значения блока *Constant* подобрать такую величину ЭДС, при которой ток и напряжение генератора будут равны номинальным значениям.

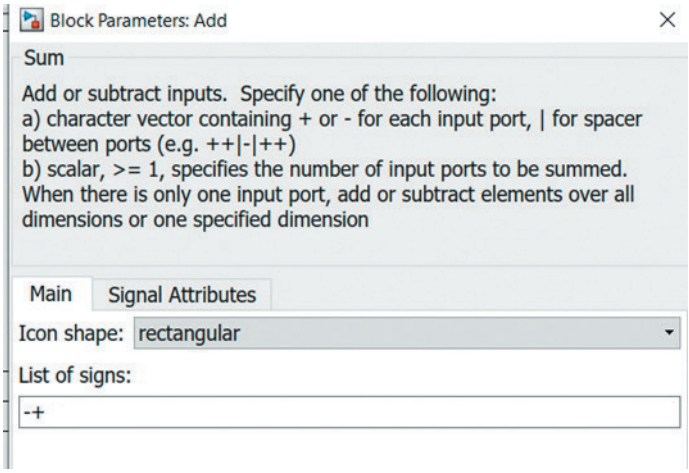


Рис. 2.7. Параметры блока *Add*

3. Снятие характеристик трехфазного короткого замыкания

Замкнуть между собой три фазы генератора и блок *Ground* в соответствии с рис. 2.8. В параметрах блока синхронного генератора выбрать тип входного механического сигнала «*Speed w*» и установить значение переменной блока *Constant*, соответствующего угловой частоте вращения ротора, рад/с. Далее следовать рекомендациям п. 7, с. 63.

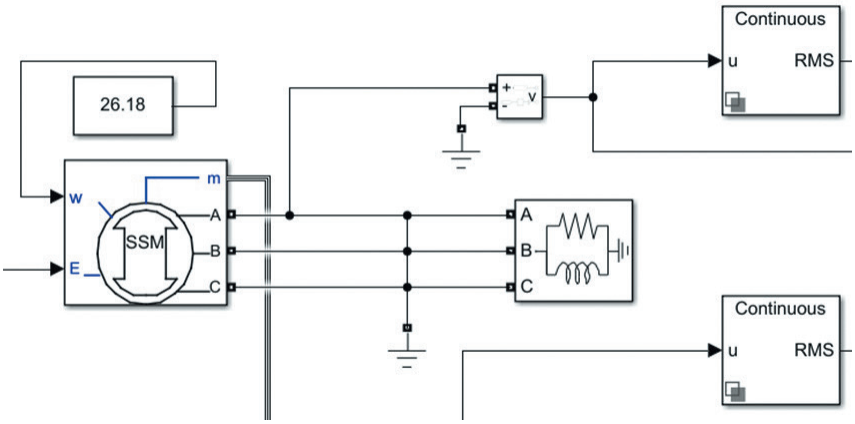


Рис. 2.8. Опыт короткого трехфазного замыкания

4. Снятие нагрузочных характеристик

Изменить тип входного механического сигнала на «*Mechanical Power Pm*», установить обратную связь, вернуть все соединения, как пока-

зано на рис. 1.2, с. 62. В параметрах блока нагрузки в соответствии с требуемым значением cos φ установить начальную мощность приблизительно равной по модулю номинальной. В случае задания чисто индуктивного характера нагрузки следует выставить значение активной мощности от 10 до 1000 Вт. Это объясняется спецификой блока — значение активной мощности нагрузки не может быть равным нулю. Далее необходимо добиться требуемого значения $U_г = (0...1,1)$, о. е. и $I_г = I_н$ путем регулирования потока мощности нагрузки при неизменном cos φ и регулирования линейного значения E.

Регулирование при активном и индуктивном характере нагрузки подчиняется следующим законам:

- при увеличении ЭДС увеличиваются напряжение генератора и ток статора $E\uparrow \rightarrow U_г\uparrow,\ I_г\uparrow$;
- при увеличении полной мощности уменьшается напряжение и увеличивается ток статора $S_{нагр}\uparrow \rightarrow U_г\downarrow,\ I_г\uparrow$.

5. Снятие внешних характеристик

Установить значение $E = U_н$. В соответствии с требуемым cos φ задать мощность блока нагрузки в виде выражений для P и Q_L/Q_C, используя известные соотношения:

$$P = S \cdot \cos\varphi;$$

$$Q = S \cdot \sin\varphi,$$

где S — изменяемая мощность от нуля до значения, при котором напряжение напряжение генератора не станет равным нулю. Фиксировать напряжение и ток, оставляя неизменными ЭДС E и характер нагрузки cos φ.

Отчет выполнить один на бригаду в соответствии с требованиями прил. 1. В нем привести общий вид синхронного генератора именно того типа и мощности, который задан для вашей бригады. Дать краткое описание конструкции, дополнив его чертежом генератора с продольным и поперечным разрезами.

Лабораторная работа № 6
Испытание синхронной машины при работе с сетью неизменного напряжения

Цель работы — изучение параллельной работы синхронной машины с сетью бесконечной мощности в режимах генератора, двигателя и компенсатора.

1. Программа работы и рекомендации по ее выполнению

1. Провести испытания по данным синхронной машины из лабораторной работы № 5 (табл. 1.1, с. 60). Принципиальная схема физической установки синхронного генератора показана на рис. 1.1. В качестве привода в ней используется двигатель постоянного тока независимого возбуждения, позволяющий имитировать паровую, газовую или гидравлическую турбину. Для изменения момента на валу при синхронной скорости регулируют ток возбуждения: при его уменьшении момент на валу увеличивается, что соответствует, например, повышению давления пара на лопатки паровой турбины. Для реализации метода точной синхронизации на физической модели используется ламповый синхроноскоп с выключателем синхронизации $В_с$.

На рисунке 1.2 приведена принципиальная схема испытания синхронного двигателя [6]. В качестве нагрузки используется генератор постоянного тока независимого возбуждения, создающий тормозной момент. Его изменяют путем регулирования тока якоря: чем он больше, тем больше тормозной момент. Генератор имитирует рабочий механизм, например, насос или вентилятор. Эта же установка позволяет провести испытание синхронного компенсатора, так как фактически это двигатель на холостом ходу.

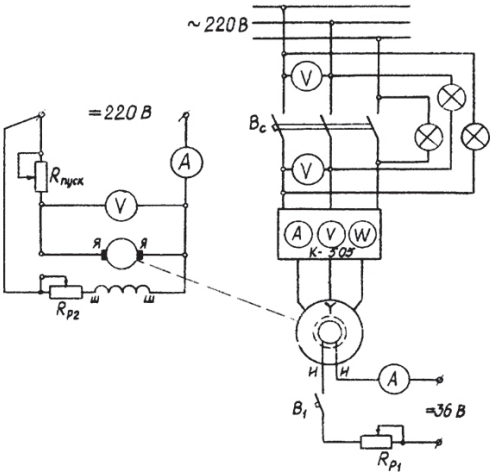


Рис. 1.1. Схема испытания трехфазного синхронного генератора при включении на параллельную работу с мощной сетью

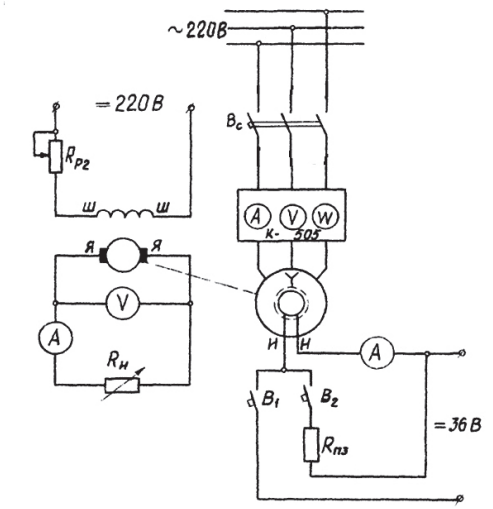


Рис. 1.2. Схема испытания трехфазного синхронного двигателя и компенсатора

2. Собрать имитационную модель синхронной машины, работающей параллельно с сетью неизменного напряжения. При выборе модели остановиться на упрощенной модели синхронной машины *Simplified Synchronous Machine* с неявнополюсным ротором (рис. 1.3). Упрощенная виртуальная модель синхронной машины не рассчитана на реализацию режимов пуска двигателя и синхронизации генератора. Поэтому все характеристики будут сниматься при строго синхронной скорости.

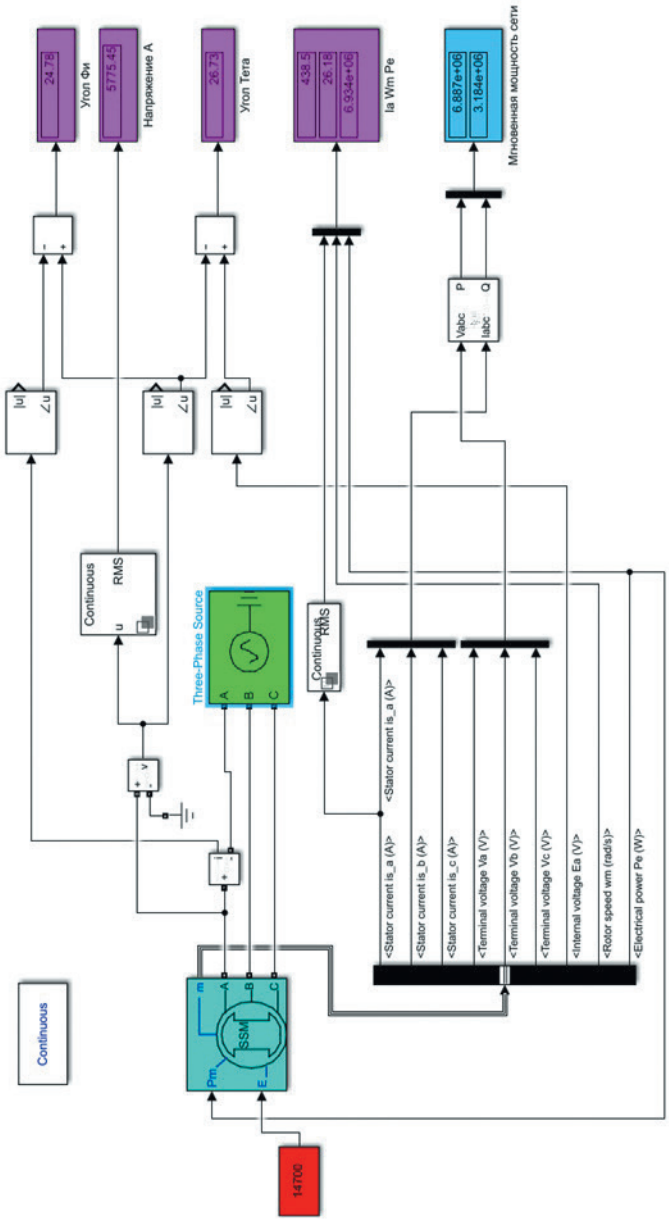


Рис. 1.3. Схема имитационной модели синхронной машины, работающей параллельно с сетью неизменного напряжения

3. Для проверки модели установите номинальный режим генератора, задавая номинальные значения активной ($P_н$) и реактивной ($Q_н$) мощностей, номинальную фазную ЭДС (E_0), синхронную частоту вращения. При этих данных ток и напряжение статора должны быть равны номинальным значениям.

4. Снять угловые характеристики активной и реактивной мощностей в зависимости от внутреннего угла Θ синхронной машины (СМ) $P = f(\Theta)$ и $Q = f(\Theta)$ при $I_в$ = const для двух вариантов:

а) при токе возбуждения холостого хода $I_в = I_{в0}$;

б) при номинальном токе возбуждения $I_в = I_{вн}$.

Характеристики снимаются в диапазоне изменения угла от −180° до +180 °С шагом 15° или 30°, охватывая режимы двигателя и генератора. Напряжение и частота сети должны быть равны номинальным значениям и поддерживаться постоянными.

Результаты представить в виде таблиц и графиков. Желательно все графики построить в одних координатных осях. Оценить влияние тока возбуждения на кратность перегрузочной способности СМ, величину реактивной мощности и внутренний угол машины. Оценить количественно по графикам их изменение при номинальном моменте и снижении тока возбуждения с номинальной величины до тока холостого хода.

Провести анализ влияния явнополюсного ротора на угловые характеристики. С этой целью выполнить аналитический расчет $P = f(\Theta)$ и $Q = f(\Theta)$ при номинальном токе возбуждения. При расчетах использовать известные аналитические зависимости, приведенные в учебном пособии [3] или в лекциях. Построить графики в общих осях (можно активные мощности в одних, реактивные в других) и дать оценку их различия для неявнополюсного и явнополюсного роторов.

5. Снять *U*-образные характеристики — зависимости тока статора от тока возбуждения $I = f(I_в)$ при постоянном моменте на валу $M_в$ = const для трех вариантов:

а) в режиме идеального холостого хода, когда $M_в = 0$;

б) при 50 % моменте в режиме генератора $M_в = 0{,}5\ M_{вн}$;

в) при номинальном моменте в режиме генератора $M_в = M_{вн}$;

г) на холостом ходу в режиме двигателя или синхронного компенсатора, когда момент на валу $M_в$ равен моменту холостого хода M_0, развиваемому синхронной машиной для преодоления сопротивления воздуха, трения в подшипниках, тормозных моментов от паразитных

магнитных полей и т. д. ($M_0 = M_в$). Этот момент можно принять равным примерно половине потерь в двигателе.

Характеристики снимаются в диапазоне изменения тока возбуждения от максимального (примерно $1{,}1I_{вн}$) и до нуля, а при нагрузке до минимально возможного тока, пока машина не выйдет из синхронизма. Напряжение и частота сети должны быть равны номинальным значениям и поддерживаться постоянными.

Построить их в одних координатных осях, указать точку номинального режима, рассчитать для нее активную, реактивную мощности, коэффициент мощности, токи статора и возбуждения. На графиках указать границу смены знака реактивной мощности, соответствующей $\cos\varphi = 1$.

Для компенсаторного режима определить величину максимальной генерируемой реактивной мощности в сеть и максимальной потребляемой реактивной мощности из сети.

