

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Учреждение образования
«Витебский государственный технологический университет»

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Лабораторный практикум для студентов специальности 1-43 01 07
«Техническая эксплуатация энергооборудования организаций»

Витебск
2021

УДК 7.01 (075.8)

Составители:

С. А. Клименкова, В. Ф. Куксевич, Д. В. Черненко

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом УО «ВГТУ», протокол № 10 от 22.06.2020.

Электрические машины: лабораторный практикум / сост. С. А. Клименкова, В. Ф. Куксевич, Д. В. Черненко. – Витебск : УО «ВГТУ», 2021. – 36 с.

Лабораторный практикум является руководством по выполнению лабораторных работ по дисциплине «Электрические машины», определяет порядок выбора студентом темы работы, общие требования, предъявляемые к оформлению отчета, освещают последовательность подготовки, требования к структуре и содержанию. Позволяет реализовать дистанционное обучение и организовать работу в тех случаях, когда нет возможности работать на реальных установках.

Предназначены для студентов дневной и заочной на базе ссуз формы обучения специальности 1-43 01 07 «Техническая эксплуатация энергооборудования организаций».

УДК 7.01 (075.8)

© УО «ВГТУ», 2021

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	4
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1	
ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА	7
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2	
ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА	13
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3	
ИССЛЕДОВАНИЕ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ	15
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4	
ИССЛЕДОВАНИЕ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ	21
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 5	
ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОЙ АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ	23
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 6	
ИССЛЕДОВАНИЕ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА	29
РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА	35

ВВЕДЕНИЕ

Общие сведения

MATLAB является продуктом фирмы TheMathWorks, Inc. Первая версия пакета MATLAB была разработана более 20 лет назад. Развитие и совершенствование этого пакета происходило одновременно с развитием средств вычислительной техники. Сейчас возможности системы значительно превосходят возможности первоначальной версии матричной лаборатории MatrixLaboratory.

Нынешний MATLAB – это высокоэффективный язык инженерных и научных вычислений. Он поддерживает математические вычисления, визуализацию научной графики и программирование с использованием легко осваиваемого операционного окружения.



Рисунок 1 – Окно «О программе MATLAB»

Программа Simulink является приложением к пакету MATLAB. При моделировании с использованием Simulink реализуется принцип визуального программирования, в соответствии с которым пользователь на экране из библиотеки стандартных блоков создает модель устройства и осуществляет расчеты. При этом, в отличие от классических способов моделирования,

пользователю не нужно досконально изучать язык программирования и численные методы математики, а достаточно общих знаний, требующихся при работе на компьютере и, естественно, знаний той предметной области, в которой он работает.

Simulink – интерактивный инструмент для моделирования, имитации и анализа динамических систем. Он дает возможность строить графические блок-диаграммы, имитировать динамические системы, исследовать работоспособность систем и совершенствовать проекты. Simulink полностью интегрирован с MATLAB, обеспечивая немедленным доступом к широкому спектру инструментов анализа и проектирования.

Создание модели

После запуска пакета MATLAB в командной строке необходимо набрать команду SIMULINK. При этом откроется библиотека среды SIMULINK. Для создания модели в среде SIMULINK необходимо последовательно выполнить ряд действий:

1. Создать новый файл модели с помощью команды *File/New/Model*, или используя кнопку на панели инструментов.

2. Расположить блоки в окне модели. Для этого необходимо открыть соответствующий раздел библиотеки. Далее, указав курсором на требуемый блок и нажав на левую клавишу «мыши» – «перетащить» блок в созданное окно. Клавишу мыши нужно держать нажатой. Также для поиска нужного блока можно активно использовать поисковую строку.

3. Далее, если это требуется, нужно изменить параметры блока, установленные программой «по умолчанию». Для этого необходимо дважды щелкнуть левой клавишей «мыши», указав курсором на изображение блока. Откроется окно редактирования параметров данного блока. После внесения изменений нужно закрыть окно кнопкой ОК.

В качестве примера настроим схему измерения синусоидального сигнала, представленную на рисунке 2.



Рисунок 2 – Схема модели измерения синусоидального сигнала

Модель содержит:

- **Генератор синусоидального сигнала** (*SineWave*) из библиотеки *Simulink/Sources*;
- **Осциллограф** (*Scope*) из библиотеки *Simulink/Sinks*.

В полях окна настройки параметров генератора синусоидального сигнала, как показано на рисунке 3, последовательно задаются:

- **Amplitude** – амплитуда,
- **Bias** – смещение сигнала,
- **Frequency** – частота в радианах в секунду ($2 * \text{Pi} * f$),
- **Phase** – начальная фаза в радианах,
- **Sampletime** – такт дискретности.

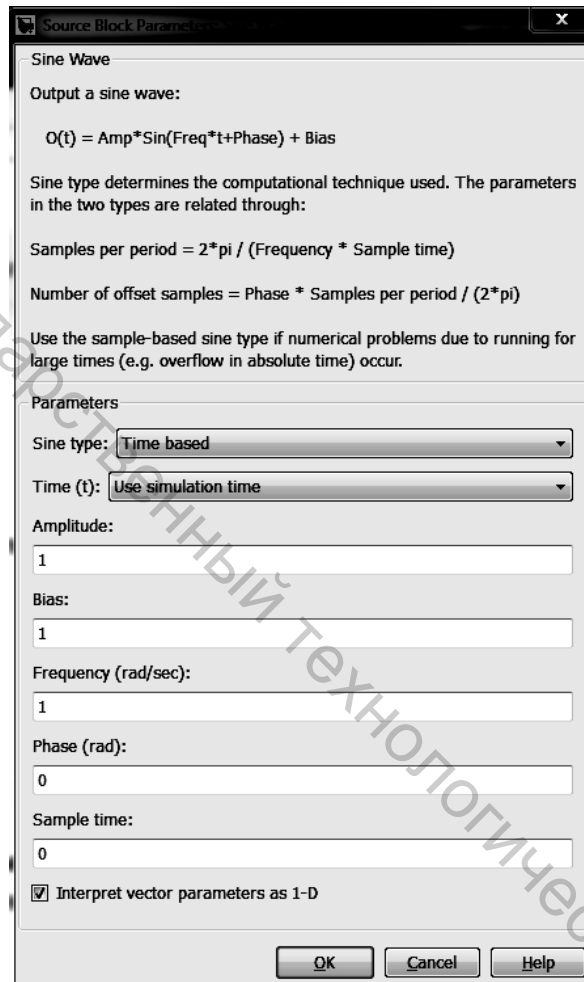


Рисунок 3 – Окно настройки параметров генератора синусоидального сигнала

Запустим созданную модель командой Simulation -> Start, оставив настройки моделирования (Simulationstoptime = 10 Simulationmode = Normal) без изменений, как показано на рисунке 4.