6. Снять рабочие характеристики синхронного двигателя, представляющие собой зависимости тока статора, активной и реактивной мощности, коэффициента мощности от механической мощности на валу двигателя I, Q_1, $\cos\varphi = f(P_2)$ при постоянстве тока возбуждения. Эти характеристики снять для двух значений тока возбуждения: $I_в = I_{во}$ и $I_в = I_{вн}$. Двигатель нагружают такой механической мощностью, чтобы получить ток статора в диапазоне от $I = 0$ до $I = 1{,}1\ I_н$. Построить их в одних координатных осях, найти точку номинального режима и убедиться, что данные предыдущих опытов не противоречат данным рабочих характеристик.

2. Процедура проведения опытов

Помимо рассмотренных блоков в лабораторной работе № 5, текущая лабораторная работа содержит несколько новых. *Current Measurement* — амперметр, включается в цепь последовательно и передает сигнал тока. *Power* (*3ph, Instantaneous*) — вычисляет значение активной и реактивной мгновенных мощностей цепи, на вход принимает два зашифрованных сигнала — фазные напряжения и токи трех фаз. *Three-Phase Source* — трехфазный источник ЭДС, настройки его номинальных параметров в соответствии с ранее изложенными параметрами синхронной машины приведены на рис. 2.1.

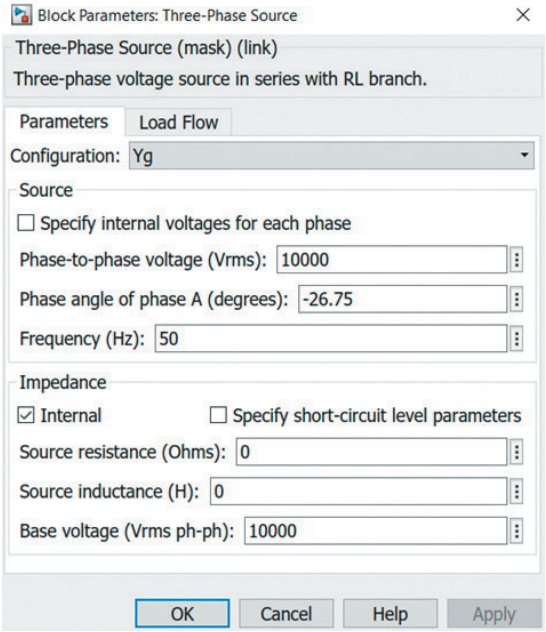


Рис. 2.1. Параметры блока *Three-Phase Source*

1. Номинальный режим генератора

В силу специфики модели выдача/потребление активной мощности регулируется путем изменения угла Θ. В свою очередь угол Θ регулируется сдвигом фаз напряжения блока *Three-Phase Source*, представляющим сеть бесконечной мощности. После задания номинального значения ЭДС, полученного в предыдущей лабораторной работе, следует подобрать такое значение Θ, чтобы активная мощность равнялась номинальной. Значение угла φ также должно быть номинальным. Модель имеет два блока отображения активной мощности. Первый — через прямой выход с блока СМ через блок *Bus Selector*; второй — через специальный блок *Power (3ph, Instantaneous)*. Значения между этими выходами могут некритично отличаться друг от друга. Реактивная же мощность снимается только одним блоком — *Power (3ph, Instantaneous)*.

2. Угловые характеристики генератора и синхронного компенсатора

Угол Θ регулируется аналогично п. 1, с. 76. Ток возбуждения регулируется путем изменения значения ЭДС при помощи характеристики холостого хода. Следует помнить, что упрощенная модель не учитывает насыщение.

3. *U*-образные характеристики

Поскольку модель не предусматривает прямого изменения момента на валу, он будет задаваться соответствующей ему активной мощностью. Активная мощность регулируется аналогично п. 1, с. 76. Ток возбуждения регулируется аналогично п. 2, с. 76. Для снятия тока статора предусмотрен соответствующий блок *Display*, на вход которого приходит действующее значение тока статора фазы *A*.

Отчет выполнить один на бригаду в соответствии с требованиями прил. 1.

Лабораторная работа № 7
Испытание генератора постоянного тока независимого возбуждения

Цель работы — изучение основных характеристик генератора постоянного тока независимого возбуждения небольшой мощности.

1. Программа работы и рекомендации по ее выполнению

1. Проведите испытания по данным машины постоянного тока (МПТ), приведенным в табл. 1.1 и соответствующим базовой серийной машине типа 2ПН132. Рассчитайте по ним номинальный ток якоря и номинальный ток возбуждения.

Таблица 1.1

Технические данные машины постоянного тока

№ варианта	$P_н$, кВт	$U_н$, В	n, об/мин	КПД, %	$R_я$, Ом	$R_в$, Ом	$L_я$, мГн	J, кг/м^2
1	2,50	220	1000	73,50	1,84	134,0	22,9	0,038
2	2,57	220	1000	73,78	1,79	134,6	22,2	0,039
3	2,64	220	1000	74,07	1,75	135,1	21,5	0,041
4	2,71	220	1000	74,35	1,70	135,7	20,8	0,042
5	2,79	220	1000	74,64	1,66	136,3	20,2	0,044
6	2,86	220	1000	74,92	1,61	136,8	19,5	0,045
7	2,93	220	1000	75,21	1,57	137,4	18,8	0,046
8	3,00	220	1000	75,50	1,52	138,0	18,1	0,048

Принципиальная схема физической установки генератора постоянного тока (ГПТ) независимого возбуждения показана на рис. 1.1 [7]. В качестве привода в ней используется шестиполюсный асинхронный двигатель, вращающий якорь ГПТ почти с номинальной частотой вращения, близкой к 1000 об/мин. Шунтовая обмотка возбуждения питается от независимого источника постоянного тока 220 В. Ток возбуждения изменяется с помощью регулировочного реостата $R_{р2}$. В качестве нагрузки используется нагрузочный реостат $R_н$. Для реализации опыта короткого замыкания этот реостат шунтируется выключателем B_1.

2. Соберите имитационную модель ГПТ с необходимыми элементами управления и сбора информации на базе MATLAB. При выборе модели остановиться на *DC Machine* из библиотеки *Simscape Electrical* (рис. 1.2).

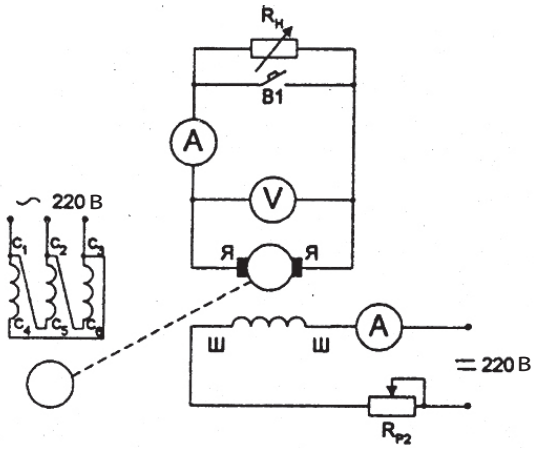


Рис. 1.1. Схема испытания ГПТ независимого возбуждения

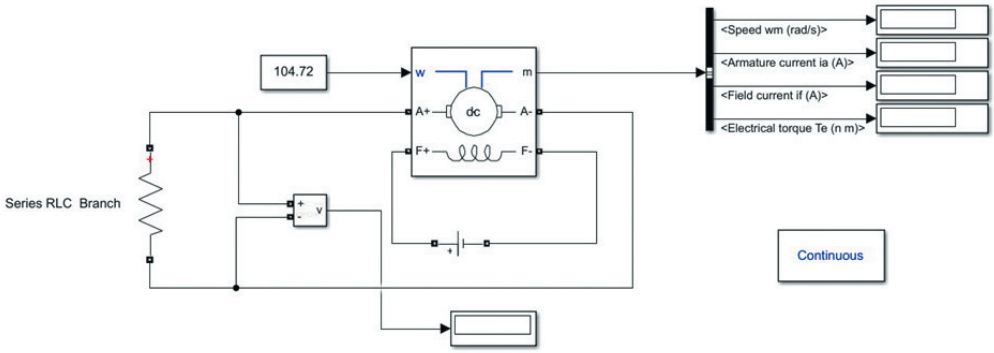


Рис. 1.2. Схема имитационной модели ГПТ независимого возбуждения

3. Подготовьте исходные данные имитационной модели и заполнить окно настройки конфигурации ГПТ (рис. 1.3) и настройки параметров ГПТ (рис. 1.4).

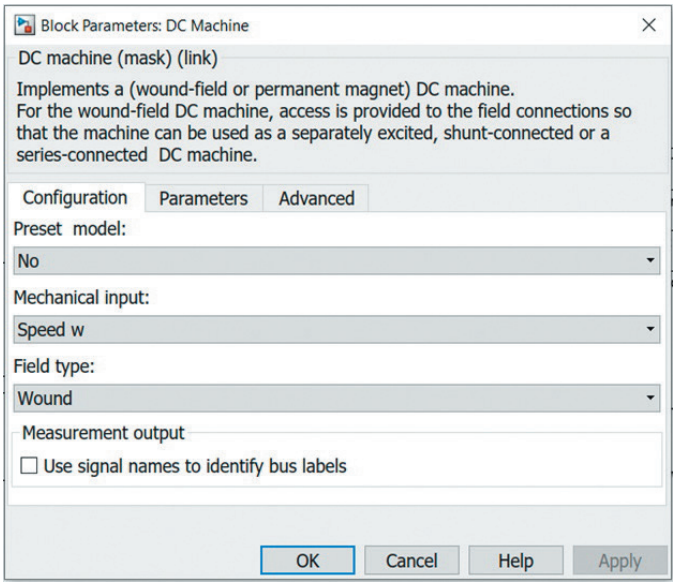


Рис. 1.3. Окно настройки конфигурации ГПТ

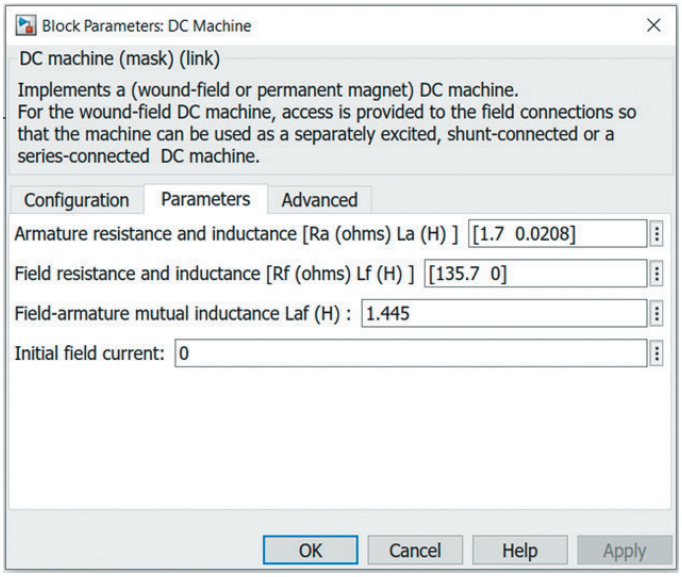


Рис. 1.4. Окно настройки параметров ГПТ

4. Для проверки модели установите номинальный режим генератора, задавая на нагрузке номинальные значения тока $I_н$ и напряжения якоря $U_н$ при номинальной частоте вращения якоря $n_н$. Запишите после установления режима величину номинального тока возбуждения $I_{вн}$. Сопоставьте его с расчетной величиной. Отличие должно быть небольшим, в пределах 5 %.

5. Постройте характеристику холостого хода, ф. е., по данным нормальной характеристики (табл. 1.2). С этой целью проведите опыт холостого хода и найдите величину тока возбуждения $I_{в0}$, соответствующего номинальному напряжения якоря.

Таблица 1.2

Нормальная характеристика холостого хода

Показатели	Значения							
$I_в$, о. е.	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5
$U_г$, о. е.	0	0,58	1,0	1,21	1,33	1,41	1,46	1,51

Выделите на графике ненасыщенную линейную часть. Рассчитайте коэффициент насыщения.

6. Проведите опыт короткого замыкания и снимите зависимость тока якоря от тока возбуждения в диапазоне от нуля до $I_{в0.}$ Постройте характеристику короткого замыкания (ХКЗ) и сделайте вывод о токах КЗ и о том, является ли этот режим аварийным.

7. Снимите две внешние характеристики ГПТ $U_г = f(I_г)$ при постоянном токе возбуждения: одну — при токе холостого хода $I_{в0}$ и другую — при номинальной величине $I_{вн}$. Постройте их на одном графике и определите посадку напряжения, %, при нагрузке ГПТ по сравнению с режимом холостого хода. Определите скачок напряжения, %, при отключении номинальной нагрузки как с учетом насыщения, так и без учета. Установите причину посадки напряжения.

8. Проведите анализ влияния величины сопротивления якоря на изменение напряжения под нагрузкой. С этой целью снимите семейство внешних характеристик при различных сопротивлениях: $R_я$, $2R_я$, $5R_я$, $10R_я$, Постройте их на одном графике и объясните отличие этих характеристик. Ток возбуждения равен току холостого хода.

9. Снимите регулировочную характеристику ГПТ при номинальном напряжении в диапазоне изменения тока якоря от нуля до номи-

нального при сопротивлении якоря $R_я$ и $2R_я$. Постройте и объясните ее характер при $R_я$.

10. Дополните отчет рисунком общего вида ГПТ и описанием принципа действия.

2. Процедура проведения опытов

Помимо ранее изученных блоков, эта лабораторная работа содержит блок *DC Machine*. Проведем краткий обзор его настроек параметров, используемых в данной работе.

Вкладка настроек параметров конфигурации машины (см. рис. 1.3) содержит три пункта. *Preset model* — предустановленная модель — позволяет выбрать одну из нескольких стандартизированных моделей МПТ. *Mechanical input* — тип входного механического сигнала — возможность выбора между частотой вращения ротора, моментом на валу машины или *Mechanical rotational port*, предназначенного для совместной работы блока *DC Machine* и какой-либо модели первичного двигателя или механической нагрузки. В рамках лабораторной работы устанавливается постоянная частота вращения генератора. *Field type* — пункт, позволяющий выбрать тип поля обмотки возбуждения. *Wound* — электромагнит; *Permanent magnet* — постоянный магнит. В текущей работе рассматривается электромагнитный тип поля катушки возбуждения.