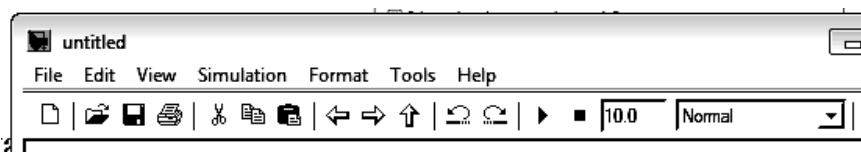


Рисунок 4 – Панель инструментов модели

После завершения процесса выполним двойной щелчок по значку осциллографа и получим сгенерированную синусоиду. Для того чтобы увидеть полученную кривую, выберете опцию «Autoscale», щелкнув правой кнопкой мыши по экрану осциллографа, как показано на рисунке 5.

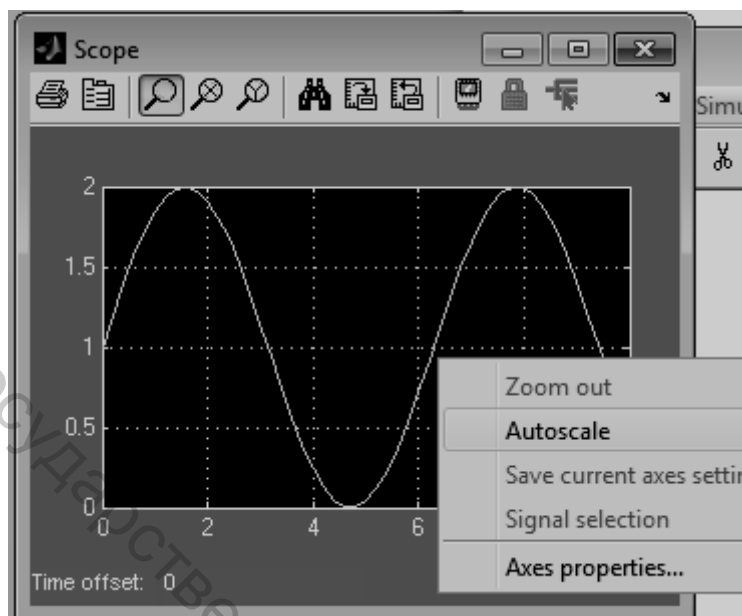


Рисунок 5 – Окно осциллографа с результатами измерений

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1 ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Цель работы: исследование однофазного трансформатора под нагрузкой.

Содержание работы

1. Определение параметров схемы замещения при помощи опытов холостого хода и короткого замыкания.
2. Снятие нагрузочной и рабочих характеристик трансформатора.

Описание лабораторной установки

Модель содержит:

Источник переменного напряжения (AC Voltage Source) из библиотеки SimPowerSystems/Electrical Sources.

В полях окна настройки параметров, показанного на рисунке 7, источника переменного напряжения последовательно задаются:

- амплитуда напряжения источника (В);
- начальная фаза в градусах;

- частота (Гц);
- образец времени (с).

Напряжение и частота источника должны соответствовать параметрам трансформатора (660 В, 50 Гц).

Модель для исследования трансформатора показана на рисунке 6.

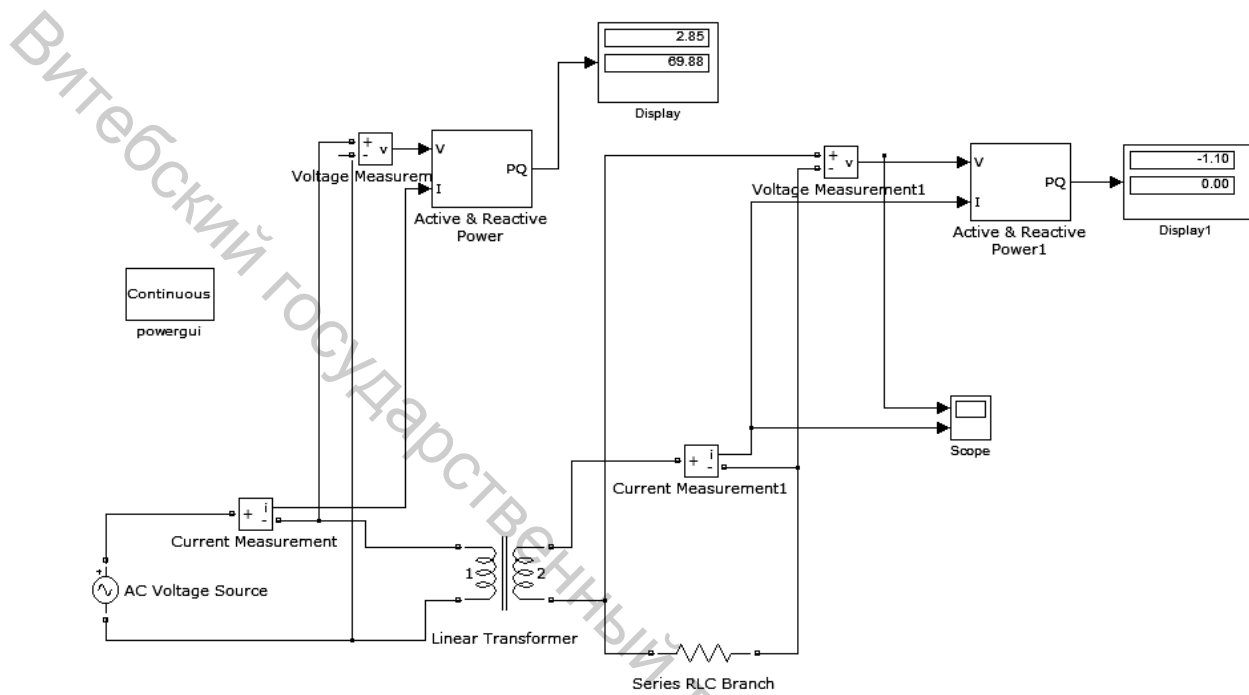


Рисунок 6 – Модель для исследования однофазного трансформатора

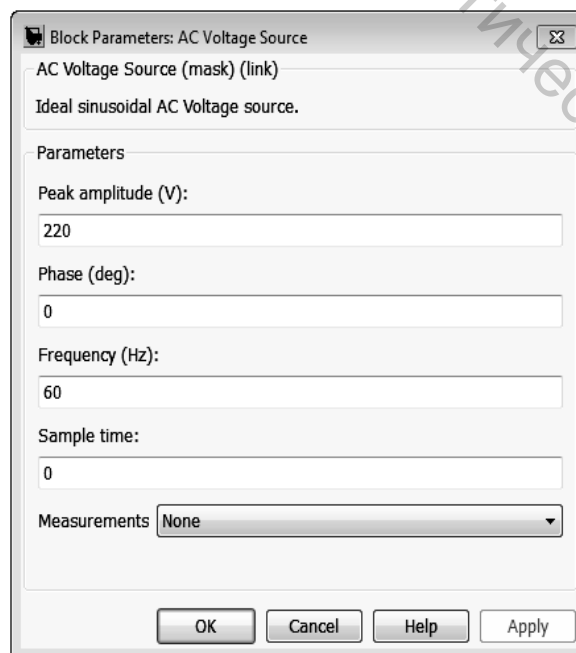


Рисунок 7 – Окно настройки параметров источника переменного напряжения

Исследуемый трансформатор (SimPowerSystems/Elements/LinearTransformer).