В зависимости от выбранных конфигураций блока параметры машины также будут меняться. На рисунке 1.4 приведена вкладка настройки параметров ГПТ в соответствии с ранее выбранными конфигурациями. Первая строка содержит массив параметров обмотки якоря. На первом месте — активное сопротивление, Ом, на втором — индуктивность, Гн. Во второй строчке — аналогичные параметры для катушки возбуждения, ее индуктивность примем равной нулю. Третья строка — значение взаимной индуктивности между обмотками. Последняя строка — начальные данные тока возбуждения, которые примем равным нулю.

1. Подготовка исходных данных

Таблица 1.1 не содержит некоторых параметров, используемых при настройке блока *DC Machine*. Следует рассчитать ряд номинальных ве-

личин, на которые в процессе выполнения лабораторной работы придется опираться. Также следует пояснить, что номинальные данные представлены для двигательного режима МПТ, в то время как предметом изучения является ГПТ. Сначала рассчитаем номинальный ток обмотки возбуждения:

$$I_{\text{вн}} = \frac{U_{\text{н}}}{R_{\text{в}}}.$$

С учетом равенства номинальных напряжений обмотки возбуждения и якорной обмотки воспользуемся следующей формулой для нахождения номинального тока якоря ($\eta < 1$):

$$I_{\text{ян}} = \frac{P_{\text{н}}}{U_{\text{н}}\eta} - I_{\text{вн}}.$$

Следующий расчетный параметр — номинальное значение ЭДС обмотки якоря:

$$E_{\text{н}} = U_{\text{ян}} + I_{\text{ян}} R_{\text{я}}.$$

Расчет значения взаимной индуктивности катушек производится по следующим формулам:

$$\omega_{\text{н}} = \frac{2\pi n}{60};$$

$$L_{af} = \frac{E_{\text{н}}}{I_{\text{вн}}\omega_{\text{н}}}.$$

2. Установка номинального режима

Для ускорения процесса установки номинального режима заменим блок активного сопротивления на блок источника постоянного ЭДС *DC Voltage Source* со значением, равным величине номинального напряжения якоря. Таким образом, он характеризует напряжение на нагрузке генератора без надобности поиска подходящего значения активного сопротивления. Результаты моделирования представлены на рис. 2.1. Ток якоря следует брать по абсолютной величине. Отрицательное значение появляется вследствие принятого в блоке *DC Machine* за условное положительное направление ток двигательного режима.

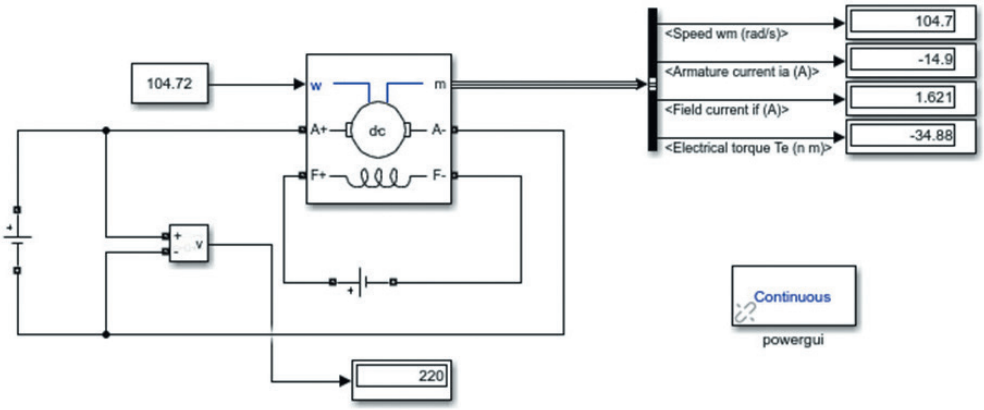


Рис. 2.1. Номинальный режим

3. Снятие характеристики холостого хода

Размыкаем обмотку якоря в соответствии со схемой на рис. 2.2. Подбираем такое сопротивление обмотки возбуждения, при котором значение напряжения на зажимах якоря станет равным номинальному. Снимаем значение тока возбуждения холостого хода $I_{в0}$, строим ХХХ по табл. 1.2, с. 81.

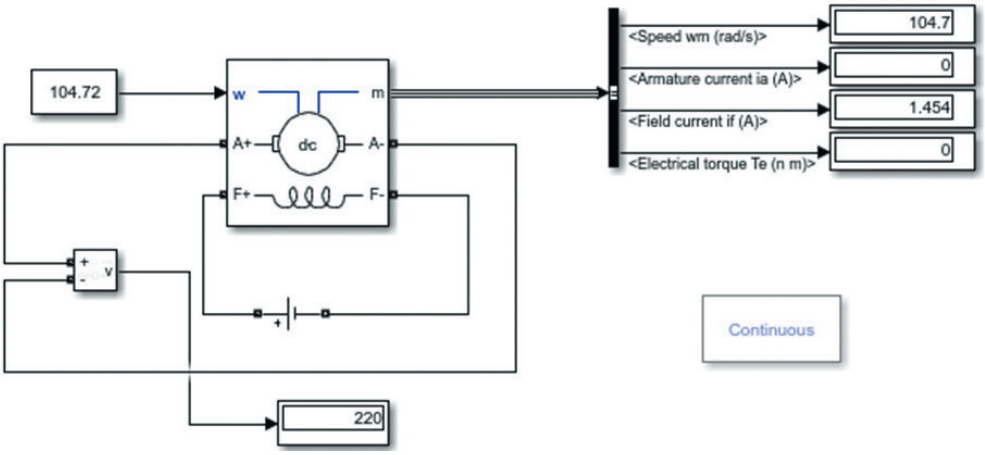


Рис. 2.2. Опыт холостого хода

4. Снятие характеристики короткого замыкания

Ток возбуждения изменяется аналогично п. 3. Для того, чтобы задать нулевой ток возбуждения, следует параметр R_f задать значени-

ем *inf*. Обмотка якоря замыкается в соответствии со схемой на рис. 2.3. Скорость двигателя также остается неизменной.

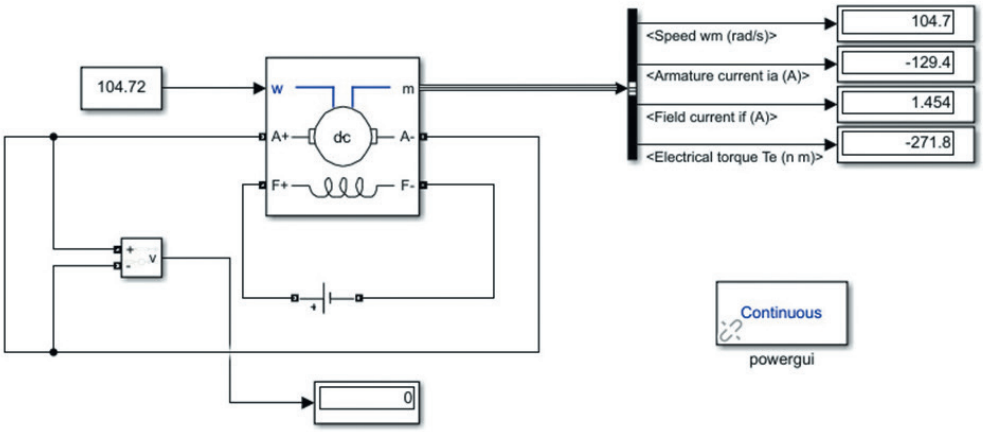


Рис. 2.3. Опыт короткого замыкания

5. Снятие внешних характеристик

Модель для снятия внешних характеристик представлена на рис. 2.4.

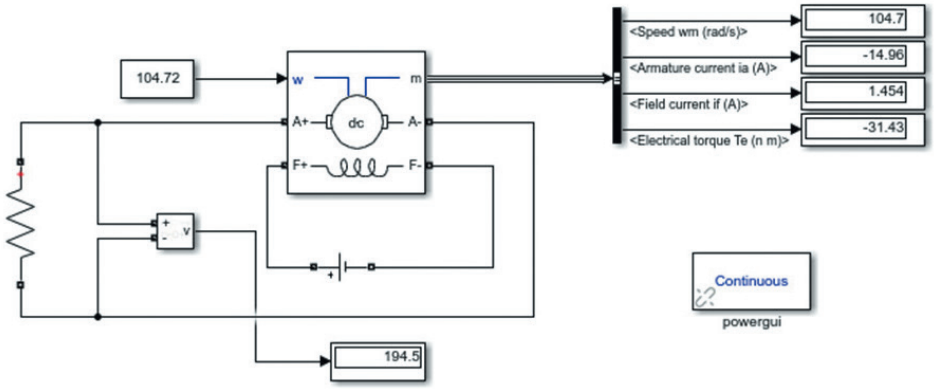


Рис. 2.4. Снятие внешних характеристик

В качестве нагрузки выступает блок *Series RLC Branch,* настройки которого отображены на рис. 2.5. Порядок снятия семейства характеристик при разных токах возбуждения следующий. Для тока возбуждения холостого хода следует идти от точки холостого хода $I_я = 0$, $U_я = 220$ В до точки номинального режима, пока ток якоря не станет

номинальным, изменяя сопротивление блока *Series RLC Branch*. Для номинального тока возбуждения следует идти обратным ходом от точки номинального режима $I_я = I_{ян}$, $U_я = U_{ян}$ до точки холостого хода, пока ток якоря не станет равным нулю.

Семейство внешних характеристик при разных сопротивлениях якоря (предварительно изменить его в параметрах блока машины) снимать при токе возбуждения холостого хода с точки номинального напряжения на холостом ходу. Снимать следует до точки $1{,}1I_{ян}$, а для больших сопротивлений — до точки КЗ, соответствующей нулевому значению напряжения.

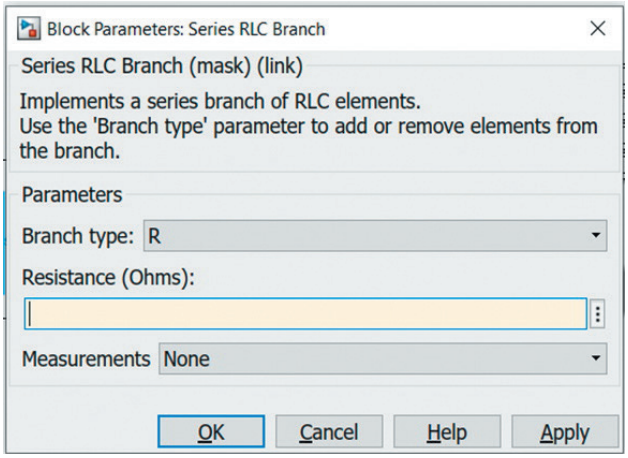


Рис. 2.5. Настройки блока *Series RLC Branch*

6. Регулировочные характеристики

Для снятия регулировочной характеристики на зажимах генератора необходимо поддерживать постоянное значение напряжения. Воспользуемся ранее описанным в п. 2, с. 83, приемом и заменим сопротивление нагрузки на источник постоянного напряжения. Выбрав точки $I_я$, для которых будет снята регулировочная характеристика, начнем изменять ток возбуждения аналогично п. 3, с. 84, добиваясь необходимых на данном этапе значений тока якоря.

Отчет выполнить один на бригаду в соответствии с требованиями прил. 1. В нем дать описание конструкции и общий вид машины постоянного тока того варианта, который используется в этой работе для вашей бригады.

Лабораторная работа № 8
Испытание двигателя постоянного тока независимого возбуждения

Цель работы — изучение основных характеристик двигателя постоянного тока независимого возбуждения небольшой мощности.

1. Программа работы и рекомендации по ее выполнению

1. Проведите испытания по данным машины постоянного тока, приведенным в табл. 1.1 лабораторной работы № 7. Принципиальная схема физической установки двигателя постоянного тока (ДПТ) независимого возбуждения показана на рис. 1.1 [7].

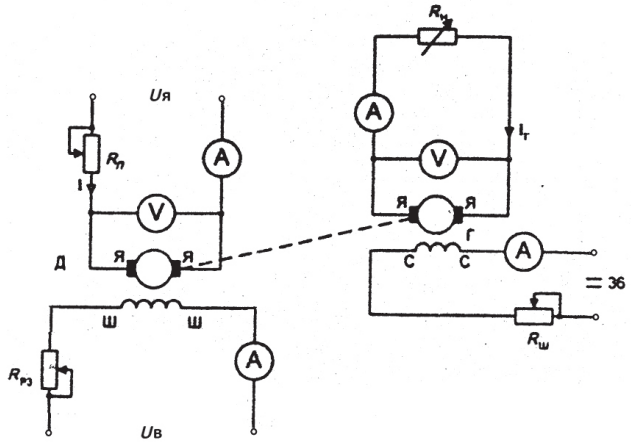


Рис. 1.1. Схема испытания двигателя постоянного тока независимого возбуждения

В качестве нагрузки в ней используется генератор постоянного тока напряжения (ГПТ) независимого возбуждения. Питание обмотки возбуждения ГПТ осуществляется от сети 36 В. Якорная обмотка ДПТ питается от сети с напряжением $U_я$, а обмотка возбуждения — от независимой сети с напряжением $U_в$. Регулирование тока возбуждения можно выполнять как изменением $U_в$, так и реостатом $R_{р3}$. В якорную цепь ДПТ последовательно включен пусковой реостат для ограничения пускового тока при пуске от полного напряжения сети.

2. Соберите имитационную модель ДПТ с необходимыми элементами управления и сбора информации на базе MATLAB. При выборе модели остановиться на *DC Machine* из библиотеки *Simscape Electrical* (рис. 1.2).

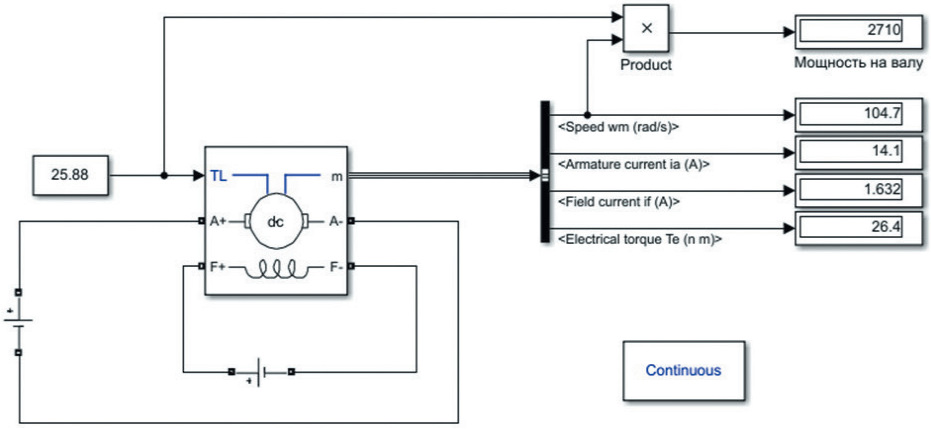


Рис. 1.2. Схема имитационной модели ДПТ независимого возбуждения

3. Подготовьте исходные данные имитационной модели и заполните окно настройки конфигурации ДПТ (рис. 1.3) и настройки параметров ДПТ (рис. 1.4).

4. Для проверки модели установите номинальный режим двигателя, задавая номинальные значения механической мощности P_2 и напряжения якоря $U_н$ при номинальной частоте вращения якоря $n_н$. Запишите после установления режима величины номинального тока возбуждения $I_{вн}$ и тока якоря $I_н$.

5. Снимите рабочие характеристики ДПТ, изменяя P_2 (или M) от нуля до 1,1 $P_{2\,н}$. Начальной точкой является точка холостого хода при начальной частоте вращения якоря равной номинальному значе-

нию 1000 об/мин. Ток возбуждения следует оставлять неизменным, равным току холостого хода.

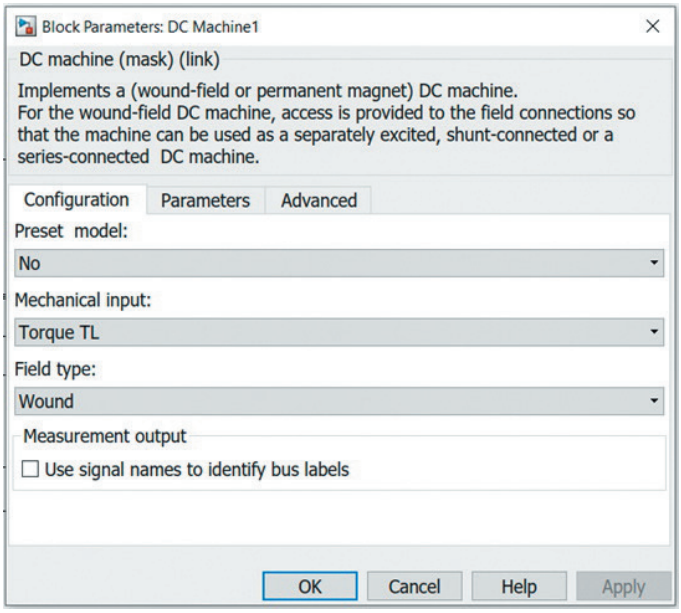


Рис. 1.3. Окно настройки конфигурации ДПТ

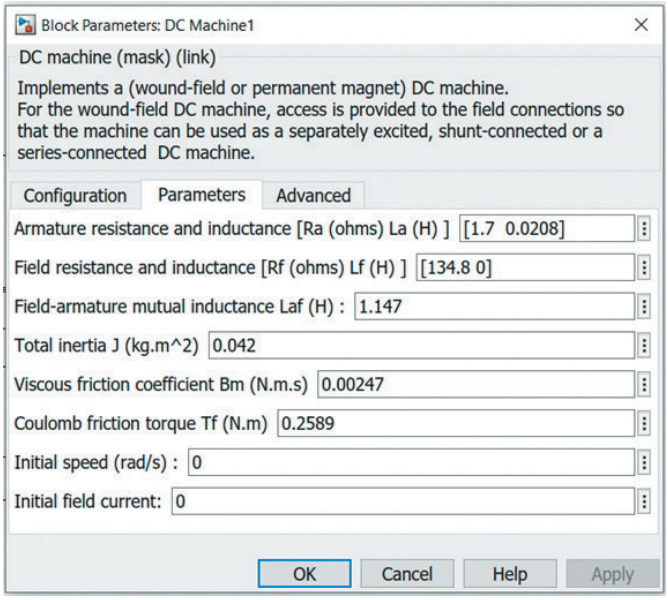


Рис. 1.4. Окно настройки параметров ДПТ

Рассчитайте в физических единицах и постройте в одних координатных осях зависимости:

$$I_я, \text{ А}; M, \text{ Нм}; P_1, \text{ Вт}; \eta, \%; n, \text{ об/мин}; P_2, \text{ Вт}.$$

Укажите на них точку номинального режима, соответствующую $P_{2н}$, и запишите все значения, соответствующие этой точке.

6. По данным п. 5 постройте естественную механическую характеристику $n = f(M)$ при токе возбуждения холостого хода. Снимите вторую характеристику при номинальном токе возбуждения и сопоставьте ее с первой.

7. Проведите анализ влияния напряжения якоря на механическую характеристику. С этой целью снимите ее, начиная с точки холостого хода ($M = 0$) и до 110 % $M_н$, при разных напряжениях $U_я$ (100 %, 80 %, 60 % $U_н$) и постоянном токе возбуждения $I_{в0}$. Постройте это семейство и дайте анализ.

8. Проведите анализ влияния тока возбуждения на механическую характеристику. С этой целью снимите ее, начиная с точки холостого хода ($M = 0$) и до 110 % $M_н$, при разных токах возбуждения $I_в$ (100 %, 80 %, 60 % $I_{в0}$) и номинальном напряжении якоря $U_{ян}$. Постройте это семейство и дайте анализ.

9. Проведите анализ влияния сопротивления якоря $R_я$ на механическую характеристику. С этой целью снимите ее, начиная с точки холостого хода ($M = 0$) и до 110 % $M_н$, при разных сопротивлениях якорной обмотки ($R_я$, $2R_я$, $4R_я$), номинальном напряжении якоря $U_{ян}$ и токе возбуждения холостого хода $I_{в0.}$ Постройте это семейство и дайте анализ.

10. Снимите регулировочную характеристику — зависимость тока возбуждения от механического момента на валу двигателя $I_в = f(M)$ при номинальном напряжении якоря. Начинайте с точки холостого хода и $n = 1000$ об/мин. Затем, увеличивая момент, изменяйте ток возбуждения так, чтобы сохранить на постоянном уровне частоту вращения якоря (1000 об/мин). Постройте эту характеристику и выясните, что нужно делать, чтобы держать скорость под нагрузкой постоянной.

2. Процедура проведения опытов

Текущая модель отличается от модели, используемой в лабораторной работе № 7, наличием блока *Product* — блока произведения двух скаляров. В данном случае он позволяет определить мощность на валу

двигателя, Вт, а также отличается конфигурацией самого блока — в качестве механического входа используется момент на валу двигателя (см. рис. 1.3). С изменением типа механического сигнала добавился ряд параметров двигателя (см. рис. 1.4): *Total inertia* — момент инерции двигателя, задается в кг·м^2 по данным таблицы вариантов,

B_m — коэффициент вязкого трения, T_f — коэффициент сухого трения. Ниже будет приведен расчет их значений.

1. Подготовка исходных данных

Аналогично лабораторной работе № 7 рассчитаем ряд значений, не приведенных в таблице исходных данных параметров. В первую очередь необходимо вычислить номинальный ток возбуждения:

$$I_{\text{вн}} = \frac{U_{\text{вн}}}{R_{\text{в}}}.$$

С учетом равенства номинальных напряжений обмотки возбуждения и якорной обмотки воспользуемся следующей формулой для нахождения номинального тока якоря ($\eta < 1$):

$$I_{\text{ян}} = \frac{P_{\text{н}}}{U_{\text{ян}}\eta} - I_{\text{вн}}.$$

Следующим расчетным параметром станет номинальное значение ЭДС обмотки якоря:

$$E_{\text{н}} = U_{\text{ян}} - I_{\text{ян}} R_{\text{я}}.$$

Расчет значения взаимной индуктивности катушек производится по следующим формулам:

$$\omega_{\text{н}} = \frac{2\pi n}{60};$$

$$L_{af} = \frac{E_{\text{н}}}{I_{\text{вн}}\omega_{\text{н}}}.$$

Значение L_{af} должно получиться меньше, чем в работе № 7.

Коэффициенты трения определяются по следующим формулам:

$$T_f = \frac{\Delta P_{\text{мех}}}{2\omega_{\text{н}}};$$

$$B_m = \frac{\Delta P_{\text{мех}}}{2\omega_{\text{н}}^2},$$

где механические потери:

$$\Delta P_{\text{мех}} = (0{,}01 - 0{,}02) \cdot P_{\text{н}}.$$

2. Номинальный режим

Исследуемый блок *DC Machine* не учитывает электромагнитных и ряд других потерь. При установлении номинального режима будем отталкиваться от двух параметров: номинальной мощности на валу и частоты вращения ротора, взятых из табл. 1.1, с. 78. Выставив расчетные значения, полученные в предыдущем пункте, необходимо отрегулировать ток возбуждения путем изменения внутреннего сопротивления обмотки возбуждения таким образом, чтобы мощность на валу двигателя и частота вращения равнялись номинальным. Ток якоря при этом уменьшится, а ток возбуждения возрастет. Пример установленного номинального режима приведен на рис. 2.1 по данным табл. 1.1, вариант 4, с. 78, лабораторная работа № 7.

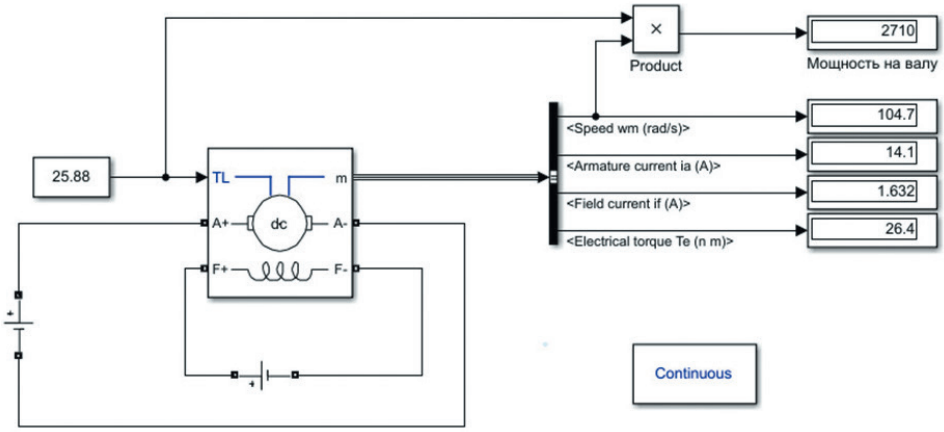


Рис. 2.1. Номинальный режим

3. Рабочие характеристики

Рекомендуется наметить ряд точек P_2 от 0 до 1,1 с шагом 0,1, при которых будут сниматься значения тока якоря, момента на валу двигателя и частота вращения. Опыт проводится при токе возбуждения холостого хода. Для получения его значения следует момент на валу двигателя задать равным нулю и подобрать такое сопротивление обмотки возбуждения, при котором частота вращения станет равна но-

минальной. Ток возбуждения холостого хода при этом будет больше номинального значения, полученного в процессе установления номинального режима. Пример схемы с установившимся режимом холостого хода приведен на рис. 2.2.

По заданию необходимо рассчитать значения P_1, n и η. Потребляемая мощность из сети рассчитывается как сумма мощности якоря и мощности возбуждения $P_1 = P_я + P_{возб}$. Частота вращения ротора рассчитывается путем перевода физических единиц рад/с в об/мин. КПД же определяется в процентах как отношение мощности на валу двигателя P_2 к полной затраченной мощности P_1.

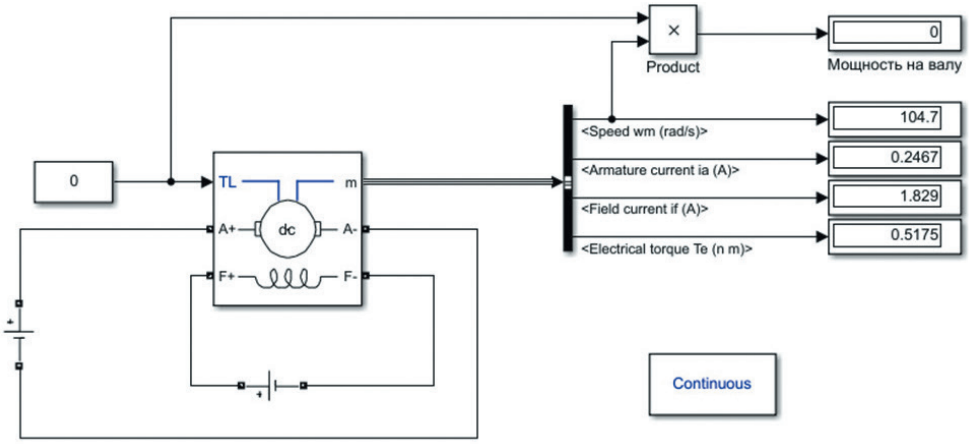


Рис. 2.2. Режим холостого хода

4. Механические характеристики

Снятие механических характеристик и сопутствующие опыты не требуют детального описания процедуры их проведения. Работа выполняется с такой же конфигурацией схемы, основываясь на указаниях в п. 2. Стоит внимательно проверять данные при переходе от снятия одного семейства к снятию другого.

5. Регулировочная характеристика

Регулировочная характеристика снимается так же, как описано в задании. Регулирование тока возбуждения осуществляется путем изменения внутреннего сопротивления обмотки возбуждения.

Отчет выполнить один на бригаду в соответствии с требованиями прил. 1.

Приложения

1. Требования к оформлению отчета

Отчет оформляется в WORD, шрифтом Times New Roman, кеглем 14. Он должен содержать: титул, название работы, цель, исходные данные, схему объекта, порядок выполнения, табличные данные эксперимента, графики, выводы, устройство и принцип действия объекта, фамилию ответственного за оформление. Отчет выкладывается в Teams. Файлы с отчетом следует отправлять под именем «ЛР №..., Подгруппа №..., Фамилия ответственного за оформление». Преподаватель оценивает качество оформления и содержательную часть отчета, при необходимости использует обратную связь с членами подгруппы и в конце лабораторного практикума выставляет интегральную оценку в целом за все работы.