В полях окна настройки трансформатора последовательно задаются:

- мощность трансформатора и частота;
- действующее напряжение и относительные параметры схемы замещения первичной обмотки;
- действующее напряжение и относительные параметры схемы замещения вторичных обмоток;
- относительные параметры ветви намагничивания.

Базовыми значениями параметров трансформатора являются: расчетная полная мощность S_n , обозначенная как P_n [ВА], номинальная частота f_n (Гц), действующее номинальное напряжение U_1, U_2 (В) соответствующей обмотки.

Таблица 1.1 – Паспортные данные трансформатора

$U_1, \text{В}$	$S_n, \text{кВА}$	$U_2, \text{В}$	$U_k, \%$	$P_k, \text{Вт}$	$P_{10}, \text{Вт}$	$I_{10}, \%$
660	50	400	4,5	900	280	3,6

Приступая к моделированию, необходимо для каждой обмотки найти относительные сопротивления и индуктивности. Удобство задания параметров в относительных единицах заключается в том, что относительные сопротивления и индуктивности первичной и вторичной обмоток оказываются равными.

При выполнении расчетов обращайте внимание на размерность значений, приведенных в таблице.

Расчет относительных параметров трансформатора осуществляется на основании паспортных данных завода-изготовителя по выражениям:

$$R_m = \frac{R_0}{Z_b} = \frac{S}{U_1 \cdot I_{10} \cdot \cos \varphi_0}; L_m = \frac{x_0}{Z_b} = \frac{S}{U_1 \cdot I_{10} \cdot \sin \varphi_0}; \quad (1.1)$$

$$R'_1 = R'_2 = \frac{R_k}{2 \cdot Z_b} = \frac{S \cdot U_k \cdot \cos \varphi_k}{2 \cdot U_1^2 \cdot I_n}; L'_{p1} = L'_{p2} = \frac{x_k}{2 \cdot Z_b} = \frac{S \cdot U_k \cdot \sin \varphi_k}{2 \cdot U_1^2 \cdot I_n}; \quad (1.2)$$

где $\varphi_0 = \arccos \frac{P_{10}}{U_1 \cdot I_{10}}; \varphi_k = \arccos \frac{P_k}{U_k \cdot I_n}; I_n = \frac{S}{U_1};$

В результате расчета относительных параметров трансформатора по формулам (1.1), (1.2) получим значения, которые внесем в поля окна настройки трансформатора, показанном на рисунке 8.

Нагрузка (*SimPowerSystems/ Elements/ Series RLC Branch*).

В полях окна настройки нагрузки последовательно задаются: R, L, C. Для исключения реактивных элементов индуктивность должна быть задана равной нулю, а емкость – бесконечности (*inf*). Также для исключения реактивных элементов можно параметр «*Branchtype*» выбрать равным только R.

Измерители напряжения (*SimPowerSystems/Measurement/Voltage Measurement*) и **измерители тока** (*SimPowerSystems/Measurement/Current Measurement*) в цепях трансформатора.

Измерители активной и реактивной мощности в цепях трансформатора (*SimPowerSystems/Extra Library/Measurements/Active & Reactive Power*). Установить частоту сети (50 Гц).

Блок пользователя (*SimPowerSystems/Powergui*), который измеряет значения тока и напряжения.

Блоки дисплеев (*Simulink/Sinks/Display*) для количественного представления измеренных мощностей и **блок осциллографа** (*Simulink/Sinks/Scope*) для наблюдения формы кривых тока и напряжения во вторичной цепи.

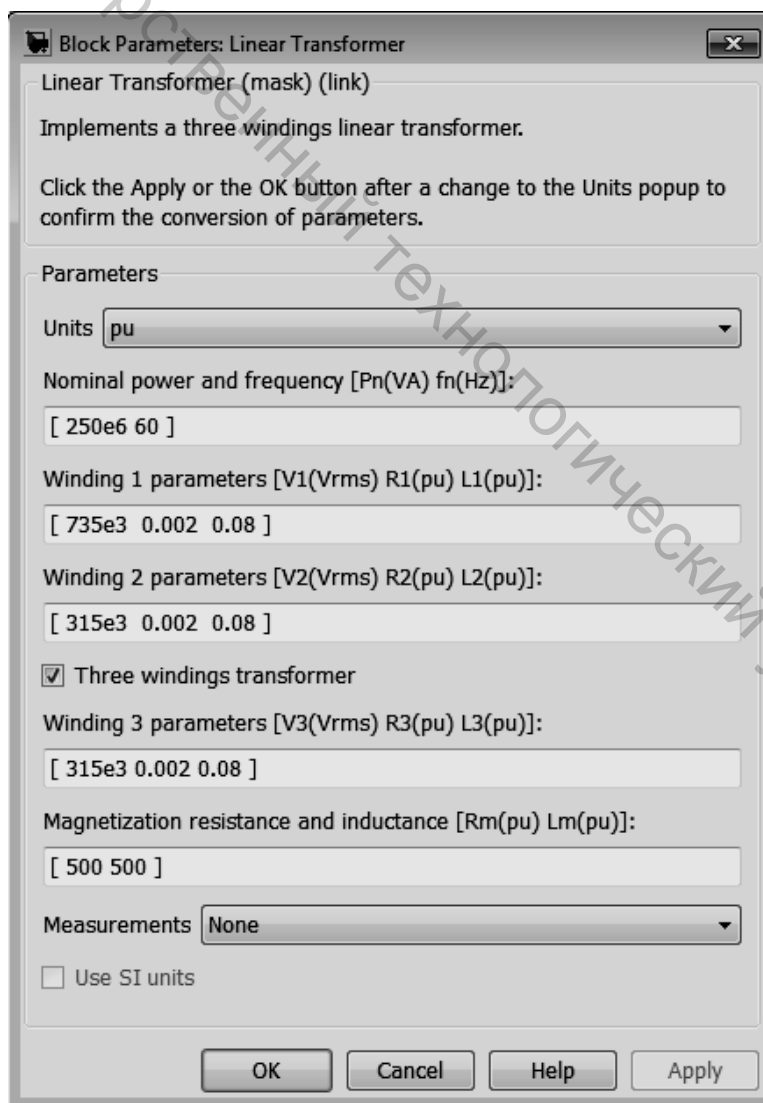


Рисунок 8 – Окно настройки параметров трансформатора

Порядок выполнения работы

Тип трансформатора для выполнения работы выбирается из таблицы 1.2.

Заполняется окно настройки параметров моделирования трансформатора, показанное на рисунке 8, на основании расчетов относительных параметров по приведенным формулам (1.1), (1.2).