Далее дается краткое описание отдельных разделов отчета, сходных по содержанию для отчетов при выполнении физических экспериментов [9].

Название и цель работы даются в описании работы.

Программа испытаний записывается в строгой последовательности по пунктам, кратко и лаконично без описания методики проведения опытов, но с указанием условий и порядком их выполнения.

Основные требования к оформлению отчета соответствуют ГОСТу 7.32–2017. Схемы опытов выполняются графическим редактором в соответствии с ГОСТ «Обозначения условные графические в схемах».

Номинальные данные приводятся только того силового оборудования, которое соответствует варианту задания данной бригады.

Расчетные и данные вычислительного эксперимента заносятся в таблицы отчета в тех физических единицах, которые будут использовать-

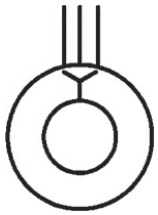
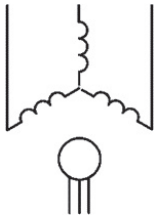
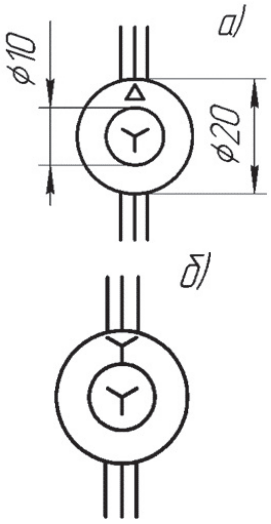
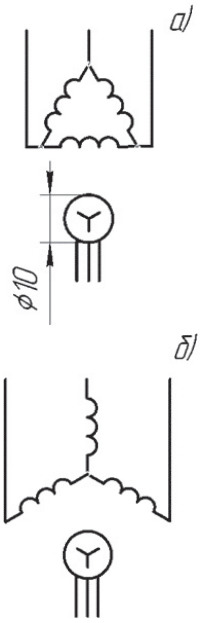
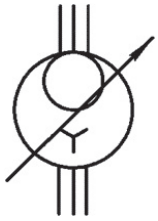
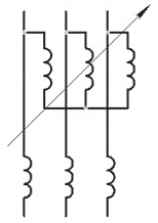
ся при построении графиков. Таблицы являются числовым представлением графиков.

Графики выполняются так же, как и схемы опытов, с использованием графических редакторов, и вставляются прямо по тексту. На них должна быть нанесена равномерная масштабная сетка с отсчетом по осям координат, начиная с нуля. Разрыв осей и шкал на графиках недопустим. Наименование величин проставляется внутри координат, а их размерность и численные значения — снаружи координат. Через полученные в опыте точки проводится плавная кривая, занимающая среднее положение или охватывающая наибольшее количество точек. В целях сопоставления и объяснения характера кривых допускается строить несколько кривых в одних координатных осях, при этом следует выделять точки, относящиеся к разным кривым специальным знаком (например, □, ○, Δ,*, • и т. д.). Название графика, поясняющий текст и номер рисунка должны быть снизу.

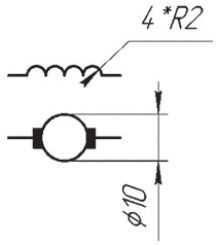
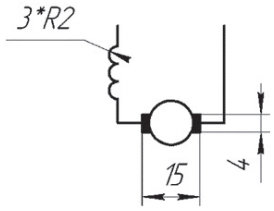
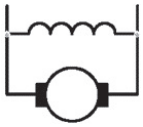
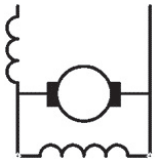
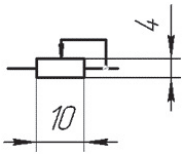
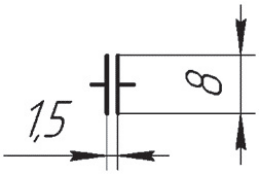
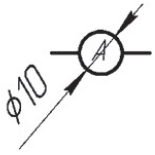
Расчеты выполняются в том случае, если они предусмотрены программой работы. Не следует в отчете приводить тривиальные расчеты, например, по переводу данных в физические единицы, т. е. таких, какие специально не оговариваются программой. При оформлении расчетной части сначала приводится формула, затем проставляются численные значения всех величин, входящих в формулу и только тогда дается результат с обязательным указанием размерности.

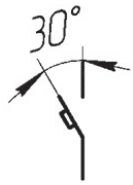
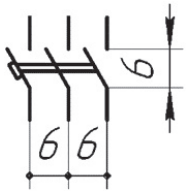
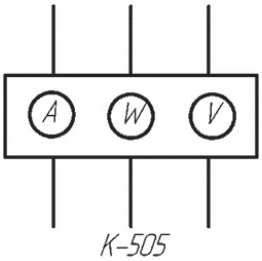
Выводы по работе являются обязательными. Их содержание должно вскрывать природу исследуемых явлений, объяснять характер процессов и устанавливать взаимосвязь между различными параметрами и величинами. Следует избегать описательного характера выводов, который обычно на словах повторяет графическую зависимость и констатацию известных фактов.

2. Обозначения условные графические (извлечения из ГОСТ 2722–68, 2.723–68, 2.755–74, 2.732–68, 2.729–68)

№	Наименование	Обозначение		Примечание
		Форма 1	Форма 2	
1	Машина асинхронная трехфазная с короткозамкнутым ротором, обмотка статора соединена в «звезду»			–
2	Машина асинхронная трехфазная с фазным ротором, обмотки которого соединена в звезду; обмотка статора соединена: а) в «треугольник»; б) «звезду»			Диаметр статора 20 мм; диаметр ротора 10 мм; радиус закругления в изображении обмотки 3 мм
3	Потенциал-регулятор (индукционный регулятор)			Стрелка изображается под углом 45°

№	Наименование	Обозначение		Примечание
		Форма 1	Форма 2	
4	Фазорегулятор			–
5	Машина синхронная трехфазная явнополюсная с обмоткой возбуждения и с пусковой короткозамкнутой обмоткой на роторе; обмотка статора соединена в «звезду»	ϕ6 ϕ10		Диаметр пунктирной окружности 10 мм; малой сплошной 6 мм
6	Трансформатор трехфазный с ферромагнитным сердечником; соединение обмотки «звезда-звезда»	ϕ10		–
7	Трансформатор трехфазный с ферромагнитным сердечником; соединение обмоток «звезда» с выведенной нейтральной точкой — «треугольник»			–

№	Наименование	Обозначение		Примечание
		Форма 1	Форма 2	
8	Машина постоянного тока с независимым возбуждением			–
9	Машина постоянного тока с последовательным возбуждением			–
10	Машина постоянного тока с параллельным возбуждением			–
11	Машина постоянного тока со смешанным возбуждением			–
12	Резистор переменный (реостат)			–
13	Конденсатор постоянной емкости			–
14	Прибор измерительный (амперметр)			–

№	Наименование	Обозначение		Примечание
		Форма 1	Форма 2	
15	Выключатель однополюсный автоматический		–	–
16	Выключатель трехполюсный автоматический		–	–
17	Прибор комбинированный К-505		–	–

3. Образец отчета лабораторной работы

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина»
Уральский энергетический институт
Кафедра электротехники

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

ОТЧЕТ
по лабораторной работе

Руководитель, доц., канд. техн. наук Н. Н. Новиков
Бригада № 1 М. Шакиров
Гр.ЭН-300000 В. Биргалин
В. Куликова
Д. Рыженко
Е. Филиппенко

Екатеринбург, 2022

ИСПЫТАНИЕ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Цель работы — изучение основных характеристик двигателя постоянного тока независимого возбуждения небольшой мощности.

Исходные данные

$P_н$, кВт	$U_я$, В	n, об/мин	η, %	$R_я$, Ом	$R_в$, Ом	$L_я$, мГн
2,64	220	1000	74,07	1,75	135,1	21,5

Принципиальная схема физической установки двигателя постоянного тока (ДПТ) независимого возбуждения показана на рисунке 1.

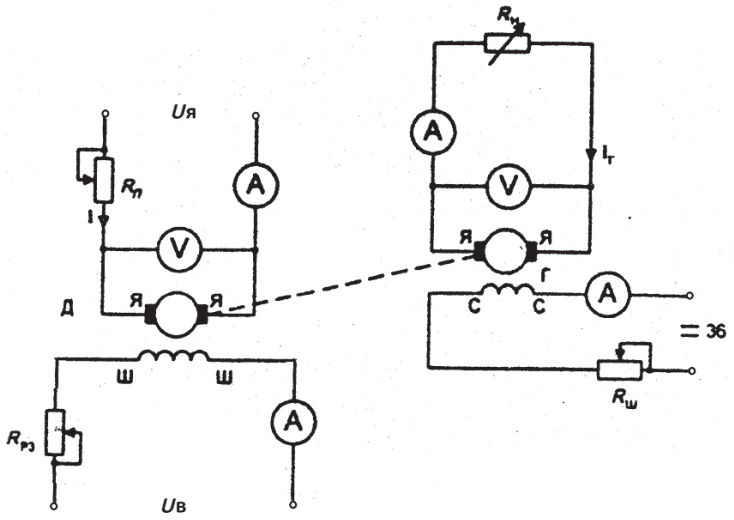


Рисунок 1 — Принципиальная схема ДПТ независимого возбуждения

В качестве нагрузки в ней используется генератор постоянного тока независимого возбуждения. Питание обмотки возбуждения ГПТ осуществляется от сети 36 В. Якорная обмотка ДПТ питается от сети с напряжением $U_я$, а обмотка возбуждения — от независимой сети с напряжением $U_в$. Регулирование тока возбуждения можно выполнять как изменением $U_в$, так и реостатом $R_{рз}$. В якорную цепь ДПТ последовательно включен пусковой реостат для ограничения пускового тока при пуске от полного напряжения сети.

Будем использовать имитационную модель ДПТ с необходимыми элементами в программе MATLAB. Схема представлена на рисунке 2.

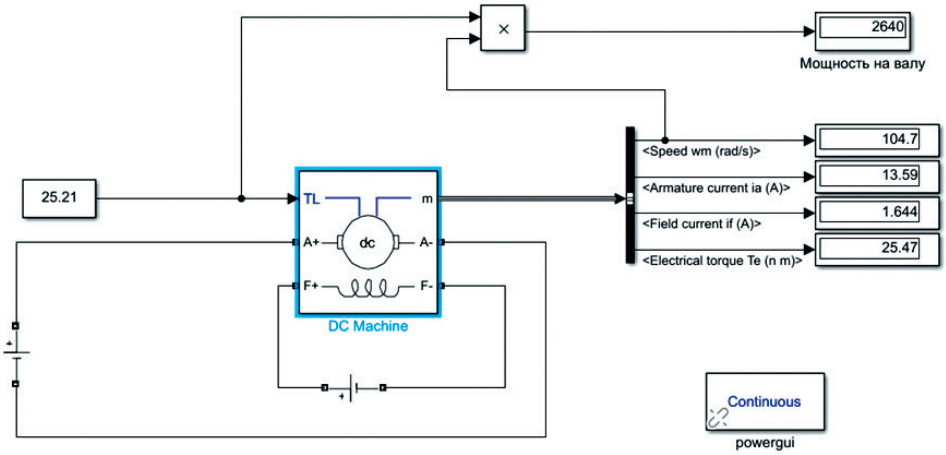


Рисунок 2 — Имитационная модель ДПТ независимого возбуждения

Порядок выполнения:

1. Описать устройство и принцип действия двигателя постоянного тока независимого возбуждения.
2. Подготовить исходные данные.
3. Построить имитационную модель и проверить номинальный режим.
4. Снять рабочие характеристики. Построить зависимости

$$I_я,\ M,\ P_1,\ \eta,\ n = f(P_2).$$

5. Построить механическую характеристику $n = f(M)$ при токе возбуждения холостого хода $I_{в0}$ и при номинальном токе возбуждения $I_{вн}$.
6. Снять и построить семейство механических характеристик при различных напряжениях якоря $U_я$ (100 %, 80 %, 60 %).
7. Снять и построить семейство механических характеристик при разных токах возбуждения $I_в$ (100 %, 80 %, 60 %).
8. Снять и построить семейство механических характеристик при разных сопротивлениях якоря ($R_я$, $2R_я$, $4R_я$).
9. Снять и построить регулировочную характеристику.

1. Устройство и принцип действия двигателя постоянного тока независимого возбуждения

Электродвигатель постоянного тока (ДПТ) — электрическая машина постоянного тока, преобразующая электрическую энергию постоянного тока в механическую энергию (рисунок 3).

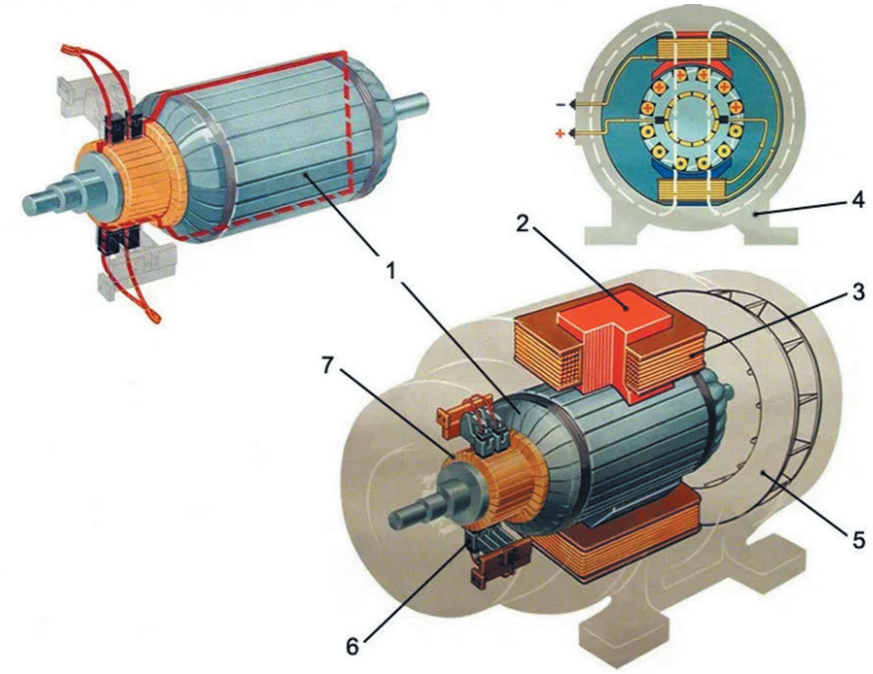


Рисунок 3 — Электродвигатель постоянного тока:
1 — якорь; 2 — сердечник полюса; 3 — обмотка полюса; 4 — статор; 5 — вентилятор; 6 — щетки; 7 — коллектор

Принцип действия электродвигателя постоянного тока основывается на взаимодействии магнитных полей рамки и самого магнита.

Вместо рамки в двигателе используется многовитковая обмотка якоря, на которую подается ток от сети постоянного напряжения. При запуске возбуждается магнитное поле, взаимодействующее с полем обмотки возбуждения (ОВ). В результате возникает электромагнитный момент, под действием которого ротор приводится во вращение

Основу двигателя составляют статор (индуктор) — неподвижная часть, и якорь с щеточно-коллекторным узлом — подвижная часть.

В состав статора входят станина, являющаяся элементом магнитной цепи, а также главные и добавочные полюса. Обмотки возбуждения, необходимые для создания магнитного поля, находятся на главных полюсах. Специальная обмотка, улучшающая условия коммутации, расположена на добавочных полюсах.

Якорь представляет собой узел, состоящий из магнитной системы, обмотки якоря и коллектора, который подводит постоянный ток к обмотке.

Коллектор имеет вид цилиндра, собранного из изолированных медных пластин и прижатых к нему неподвижных щеток. Он насажен на вал двигателя и имеет выступы, с которыми соединяются концы секций обмотки якоря.

2. Подготовка исходных данных

Рассчитаем ряд значений, не приведенных в таблице исходных данных.

— номинальный ток возбуждения, А:

$$I_{\text{вн}} = \frac{U_{\text{вн}}}{R_{\text{в}}} = \frac{220}{135{,}1} = 1{,}628;$$

— номинальный ток якоря, А:

$$I_{\text{ян}} = \frac{P_{\text{н}}}{U_{\text{ян}}\eta} - I_{\text{вн}} = \frac{2640}{220 \cdot 0{,}74} - 1{,}628 = 14{,}573;$$

— номинальное значение ЭДС обмотки якоря, В:

$$E_{\text{н}} = U_{\text{ян}} - I_{\text{ян}} R_{\text{я}} = 220 - 14{,}573 \cdot 1{,}75 = 194{,}5;$$

— взаимная индуктивность катушек, Гн:

$$L_{af} = \frac{E_{\text{н}}}{I_{\text{вн}}\omega_{\text{н}}} = \frac{194{,}5}{1{,}628 \cdot 107{,}72} = 1{,}14;$$

— механические потери, Вт:

$$P_{\text{мех}} = 0{,}02 P_{\text{н}} = 0{,}02 \cdot 2640 = 39{,}6;$$

— коэффициенты трения

$$T_f = \frac{P_{\text{мех}}}{2\omega_{\text{н}}} = \frac{39{,}6}{2 \cdot 107{,}72} = 0{,}189;$$

$$B_m = \frac{P_{\text{мех}}}{2\omega_{\text{н}}^{\ 2}} = \frac{39{,}6}{2 \cdot 107{,}72^2} = 0{,}0018;$$

— номинальный момент, Нм:

$$M = \frac{P_н}{\omega_н} = \frac{2640}{107,72} = 25,21.$$

3. Построение имитационной модели и проверка номинального режима

Для проверки модели установим номинальный режим двигателя, задавая номинальные значения механической мощности P_2 и напряжения якоря $U_н$ при номинальной частоте вращения якоря $n_н$. При этом необходимо отрегулировать ток возбуждения путем изменения внутреннего сопротивления ОВ таким образом, чтобы мощность на валу двигателя и частота вращения равнялись номинальными.

Таким образом, установим номинальный моменты на валу, равный 25,21 Нм. Путем изменения сопротивления ОВ до значения $R_в$ = = 133,85 Ом получаем номинальную мощность на валу двигателя и частоту вращения.

На рисунке 4 представлен номинальный режим двигателя.

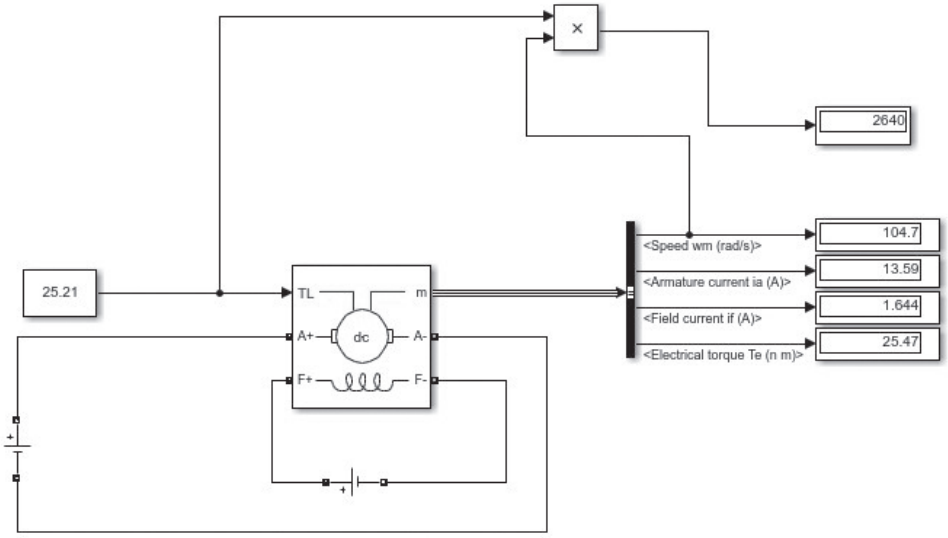


Рисунок 4 — Номинальный режим двигателя

4. Снятие рабочих характеристик

При снятии рабочих характеристик необходимо изменять P_2 от 0 до 1,1 $P_{2н}$. Начальной точкой является точка холостого хода при начальной частоте вращения якоря равной номинальному значению 1000 об/мин. При этом ток возбуждения должен оставаться неизменным, равным току холостого хода.

Точку холостого хода получаем при заданном значении механической мощности $P_2 = 0$ и подбором сопротивления ОВ таким образом, чтобы частота вращения стала равна номинальному значению, то есть 104,7 рад/с.

Как видно из рисунка 5, ток возбуждения холостого хода равен $I_{в0} = 1{,}841$ А.

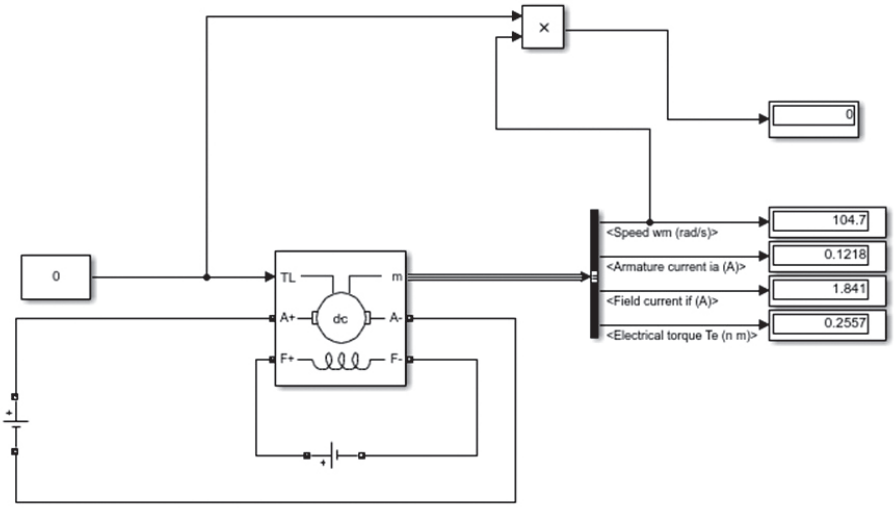


Рисунок 5 — Холостой ход двигателя

Необходимо рассчитать значения P_1, Вт, n, η

$$P_1 = P_я + P_{возб},$$

где $P_я = U_{ян} I_я$, $P_{возб} = U_{вн} I_{в0}$.

Скорость вращения ротора рассчитывается путем перевода рад/с в об/мин.

$$n = \frac{30\omega_н}{\pi}, \text{ об/мин.}$$

КПД определяется в процентах как отношение мощности на валу двигателя P_2 к полной затраченной мощности P_1.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}, \%.$$

Результаты опыта представлены в таблице 1.

Таблица 1 — Рабочие характеристики в физических величинах

P_2, Вт	M, Нм	$\Omega_н$, рад/с	n, об/мин	$I_я$, А	$P_я$, Вт	$P_{возб}$, Вт	P_1, Вт	η, %
0	0	104,7	999,81	0,12	26,84	405,02	431,86	0,00
264	2,55	103,7	990,26	1,34	293,92	405,02	698,94	37,77
528	5,15	102,7	980,71	2,57	566,28	405,02	971,30	54,36
792	7,79	101,6	970,21	3,83	843,04	405,02	1248,06	63,46
1056	10,5	100,6	960,66	5,12	1126,84	405,02	1531,86	68,94
1320	13,27	99,45	949,68	6,44	1417,24	405,02	1822,26	72,44
1584	16,11	98,33	938,98	7,79	1714,68	405,02	2119,70	74,73
1848	19	97,18	928,00	9,17	2017,62	405,02	2422,64	76,28
2112	22	95,99	916,64	10,60	2332,00	405,02	2737,02	77,16
2376	25,1	94,76	904,89	12,08	2657,60	405,02	3062,62	77,58
2640	28,23	93,51	892,95	13,57	2985,40	405,02	3390,42	77,87
2904	31,49	92,42	882,55	15,12	3326,40	405,02	3731,42	77,83

Для построения в одних координатных осях необходимо перевести значения, представленные в таблице 1, в относительные единицы. В качестве базисных величин примем данные из опыта номинального режима.

Таблица 2 — Рабочие характеристики в относительных единицах

P_2	M	$I_я$	P_1	n	η
0,00	0,00	0,01	0,13	1,00	0,00
0,10	0,10	0,10	0,21	0,99	0,48
0,20	0,20	0,19	0,29	0,98	0,69
0,30	0,31	0,28	0,37	0,97	0,81
0,40	0,41	0,38	0,46	0,96	0,88

Окончание табл. 2

P_2	M	$I_я$	P_1	n	η
0,50	0,52	0,47	0,54	0,95	0,92
0,60	0,63	0,57	0,63	0,94	0,95
0,70	0,75	0,67	0,72	0,93	0,97
0,80	0,86	0,78	0,82	0,92	0,98
0,90	0,99	0,89	0,91	0,91	0,98
1,00	1,11	1,00	1,01	0,89	0,99
1,10	1,24	1,11	1,11	0,88	0,99

Построить зависимости в о.е. $I_я$, M, P_1, η, $n = f(P_2)$ (рисунок 6).

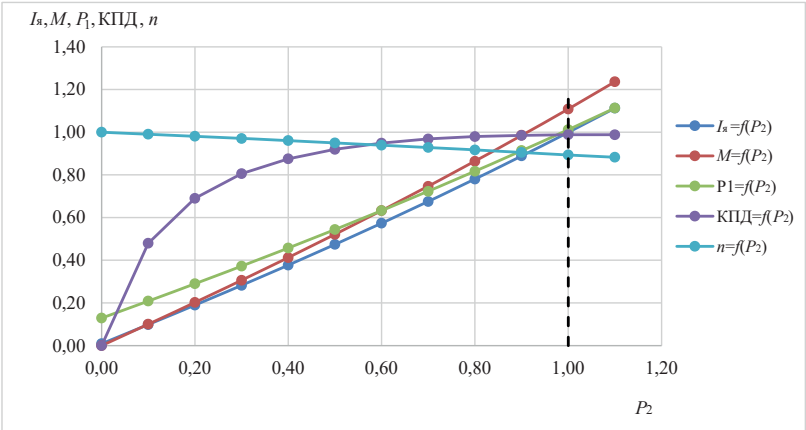


Рисунок 6 — Пример построения графика зависимости $I_я$, M, P_1, η, $n = f(P_2)$

Точке номинального режима на рисунке 6 соответствуют значения в ф. е.: $P_{2н} = 2640$ Вт, $M = 28{,}23$ Нм, $\omega_н = 93{,}51$ рад/с, $n = 892{,}95$ об/мин, $I_я = 13{,}57$ А, $P_я = 2985{,}4$ Вт, $P_{возб} = 405{,}2$ Вт, $P_1 = 3390{,}42$ Вт, η = 77,87 %. Эти же значения представлены в таблице 1 — Рабочие характеристики в физических единицах.

5. Снятие механических характеристик

1. Построить механическую характеристику $n = f(M)$ при токе возбуждения холостого хода и при номинальном токе возбуждения.

Данные представлены в таблице 3 для построения механической характеристики для тока возбуждения холостого хода, равного $I_{в0} = 1{,}841\,А$.

Таблица 3 — Механическая характеристика $n = f(M)$ при $I_{в0} = 1{,}841$ А

P_2, Вт	M, Н·м	$\omega_н$, рад/с	n, об/мин
0	0,00	104,7	999,81
264	2,55	103,70	990,26
528	5,15	102,70	980,71
792	7,79	101,60	970,21
1056	10,50	100,60	960,66
1320	13,27	99,45	949,68
1584	16,11	98,33	938,98
1848	19,00	97,18	928,00
2112	22,00	95,99	916,64
2376	25,10	94,76	904,89
2640	28,23	93,51	892,95
2904	31,49	92,42	882,55

Вторую характеристику необходимо снять при номинальном токе возбуждения, для этого необходимо выставить сопротивление ОВ, равное $R_в = 135{,}1$ Ом. Данные опыта при номинальном токе возбуждения представлены в таблице 4.

Таблица 4 — Механическая характеристика $n = f(M)$ при $I_{в0} = 1{,}628$ А

P_2, Вт	M, Н·м	$\omega_н$, рад/с	n, об/мин
0	0,00	118,40	1130,64
264	2,25	117,20	1119,18
528	4,55	116,10	1108,67
792	6,90	114,80	1096,26
1056	9,29	113,70	1085,76
1320	11,74	112,40	1073,34

Окончание табл. 4

P_2, Вт	M, Н·м	$\omega_н$, рад/с	n, об/мин
1584	14,25	111,10	1060,93
1848	16,83	109,80	1048,51
2112	19,47	108,50	1036,10
2376	22,18	107,10	1022,73
2640	24,98	105,70	1009,36
2904	27,86	104,20	995,04

На рисунке 7 представлены механические характеристики при токе возбуждения ХХ и при номинальном токе возбуждения.