Выполняется сравнение параметров схемы замещения с параметрами, заданными в окне настройки. Опыт производится при помощи методов холостого хода и короткого замыкания.

При холостом ходе нагрузка отключена. Активная нагрузка элемента *Active&ReactivePower* равна бесконечности (*inf*), и трансформатор запитан минимальным напряжением. Активная мощность в режиме холостого хода равна потерям в сердечнике трансформатора.

Таблица 1.2 – Параметры трансформатора

№	U_1 , В	$S_{н\bar{}}$, кВА	U_2 , В	$U_{к\bar{}}$, %	$P_{к\bar{}}$, Вт	$P_{10\bar{}}$, Вт	$I_{10\bar{}}$, %
1	660	10	400	3,8	300	80	6,0
2	660	10	400	4,5	280	90	7,0
3	660	16	400	3,8	400	120	5,2
4	660	16	400	4,5	400	125	5,8
5	660	25	400	3,8	600	155	4,1
6	660	25	400	4,5	560	180	4,8
7	660	40	400	3,8	880	220	3,7
8	660	40	400	4,5	800	250	4,0
9	660	63	400	3,8	1280	290	3,1
10	660	63	400	4,5	1000	355	3,3
11	660	100	400	3,8	1450	390	2,7
12	660	100	400	4,5	2060	500	2,7

Опыт короткого замыкания проводится при коротком замыкании во вторичной цепи. При этом напряжение источника питания должно быть равно напряжению короткого замыкания трансформатора.

Активная мощность в режиме короткого замыкания при первичном токе короткого замыкания, равном номинальному, определяет потери в обмотках трансформатора. После проведения опытов и расчета параметров следует сравнить их с теми, которые были введены в окно параметров.

Снятие нагрузочной и рабочих характеристик трансформатора производится на модели при изменении мощности нагрузки в диапазоне от 0,2 до 1,2 $S_{ном}$ с шагом от 0,1 до 0,2 $S_{ном}$. При этом для каждого значения сопротивления нагрузки осуществляется моделирование.

Сопротивление нагрузки рассчитывается по формуле:

$$R = \frac{U_1^2}{S}. \quad (1.3)$$

При проведении исследований заполняется таблица 1.3.

Таблица 1.3 – Измеренные и рассчитанные значения

Нагр.	Измерения				Вычисления		
$R_{н2}$, Ом	P_1 , Вт	Q_1 , ВА	P_2 , Вт	Q_2 , ВА	φ_1 , град.	$\cos \varphi_1$, град.	η

Вычисления производятся по формулам (1.4):

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}; \varphi = \arctg \frac{Q_1}{P_2}. \quad (1.4)$$

По данным таблицы строится нагрузочная характеристика трансформатора и на отдельном рисунке – рабочие характеристики.

Содержание отчета

1. Номер лабораторной работы и варианта, тема, цель.
2. Схема модели и расчет относительных параметров трансформатора.
3. Сравнительная таблица заданных и определенных из опытов холостого хода и короткого замыкания параметров трансформатора.
4. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Основные характеристики трансформатора.
2. Структура потерь в трансформаторе и их источники.
3. Основные коэффициенты трансформатора.
4. Поясните принцип работы трансформатора.
5. Изобразите электрическую схему однофазного трансформатора.
6. Какая обмотка называется первичной, а какая – вторичной обмоткой?
7. Как определяется коэффициент трансформации?
8. Какие параметры трансформатора определяются из опыта холостого хода?
9. Какие параметры трансформатора определяются из опыта короткого замыкания?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2 ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Цель работы: исследование трехфазного трансформатора при различных схемах соединения первичных и вторичных обмоток.

Содержание работы

1. Определение параметров трансформатора при соединении «звезда-звезда» (Y/Y).
2. Определение параметров трансформатора при соединении «звезда-треугольник» (Y/D).
3. Определение параметров трансформатора при соединении «треугольник-треугольник» (D/D).
4. Определение параметров трансформатора при соединении «треугольник-звезда» (D/Y).

Описание лабораторной установки

Модель для исследования трехфазного трансформатора показана на рисунке 9.

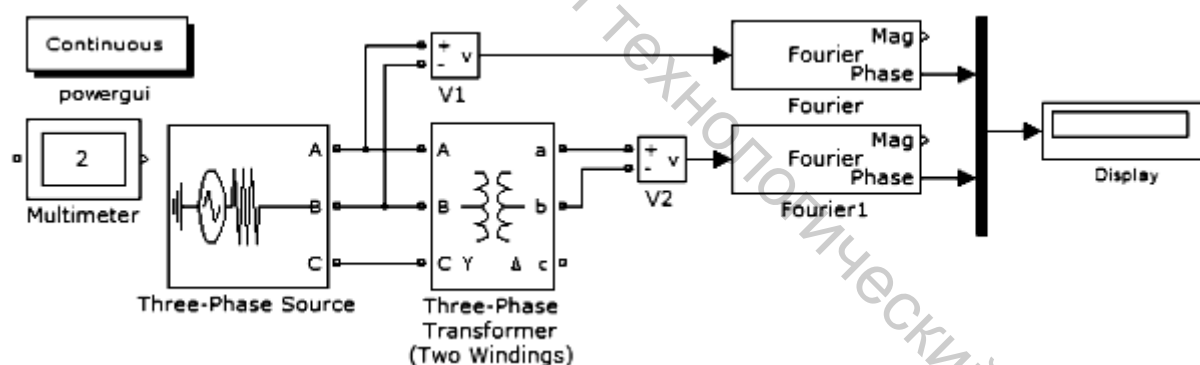


Рисунок 9 – Модель для исследования трехфазного трансформатора

По сравнению с моделью однофазного трансформатора здесь не используются блоки для измерения основных характеристик (основные характеристики трехфазного трансформатора и однофазного трансформатора идентичны, поэтому параметры модели берем из предыдущей лабораторной работы 1), но добавляем блок **Multimeter** (SimPowerSystems/Measurement), измеряющий токи и напряжения трансформатора. Значения этих токов отсчитываются в окне блока Powergui. Там же снимаются значения входного U_1 и выходного U_2 напряжений и разность фаз между ними.

Окно настройки параметров трехфазного трансформатора содержит два дополнительных поля:

- Winding 1 connection (ABCterminals) – схема соединения первичных обмоток;
- Winding 2 connection (abcterminals) – схема соединения вторичных обмоток.

В выпадающем меню этих полей задается схема соединения. В поле *Measurement* выбрана опция *WindindVoltage*, при которой измеряются напряжения обмоток.

Параметры источника питания *Three-PhaseSource* задаются в соответствии с параметрами трансформатора.

В полях окна настройки параметров источника питания задаются:

- амплитуда источника (В);
- начальная фаза в градусах;
- частота (Гц);
- сопротивление (Ом);
- индуктивность.