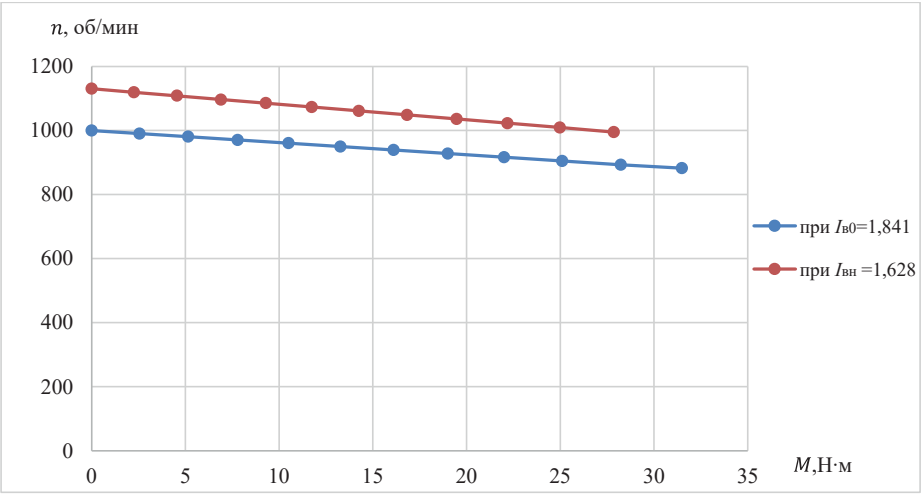


Рисунок 7 — График механических характеристик при токе возбуждения холостого хода и при номинальном токе возбуждения

2. Снять и построить семейство механических характеристик при различных напряжениях якоря $U_я$ (100 %, 80 %, 60 %)

Для анализа влияния напряжения якоря на механическую характеристику начинаем снимать ее с точки ХХ (М=0) и до 110 % $M_н$ при разных напряжениях $U_я$ (100 %, 80 %, 60 %) и постоянном токе возбуждения холостого хода $I_{в0}$.

Для поддержания постоянным ток возбуждения ХХ установим сопротивление ОВ $R_в$ = 119,5 Ом. Таким образом, при проведении данного опыта будем выставлять напряжения якоря, равное $U_я$, 0,8 $U_я$, 0,6 $U_я$ соответственно.

Значения механической характеристики при напряжении якоря $U_я$ =100 % соответствуют значениям, приведенным в таблице 3.

Данные опыта представлены в таблице 5 при 80 % напряжении якоря, то есть при 176 В.

Таблица 5 — Механические характеристики при $U_я$ = 80 %

P_2, Вт	*M,* Н·м	$\omega_н$, рад/с	*n,* об/мин
0	0	83,77	799,95
264	3,20	82,50	787,82
528	6,51	81,18	775,21
792	9,92	79,83	762,32
1056	13,47	78,42	748,86
1320	17,15	76,96	734,91
1584	21,00	75,43	720,30
1848	25,03	73,83	705,02
2112	29,27	72,14	688,89

Данные опыта представлены в таблице 6 при 60 % напряжении якоря, то есть при 132 В.

Таблица 6 — Механическая характеристика при $U_я$ = 60 %

P_2, Вт	*M,* Н·м	$\omega_н$, рад/с	*n,* об/мин
0	0,5	62,61	598,26
264	4,32	61,10	583,46
528	8,91	59,28	566,08
792	13,82	57,33	547,46
1056	19,12	55,22	527,31
1320	24,96	52,90	505,16
1584	29,48	50,31	480,43

На рисунке 8 представлено семейство механических характеристик при различных напряжениях $U_я$ и постоянном токе возбуждения ХХ $I_{в0}$.

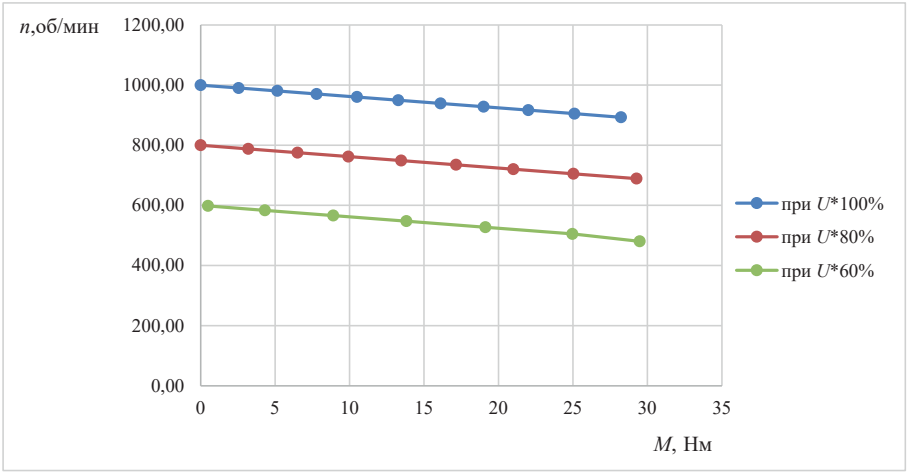


Рисунок 8 — Семейство механических характеристик при различных напряжениях якоря

Таким образом, с уменьшением напряжения якоря частота вращения его уменьшается, что подтверждается уравнением механической характеристики:

$$n = \frac{U_с}{C_e \Phi} - \frac{IR_я M_e}{C_e C_m \Phi^2}.$$

При этом жесткость механических характеристик практически на меняется, поэтому таким способом можно регулировать частоту вращения от номинальной до нуля.

3. Снять и построить семейство механических характеристик при разных токах возбуждения $I_в$ (100 %, 80 %, 60 %)

Для анализа влияния тока возбуждения на механическую характеристику начинаем снимать ее с точки холостого хода ($M = 0$) и до 110 % $M_н$, при разных токах возбуждения $I_в$ (100 %, 80 %, 60 % $I_{в0}$) и номинальном напряжении якоря $U_{ян}$.

Напряжение якоря выставляем номинальным, то есть равным 220 В. Ток возбуждения будем изменять за счет изменения сопротивления возбуждения.

Значения механической характеристики при токе возбуждения $I_в = 100$ % соответствуют значениям, приведенным в таблице 3.

Для 80 % тока возбуждения произведем расчет:

$$(0,8)I_{в} = 0,8\ I_{в0} = 0,8 \cdot 1,841 = 1,473\,А.$$

Как видно из расчета, ток возбуждения необходимо постоянно поддерживать, равным 1,473 А. Следовательно, найдем сопротивление ОВ, при котором поддерживается ток:

$$R_{в}(0,8) = \frac{U}{0,8I_{в}} = \frac{220}{1,473} = 149,36\ Ом;$$

Таким образом, для проведения данного опыта установим сопротивление ОВ, равным $0,8R_{в} = 149,36$ Ом.

Данные опыта при 0,8 $I_{в0}$ представлены в таблице 7.

Таблица 7 — Механическая характеристика при $I_{в}$ = 80 %

P_2, Вт	M, Н·м	$\omega_{н}$, рад/с	n, об/мин
0	0,00	130,90	1250,00
264	2,04	129,60	1237,59
528	4,12	128,30	1225,17
792	6,23	127,00	1212,76
1056	8,41	125,70	1200,35
1320	10,62	124,30	1186,98
1584	12,89	122,90	1173,61
1848	15,22	121,40	1159,28
2112	17,61	119,90	1144,96
2376	20,06	118,40	1130,64
2640	22,59	116,90	1116,31
2904	25,20	115,20	1100,08

Для 60 % тока возбуждения получаем:

$$I_{в}(0,6) = 0,6I_{в0} = 0,6 \cdot 1,841 = 1,1\,А;$$

Следовательно, сопротивление ОВ равно:

$$0,6R_{в} = \frac{U}{0,6I_{в}} = \frac{220}{1,1} = 199,167\ Ом;$$

Данные опыта при 0,6 $I_{в0}$ представлены в таблице 8.

Таблица 8 — Механическая характеристика при $I_в = 60\,\%$

P_2, Вт	M, Н·м	$\omega_н$, рад/с	n, об/мин
0	0	174,3	1664,44
264	1,529	172,7	1649,16
528	3,088	171	1632,93
792	4,68	169,2	1615,74
1056	6,31	167,4	1598,55
1320	7,97	165,6	1581,36
1584	9,675	163,7	1563,22
1848	11,425	161,8	1545,08
2112	13,22	159,8	1525,98
2640	16,96	155,7	1486,83
2904	18,92	153,5	1465,82

На рисунке 9 представлено семейство механических характеристик при разных токах возбуждения.

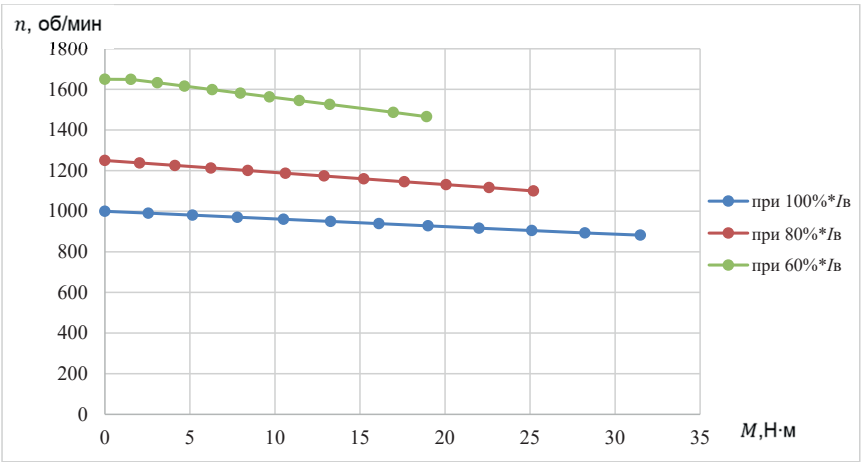


Рисунок 9 — Семейство механических характеристик при разных токах возбуждения

Таким образом, видно, что при уменьшении тока возбуждения, а следовательно, увеличении сопротивления $R_в$, поток Ф уменьшается, и частота вращения растет.

4. Снять и построить семейство механических характеристик при разных сопротивлениях якоря ($R_я$, $2R_я$, $4R_я$).

Для анализа влияния сопротивления якоря $R_я$ на механическую характеристику начинаем снимать ее с точки холостого хода ($M = 0$) и до 110% $M_н$, при разных ($R_я$, $2R_я$, $4R_я$), номинальном напряжении якоря и токе возбуждения холостого хода.

Данные опыта при сопротивлении якоря $R_я$ = 1,75 Ом представлены в таблице 3.

Данные опыта при выставлении $R_я$ = 2·1,75 = 3,5 Ом представлены в таблице 9.

Таблица 9 — Механическая характеристика при сопротивлении якоря 3,5 Ом

P_2, Вт	M, Н·м	$\omega_н$, рад/с	n, об/мин
52,11	0,5	104,2	995,04
264	2,57	102,60	979,76
528	5,26	100,40	958,75
792	8,07	98,22	937,93
1056	11,01	95,88	915,59
1320	14,13	93,40	891,90
1584	17,45	90,77	866,79
1848	21,02	87,93	839,67
2112	24,88	84,87	810,45
2640	34,02	77,61	741,12
2904	39,75	73,07	697,77

Данные опыта при выставлении $R_я$ = 4·1,75 = 7 Ом представлены в таблице 10.

Таблица 10 — Механическая характеристика при сопротивлении якоря 7 Ом

P_2, Вт	M, Н·м	$\omega_н$, рад/с	n, об/мин
51,81	0,5	103,6	989,31
264	2,63	100,20	956,84

Окончание табл. 10

P_2, Вт	M, Н·м	$\omega_н$, рад/с	n, об/мин
528	5,52	95,66	913,49
792	8,75	90,54	864,59
1056	12,48	84,62	808,06
1320	17,06	77,36	738,73
1584	23,70	66,83	638,18
1718	33,00	52,08	497,33

На рисунке 10 представлено семейство механических характеристик при различных сопротивлениях якоря. Из него видно, что при увеличении сопротивления якоря частота вращения уменьшается, что подтверждается уравнением механической характеристикой:

$$n = \frac{U_с - I_я R_я}{C_e \Phi} = \frac{U_с}{C_e \Phi} - \frac{I R_я M_e}{C_e C_m \Phi^2};$$

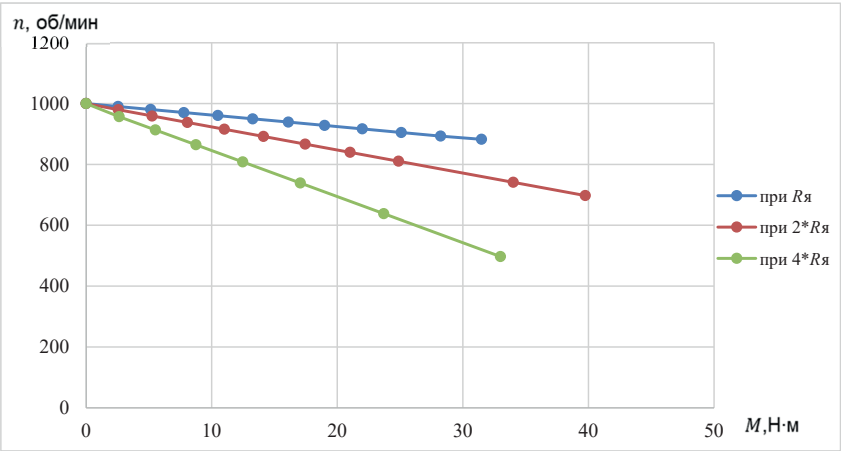


Рисунок 10 — Семейство механических характеристик при разных сопротивлениях якоря

5. Снять и построить регулировочную характеристику.

Регулировочная характеристика представляет собой зависимость тока возбуждения от механического момента на валу двигателя $I_в = f(M)$ при номинальном напряжении якоря.