Параметры моделирования трехфазного трансформатора аналогичны параметрам моделирования однофазного трансформатора. Для каждого типа соединения обмоток 3-фазного трансформатора (Y/Y, D/Y, Y/D, D/D) проводится моделирование. Данные заносятся в таблицу 2.1.

Результаты моделирования получаем в окне блока Powergui. В левой колонке представлены измеряемые переменные, в средней – их действующие значения, в правой – их начальные фазы.

Таблица 2.1 – Измеренные и рассчитанные значения 3-фазного трансформатора

Схема соединения	Измерения								Вычисления
	$U_{1\phi}$ В	$I_{1\phi}$ А	U_1 В	φ_1 град.	$U_{2\phi}$ В	$I_{2\phi}$ А	U_2 В	Φ_{12} град.	
(Y/Y)									
(D/Y)									
(Y/D)									
(D/D)									

где η – коэффициент трансформации.

Коэффициент трансформации и разность фаз между входными (U_1) и выходными (U_2) напряжениями рассчитывается по выражениям (2.1)

$$n = \frac{U_1}{U_2}; \varphi = \varphi_1 - \varphi_2. \quad (2.1)$$

Содержание отчета

1. Номер лабораторной работы и варианта, тема, цель.
2. Схема модели и описание виртуальных блоков.
3. Заполненные таблицы.
4. Векторные диаграммы для каждого пункта работы для первичной и вторичной цепи.
5. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Особенности конструкции трехфазного трансформатора.
2. Схемы и группы соединения обмоток.
3. Основные параметры трехфазного трансформатора.
4. Изобразите электрические схемы трехфазного трансформатора при соединении обмоток $Y/Y-0$, Y/Y_n-0 , $Y/D-11$.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3 ИССЛЕДОВАНИЕ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Цель работы: исследование машины постоянного тока при работе в двигательном и генераторном режимах.

Содержание работы

1. Снятие механической и расчет рабочих характеристик машины в двигательном режиме работы.
2. Снятие механической и расчет рабочих характеристик машины в генераторном режиме работы.
3. Снятие механических характеристик при различных напряжениях питания в цепи якоря.
4. Снятие механических характеристик при различных сопротивлениях в цепи якоря.
5. Снятие механических характеристик при различных потоках возбуждения.
6. Снятие регулировочных характеристик при изменении напряжения якоря.

Описание лабораторной установки

Виртуальная лабораторная установка представлена на рисунке 10.

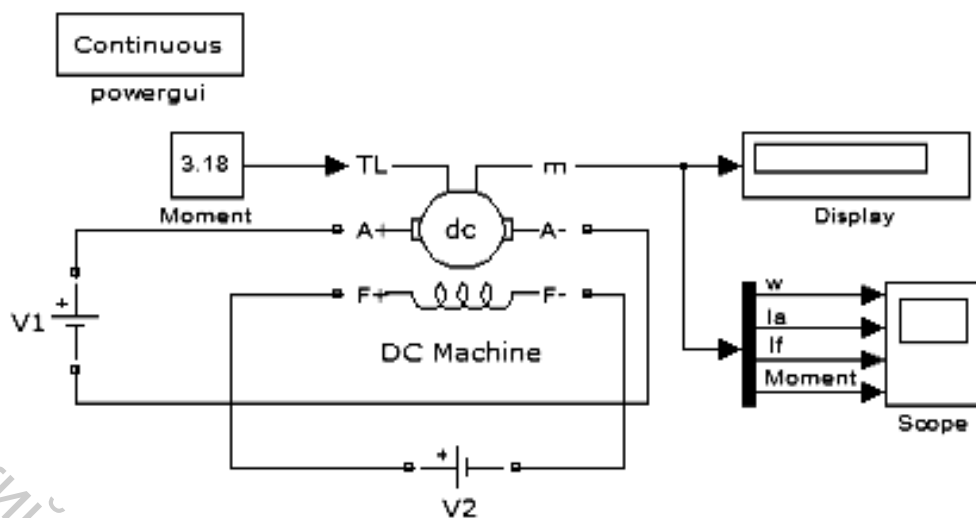


Рисунок 10 – Модель для исследования машины постоянного тока с независимым возбуждением

Модель для исследования машины постоянного тока с независимым возбуждением, представленная на рисунке 10, содержит:

Двигатель постоянного тока *DCMachine* из библиотеки *SimPowerSystems/Machines*, представляющий собой двигатель постоянного тока с возможностью отдельного включения цепи якоря (контакты A+, A-) обмоток возбуждения (контакты F+, F-).

Цепь якоря и цепь возбуждения видны из графического начертания блока. На вход TL подается момент нагрузки, выход m предназначен для измерения и наблюдения переменных состояния машины в следующей последовательности:

- ω – угловая скорость (рад/с);
- I_a – ток якоря в (А);
- I_f – ток возбуждения (А);
- Moment – электромагнитный момент (Нм).

В полях настройки двигателя постоянного тока задаются:

- параметры обмотки якоря – R_a (Ом), L_a (Гн);
- параметры обмотки возбуждения – R_f (Ом), L_f (Гн);
- коэффициент взаимоиנדукции – L_{af} ;
- суммарный момент инерции машины и нагрузки – J (кг·м²);
- коэффициент вязкого трения – B_m (Н·м·с);
- коэффициент сухого трения – T_f (Н·м);
- начальная скорость (рад/с).

Расчет относительных параметров двигателя постоянного тока осуществляется на основании паспортных данных завода-изготовителя, приведенным в таблице, и по выражениям, приведенным ниже.

Таблица 3.1 – Паспортные данные двигателя постоянного тока типа 2ПФ180МУХЛ4

№	P_n кВт	U_n В	n_n об/мин	η_n %	R_α Ом	R_ϵ Ом	L_α мГн
1	3	4	5	6	7	8	9
1	9	110	800	77	0,058	41	1,9
2	9	220	750	76,5	0,286	49,2	22
3	9	440	750	77,5	1,15	49,2	37
4	12	110	1060	81	0,038	49,2	1,2
5	12	220	1060	82	0,15	49,2	4,9
6	12	440	1060	81	0,688	49,2	22
7	15	110	1500	84	0,022	49,2	0,68
8	15	220	1500	85,5	0,084	49,2	2,7
9	15	440	1500	85,5	0,338	49,2	10,9
10	26	110	3150	89	0,022	49,2	0,68
11	26	220	3150	89,5	0,084	49,2	2,7
12	26	440	3150	90	0,338	49,2	10,9

Индуктивность обмотки возбуждения при исследовании установившихся процессов может быть принятой близкой к нулю. При исследовании переходных процессов L_B для машин обычного исполнения выбирается из неравенства (3.1)

$$L_\epsilon \geq (2 \dots 5) \frac{L_\alpha \cdot R_\epsilon}{R_\alpha} \quad (3.1)$$

Взаимная индуктивность между обмотками возбуждения и якоря определяется из выражений (3.2)

$$I_\epsilon = \frac{U_\epsilon}{R_\epsilon}; M = \frac{P_n}{\omega_n}; I_{\alpha.n.} = \frac{P_n}{U_n \cdot \eta_n} - I_\epsilon; L_{of} = \frac{M_n}{I_{\alpha.n.} \cdot I_\epsilon} \quad (3.2)$$

Момент инерции для двигателей обычного исполнения определяется из неравенства (3.3)

$$J \geq \frac{(5 \dots 10) \cdot L_\alpha \cdot P_n^2}{R_\alpha^2 \cdot \omega_n^2 \cdot I_{\alpha.n.}^2} \quad (3.3)$$

Момент сухого трения и коэффициент вязкого трения определяются по формуле (3.4)

$$T_f \approx \frac{P_{mex}}{2 \cdot \omega_n}; B_m \approx \frac{P_{mex}}{2 \cdot \omega_n^2}; \quad (3.4)$$

где $P_{mex} = (0,5...2) \cdot P_n$.

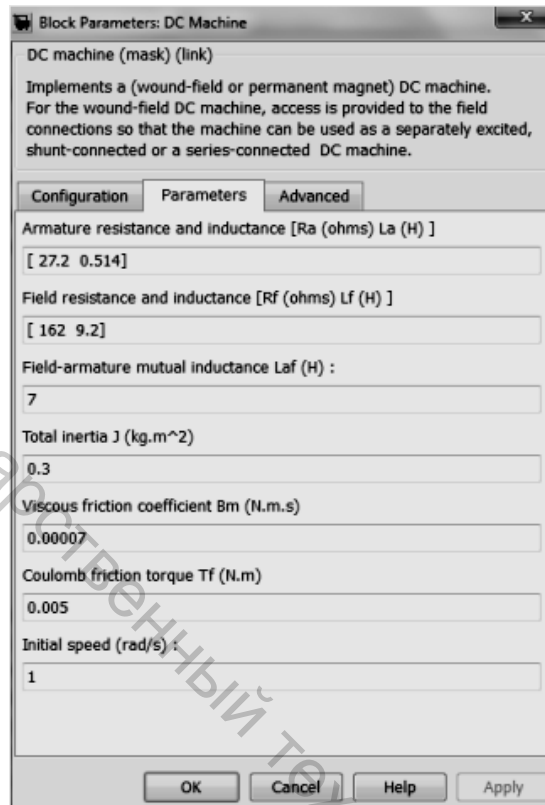


Рисунок 11 – Окно настройки параметров машины постоянного тока

В качестве примера проведем вычисление параметров схемы замещения, используемой в модели, на основании таблицы, с паспортными данными машины постоянного тока и приведенных формул.

Результаты расчета показаны в окне блока параметров DCMachine, представленном на рисунке 11.

Источники постоянного напряжения для питания якоря и обмотки возбуждения машины (SimPowerSystems/ElectncalSources/DCVoltage Source): для питания якоря – 220 В, для обмотки возбуждения – 100 В.

Блок для задания момента нагрузки *Constant(Simulink/Sources)*. При снятии характеристик в двигательном режиме в окне настройки блока последовательно задаются значения момента от 0 до $1,2 M_n$ с шагом $0,2 M_n$. Для каждого значения момента осуществляется моделирование и заполняется таблица измеренных и рассчитанных значений.

Блок для измерения выходных параметров двигателя постоянного тока *Display* и **осциллограф** *Scope* для визуального наблюдения процессов из библиотеки *Smulink/Sinks*.

Порядок проведения лабораторной работы

Для заданного варианта рассчитать значение параметров и заполнить поля окна настройки параметров машины и параметры моделирования, как на рисунке 11.

При снятии характеристик в двигательном режиме в окне настройки блока последовательно задаются значения момента от 0 до $1,2 M_n$ с шагом $0,2 M_n$. Для каждого значения момента осуществляется моделирование и заполняется таблица измеренных и рассчитанных значений.

Таблица 3.2 – Измеренные и рассчитанные значения параметров машины постоянного тока

Нагрузка	Измерения			Расчет		
M Н м	ω рад/с	I_a А	I_b А	P_1 Вт	P_2 Вт	η

Вычисления осуществляются по выражениям (3.5)

$$P_1 = U \cdot (I_a + I_b); P_2 = M_n \cdot \omega; \eta = \frac{P_2}{P_1}. \quad (3.5)$$

При снятии характеристик в генераторном режиме в окне настройки блока *Constant* последовательно задаются значения момента от 0 до $-1,2 M_n$ с шагом $0,2 M_n$. Для каждого значения момента осуществляется моделирование и заполняется таблица.

Коэффициент полезного действия в этом случае вычисляется по формуле (3.6)

$$\eta = \frac{P_1}{P_2}. \quad (3.6)$$

Снятие механических характеристик при различных напряжениях питания в цепи якоря следует провести для двух значений напряжения на якоре $0,6 \cdot U_a$ и $0,8 \cdot U_a$,

где U_a – первоначальное напряжение на якоре, при котором снимались предыдущие характеристики. При этом момент нагрузки следует изменять от $-1,2 M_n$ до $1,2 M_n$ с шагом $0,2 M_n$.

Снятие механических характеристик при сопротивлениях в цепи якоря следует провести для сопротивления якоря $2R_a$ и $4R_a$,

где R_a – первоначальное значение сопротивления якоря.

Изменение сопротивления якоря осуществляется в поле окна настройки параметров машины. При этом момент нагрузки следует изменять от $-1,2 M_n$ до $1,2 M_n$ с шагом $0,2 M_n$.

Снятие механических характеристик при различных потоках возбуждения следует провести для двух значений потока $0,6 \Phi_n$ и $0,8 \Phi_n$. Для этого в поле *Field-armature mutual inductance* необходимо установить значение L_{af} вначале $0,6$, а затем $0,8$ от первоначальной величины. При этом момент нагрузки следует изменять от $-1,2 M_n$ до $1,2 M_n$ с шагом $0,2 M_n$.

Для каждого значения потока, сопротивления в цепи якоря, напряжения питания в цепи якоря и момента проводится моделирование и заполняется таблица 3.3.

Таблица 3.3 – Механические характеристики

M Н м	ω [рад/с]						
	н.у.	$0,6 U_{я}$	$0,8 U_{я}$	$2 R_{я}$	$4 R_{я}$	$0,6 \Phi_n$	$0,8 \Phi_n$

Снятие регулировочных характеристик при изменении напряжения якоря проводится для постоянного момента нагрузки, равного номинальному, и изменению напряжения в цепи якоря от $0,4$ до $1,2$ исходного значения с шагом $0,2$ исходного значения напряжения.