Снятие регулировочной характеристики начинаем с точки холостого хода и n = 1000 об/мин. При увеличении момента необходимо из-

менять ток возбуждения так, чтобы сохранить на постоянном уровне частоту вращения якоря (1000 об/мин). При этом ток возбуждения изменяем сопротивлением ОВ.

Данные опыта представлены в таблице 11.

Таблица 11 — Регулировочная характеристика

P_2, Вт	M, Нм	$I_в$, А
0	0	1,841
264	2,525	1,824
528	5,05	1,805
792	7,56	1,786
1056	10,09	1,769
1320	12,6	1,746
1584	15,12	1,728
1848	17,65	1,708
2112	20,17	1,687
2640	25,22	1,644
2904	27,74	1,621

На рисунке 11 представлена рабочая характеристика.

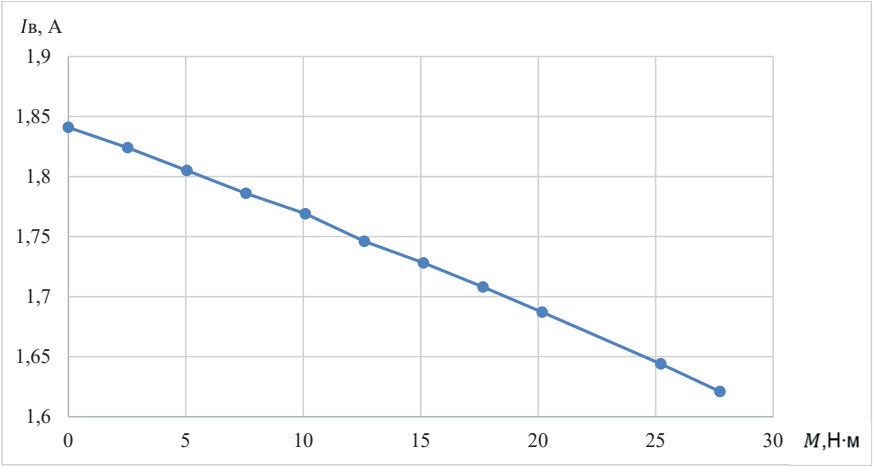


Рисунок 11 — Регулировочная характеристика

Таким образом, для поддержания постоянной скорости под нагрузкой необходимо изменять ток возбуждения, то есть изменять сопротивление ОВ.

Выводы.

Отчет оформил: подпись

Дата:

4 . Пример расчета параметров

Из таблицы 1.1, с. 4–5, выписываются номинальные данные трехфазного трансформатора ТМ-63/10:

$S_н = 63000$ ВА; $U_к = 4{,}5\,\%$; $P_к = 1280$ Вт; $P_0 = 220$ Вт;

$I_0 = 2{,}8\,\%$; $U_{1л} = 10000$ В; $U_{2л} = 400$ В.

Рассчитываются номинальные данные для однофазного трансформатора:

$$S_ф = \frac{S_н}{3} = \frac{63000}{3} = 21000 \text{ ВА};$$

$$P_{кф} = \frac{P_к}{3} = \frac{1280}{3} = 426{,}7 \text{ Вт};$$

$$P_{0ф} = \frac{P_0}{3} = \frac{220}{3} = 73{,}3 \text{ Вт};$$

$$U_{кф} = U_к = 4{,}5\%;$$

$$I_{0ф} = I_0 = 2{,}8\%;$$

$$U_{1ф} = U_{1л} = 10000 \text{ В};$$

$$U_{2ф} = \frac{U_{2л}}{1{,}73} = 231{,}2 \text{ В};$$

$$I_{1ф} = \frac{S_ф}{U_{1ф}} = \frac{21000}{10000} = 2{,}1 \text{ А};$$

$$I_{2ф} = \frac{S_ф}{U_{2ф}} = \frac{21000}{231{,}2} = 90{,}8 \text{ А};$$

$$I_{0ф} = \frac{I_{1ф} I_{0ф\%}}{100} = \frac{2{,}1 \cdot 2{,}8}{100} = 0{,}059 \text{ А};$$

$$U_{кф} = \frac{U_{1ф} U_{кф\%}}{100} = \frac{10000 \cdot 4.5}{100} = 450 \text{ В}.$$

По номинальным данным рассчитываются параметры схемы замещения:

$$R_{\text{к}} = \frac{P_{\text{кф}}}{I_{1\text{ф}}^2} = \frac{426,7}{2,1^2} = 96,75 \text{ Ом};$$

$$R_1 = \frac{R_{\text{к}}}{2} = \frac{96,75}{2} = 48,37 \text{ Ом};$$

$$R_{21} = \frac{R_{\text{к}}}{2} = \frac{96,75}{2} = 48,37 \text{ Ом};$$

$$Z_{\text{к}} = \frac{U_{\text{кф}}}{I_{1\text{ф}}} = \frac{450}{2,1} = 214,29 \text{ Ом};$$

$$X_{\text{к}} = \sqrt{\left(Z_{\text{к}}^2 - R_{\text{к}}^2\right)} = \sqrt{\left(214,29^2 - 96,75^2\right)} = 191,20 \text{ Ом};$$

$$X_1 = \frac{X_{\text{к}}}{2} = \frac{191,2}{2} = 95,60 \text{ Ом};$$

$$X_{21} = \frac{X_{\text{к}}}{2} = \frac{191,2}{2} = 95,60 \text{ Ом};$$

$$L_1 = \frac{X_1}{314} = \frac{95,6}{314} = 0,30446 \text{ Гн};$$

$$R_m = \frac{P_{0\text{ф}}}{I_{0\text{ф}}^2} = \frac{73,3}{0,059^2} = 21210,3 \text{ Ом};$$

$$Z_m = \frac{U_{1\text{ф}}}{I_{0\text{ф}}} = \frac{10000}{0,059} = 170068,03 \text{ Ом};$$

$$X_m = \sqrt{\left(Z_m^2 - R_m^2\right)} = \sqrt{\left(170068,03^2 - 21210,3^2\right)} = 168740,21 \text{ Ом};$$

$$L_m = \frac{X_m}{314} = \frac{168740,21}{314} = 537,39 \text{ Гн};$$

$$Y_m = \frac{1}{R_m + jX_m} = \frac{1}{21210,3 + j168740,21} = 7,333 \cdot 10^{-7} - j5,834 \cdot 10^{-6} \text{ см};$$

$$R_{m1} = \frac{1}{Real\left(Y_m\right)} = \frac{1}{7,333 \cdot 10^{-7}} = 1,364 \cdot 10^6 \text{ Ом};$$

$$L_{m1} = \frac{1}{Im\left(Y_m\right)} = \frac{1}{314 \cdot 5,834 \cdot 10^{-6}} = 545,048 \text{ Гн}.$$

Затем определяются реальные параметры неприведенной вторичной обмотки:

$$\text{к}_{\text{тр}} = \frac{U_{1\text{ф}}}{U_{2\text{ф}}} = \frac{10000}{231,2} = 43,25;$$

$$R_2 = \frac{R_{21}}{\text{к}_{\text{тр}}^2} = \frac{48,37}{43,25^2} = 0,025861 \text{ Ом};$$

$$X_2 = \frac{X_{21}}{\text{к}_{\text{тр}}^2} = \frac{95,6}{43,25^2} = 0,051108 \text{ Ом};$$

$$L_2 = \frac{X_2}{314} = \frac{0,051108}{314} = 0,000163 \text{ Гн}.$$

Для оценки правильности расчета параметров рекомендуется рассчитать параметры схемы замещения в относительных единицах и сопоставить с рекомендуемым диапазоном их изменения для силовых трансформаторов:

$$Z_{\text{б}} = \frac{U_{1\text{ф}}}{I_{1\text{ф}}} = \frac{10000}{2,1} = 4761,9 \text{ Ом};$$

$$R_{1\text{ое}} = \frac{R_1}{Z_{\text{б}}} = \frac{48,37}{4761,9} = 0,01016; \ \{0,001\ldots0,015\};$$

$$R_{21\text{ое}} = \frac{R_{21}}{Z_{\text{б}}} = \frac{48,37}{4761,9} = 0,01016; \ \{0,001\ldots0,015\};$$

$$X_{1\text{ое}} = \frac{X_1}{Z_{\text{б}}} = \frac{95,6}{4761,9} = 0,0201; \ \{0,02\ldots0,06\};$$

$$X_{21\text{ое}} = \frac{X_{21}}{Z_{\text{б}}} = \frac{95,6}{4761,9} = 0,0201; \ \{0,02\ldots0,06\};$$

$$R_{m\text{ое}} = \frac{R_m}{Z_{\text{б}}} = \frac{21210,3}{4761,9} = 4,4542; \ \{2\ldots10\};$$

$$X_{m\text{ое}} = \frac{X_m}{Z_{\text{б}}} = \frac{168740,21}{4761,9} = 35,4354; \ \{30\ldots200\}.$$

Результаты расчетов сводят в табличные формы.

Исходные данные однофазного трансформатора

$S_ф$, ВА	$P_{кф}$, Вт	$P_{0ф}$, Вт	$U_{кф}$, %	$I_{0ф}$, %	$U_{1ф}$, В	$U_{2ф}$, В	$I_{1ф}$, А	$I_{2ф}$, А	$I_{0ф}$, А	$U_{кф}$, В
21000	426,7	73,3	4,5	2,8	10000	231,2	2,1	90,8	0,059	450

Параметры схемы замещения, ф. е.

$R_к$, Ом	R_1, Ом	R_{21}, Ом	$Z_к$, Ом	$X_к$, Ом	X_1, Ом	X_{21}, Ом	R_m, Ом	Z_m, Ом	X_m, Ом
96,7	48,3	48,3	214,3	191,2	95,6	95,6	21210	170068	168740

Параметры электромагнитной схемы замещения, ф. е.

$R_к$, Ом	R_1, Ом	R_2, Ом	$Z_к$, Ом	$X_к$, Ом	L_1, Гн	X_2, Ом	L_2, Гн
96,75	48,37	0,025861	214,29	191,20	0,30446	0,051108	0,000163
R_m, Ом	Z_m, Ом	X_m, Ом	L_m, Гн	$U_{1ф}$, В	$U_{2ф}$, В	$I_{1ф}$, А	$I_{2ф}$, А
21210,3	170068,0	168740,2	537,39	10000	231,2	2,1	90,8

Параметры схемы замещения

$Z_б$, Ом	R_1, о. е.	R_{21}, о. е.	X_1, о. е.	X_{21}, о. е.	R_m, о. е.	X_m, о. е.
4761,9	0,01016	0,01016	0,0201	0,0201	4,4542	35,4354

Список библиографических ссылок

1. Герман-Галкин С. Г., Кардонов Г. А. Электрические машины: лабораторные работы на ПК. — СПб. : КОРОНА принт, 2003. — 256 с., ил.

2. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. — М. : ДМК Пресс ; СПб. : Питер, 2008. — 288 с.: ил.

3. Новиков Н. Н., Шутько В. Ф. Электрические машины : учебное пособие. — Екатеринбург : ИПК УГТУ, 1999. — 170 с.

4. Трансформаторы: методические указания к лабораторным работам по дисциплине «Электрические машины» / В. И. Денисенко, Н. Н. Новиков, В. М. Липанов [и др.]. — Екатеринбург : ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2006. — 24 с.

5. Асинхронные машины: методические указания к лабораторным работам по дисциплине «Электрические машины» / В. И. Денисенко, Ю. В. Барышников, Н. Н. Новиков [и др.]. — Екатеринбург : ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2006. — 22 с.

6. Синхронные машины: методические указания к лабораторным работам по дисциплине «Электрические машины» и «Электромеханика» / В. И. Денисенко, Н. Н. Новиков, А. Т. Пластун [и др.]. — Екатеринбург : ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2006. — 21 с.

7. Электрические машины постоянного тока: методические указания к лабораторным работам по дисциплине «Электрические машины» / В. И. Денисенко, В. Н. Кичигин, Н. Н. Новиков [и др.]. — Екатеринбург : ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2006. — 36 с.

8. Электрические машины: контрольные вопросы / сост. Н. Н. Новиков, И. Е. Родионов, В. Ф. Шутько. — Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 2009. — 64 с.

9. Электрические машины: организационно-методические указания к выполнению лабораторных работ / В. И. Денисенко, Н. Н. Новиков, А. Т. Пластун, И. Е. Родионов. — Екатеринбург : Изд-во УрФУ, 2012. — 36 с.

Содержание

Предисловие 3

Лабораторная работа № 1. Исследование трехфазного двухобмоточного трансформатора 4

Лабораторная работа № 2. Изучение схем и групп соединений обмоток трехфазного трансформатора 16

Лабораторная работа № 3. Исследование трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором 29

Лабораторная работа № 4. Исследование трехфазного асинхронного двигателя с фазным ротором 51

Лабораторная работа № 5. Испытание синхронного генератора методом непосредственной симметричной нагрузки 60

Лабораторная работа № 6. Испытание синхронной машины при работе с сетью неизменного напряжения 71

Лабораторная работа № 7. Испытание генератора постоянного тока независимого возбуждения 78

Лабораторная работа № 8. Испытание двигателя постоянного тока независимого возбуждения 87

Приложения 94

Библиографический список 123

Учебное издание

Новиков Николай Николаевич

ВИРТУАЛЬНАЯ ЛАБОРАТОРИЯ ПО ИСПЫТАНИЯМ ТРАНСФОРМАТОРОВ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Редактор О. В. Протасова
Верстка Е. В. Ровнушкиной

Подписано в печать 29.11.2022. Формат 70×100 1/16.
Бумага офсетная. Цифровая печать. Усл. печ. л. 10,32.
Уч.-изд. л. 6,4. Тираж 30 экз. Заказ 212.

Издательство Уральского университета
Редакционно-издательский отдел ИПЦ УрФУ
620049, Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 5
Тел.: 8 (343) 375-48-25, 375-46-85, 374-19-41
E-mail: rio@urfu.ru

Отпечатано в Издательско-полиграфическом центре УрФУ
620083, Екатеринбург, ул. Тургенева, 4
Тел.: 8 (343) 358-93-06, 350-58-20, 350-90-13
Факс: 8 (343) 358-93-06
http://print.urfu.ru

Для заметок

9 785799 636029

НОВИКОВ НИКОЛАЙ НИКОЛАЕВИЧ
Кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина.
Специалист в области теории трансформаторов и электрических машин. Заслуженный работник Единой энергетической системы России.