Содержание отчета

1. Номер лабораторной работы и варианта, тема, цель.
2. Схема модели и описание виртуальных блоков.
3. Расчетные формулы параметров машины.
4. Графики рабочих характеристик машины в двигательном и генераторном режимах.
5. Графики механической характеристики машины при различных напряжениях на якоре, различных сопротивлениях якоря и различных потоках возбуждения.
6. Регулировочная характеристика двигателя.
7. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Устройство и принцип действия машин постоянного тока.
2. Конструкция основных узлов машин постоянного тока.
3. Характеристики машин постоянного тока.
4. Принцип действия и роль коллектора машин постоянного тока, ЭДС и электромагнитные моменты.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4 ИССЛЕДОВАНИЕ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Цель работы: исследование машины постоянного тока при работе в двигательном режиме.

Содержание работы

Снятие механической и расчет рабочих характеристик машины в двигательном режиме работы.

Описание лабораторной установки

Виртуальная лабораторная установка исследования машины постоянного тока представлена на рисунке 12.

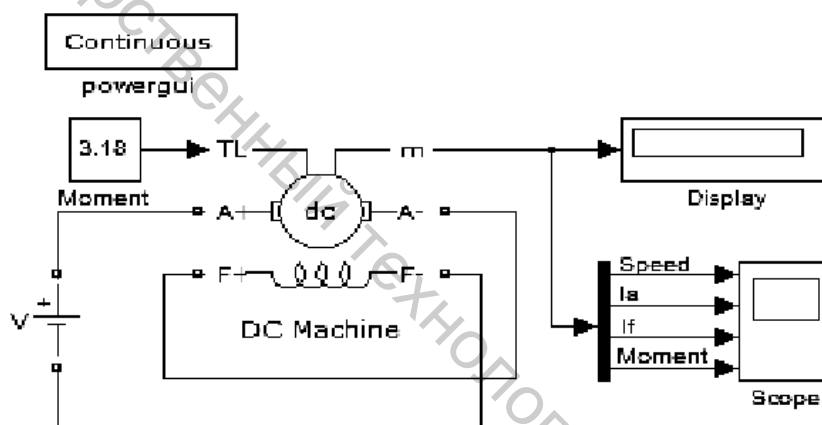


Рисунок 12 – Модель для исследования машины постоянного тока при работе в двигательном режиме

Сравнивая полученную модель с моделью для исследования машины постоянного тока с независимым возбуждением, представленную на рисунке 10, можно убедиться в их полной аналогии. Разница лишь в схеме включения обмотки возбуждения.

Перед началом эксперимента последовательно заполняются окно настройки параметров машины постоянного тока, показанное на рисунке 11, окно настройки параметров источника питания и окно настройки параметров моделирования.

Порядок проведения лабораторной работы

Для выбранного варианта машины необходимо рассчитать значение параметров и заполнить поля окна настройки параметров машины и параметры моделирования.

При снятии характеристик в двигательном режиме в окне настройки блока Moment последовательно задаются значения момента от 0,1 до 2,0 M_n с шагом, обеспечивающим наилучшее восприятие получаемых данных. Для каждого значения момента осуществляется моделирование и заполняется таблица 4.1.

Таблица 4.1 – Измеренные и рассчитанные значения исследования машины постоянного тока при работе в двигательном режиме

Нагрузка	Измерения			Расчет		
M Н м	ω рад/с	I_a А	I_b А	P_1 Вт	P_2 Вт	η

Вычисления осуществляются по выражениям (3.5).

Содержание отчета

1. Номер лабораторной работы и варианта, тема, цель.
2. Схема модели и описание виртуальных блоков.
3. Механические характеристики машины $\omega = f(M)$.
4. Рабочие характеристики машины $\omega, I, M, P_1, \eta = f(P_2)$.
5. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Почему в момент пуска двигателя возникает большой ток?
2. Что представляют собой рабочие характеристики двигателя последовательного возбуждения?
3. Как изменятся обороты двигателя при включении сопротивления параллельно обмотке возбуждения, параллельно якорю?
4. Почему не допускается включение двигателя последовательного возбуждения с нагрузкой менее 25 % от номинальной?
5. Какие способы регулирования частоты вращения возможны в двигателях последовательного возбуждения?
6. Как изменить направление вращения двигателя?
7. Укажите способы пуска двигателей постоянного тока.
8. Особенности машин постоянного тока последовательного возбуждения.
9. Характеристики машин постоянного тока последовательного возбуждения.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 5 ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОЙ АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

Цель работы: исследование трехфазной асинхронной машины с короткозамкнутым ротором.

Содержание работы

1. Снятие механической характеристики машины в двигательном и генераторном режимах.
2. Снятие рабочих характеристик машины в двигательном режиме.

Описание лабораторной установки

Модель виртуальной установки для исследования асинхронной машины показана на рисунке 13.

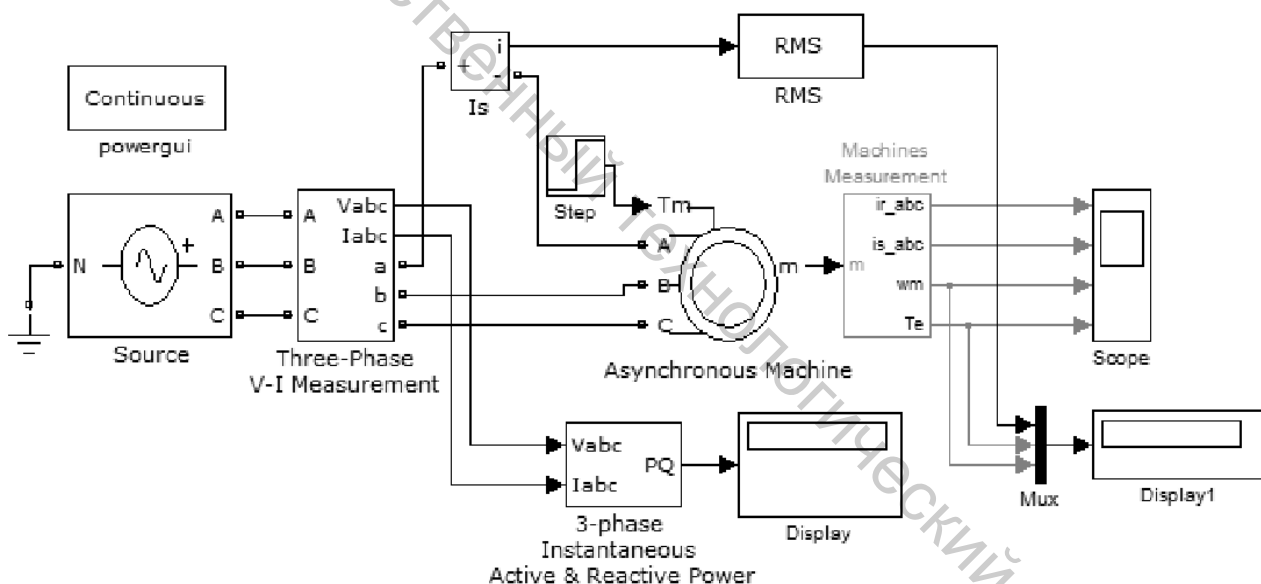


Рисунок 13 – Модель для исследования асинхронной машины

Модель содержит:

- источник переменного трехфазного напряжения (Three-PhaseProgrammableVoltageSource) из библиотеки SimPowerSystems/ElectricalSources;
- исследуемую трехфазную асинхронную машину (SimPowerSystems/Machines/AsynchronousMachineSIUnits);
- блок Step для задания механического момента на валу машины из библиотеки Simulink/Source;

- измеритель трехфазного напряжения и тока (Three-Phase V-I Measurement), активной и реактивной мощности (Active&ReactivePower) из библиотеки SimPowerSystems/ExtraLibrary/Measurements;
- измеритель тока (SimPowerSystems/Measurement/Current Measurement);
- блок Machines Measurement Demux из библиотеки SimPowerSystems/Machines;
- блок Mix, объединяющий три сигнала в один векторный из главной библиотеки Simulink SignalRouting;
- трехфазный измеритель активной и реактивной мощности 3-Phase Instantaneous Active & Reactive Power из библиотеки SimPowerSystems/Extra Library/Discrete Measurements;
- заземление (Ground) из библиотеки SimPowerSystems/Extra Library/Measurements;
- блок RMS для вычисления действующего значения величины из библиотеки SimPowerSystems/ ExtraLibrary/Measurements;
- блок пользователя (SimPowerSystems/Powergui), который измеряет значения V_1 , V_2 , I_1 , I_2 ;
- блоки Display для количественного представления измеренных мощностей (в трех первых окнах блока представлены активные мощности в каждой фазе машины, в трех последних – реактивные мощности), электромагнитного момента, скорости машины и блок Scope для наблюдения тока ротора и статора, а также скорости и момента исследуемой машины из главной библиотеки Simulink/Sinks.

В полях окна настройки параметров асинхронной машины последовательно задаются:

- тип ротора (RotorType), в выпадающем меню этого поля можно задать либо короткозамкнутый, либо фазный ротор;
- система отсчета при анализе (Referenceframe);
- мощность, номинальное действующее линейное напряжение и частота;
- параметры схемы замещения статора;
- параметры схемы замещения ротора;
- параметры ветви намагничивания;
- момент инерции, коэффициент вязкого трения, число пар полюсов;
- начальные условия для моделирования (скольжение, положение ротора, токи статора и их начальные фазы).

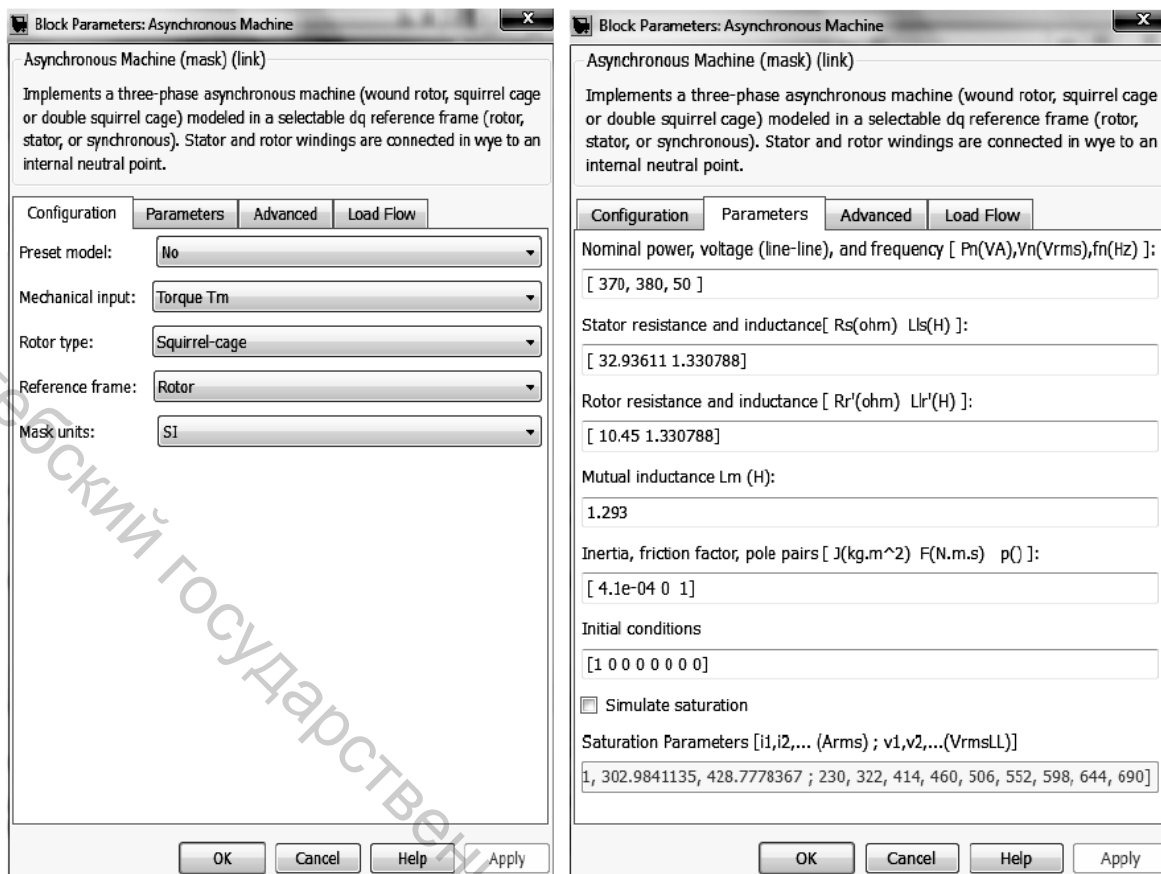


Рисунок 14 – Окно настройки параметров трехфазной асинхронной машины с короткозамкнутым ротором

Параметры машины частично берутся из паспортных, а частично рассчитываются по уравнениям.

Таблица 5.1 – Параметры трехфазных асинхронных машин

№	Тип	P_H КВт	n об/мин	η %	$\cos \varphi$	I_H А	k_1	m_H	m_{max}	$J \cdot 10^{-4}$ кгм ²
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	RAM71A2	0,37	2820	72	0,81	,09	5,0	2,7	2,7	4,1
2	RAM71B2	0,55	2820	74	0,82	1,3	5,0	2,8	2,8	5,3
3	RAM80A2	0,75	2810	76	0,83	1,8	5,2	2,7	2,8	6,9
4	RAM80B2	1,1	2800	77	0,86	2,4	5,2	2,8	2,8	8,2
5	RAM90S2	1,5	2820	79	0,87	3,2	6,5	2,7	3,0	1,5
6	RAM90L2	2,2	2820	82	0,87	4,5	6,5	3,0	3,0	2,1
7	RAM71A4	0,25	1440	71	0,70	0,7	5,0	2,5	3,3	1,0
8	RAM71B4	0,37	1415	73	0,9	0,9	4,5	2,0	2,4	1,2
9	RAM80A4	0,55	1410	74	1,3	1,3	4,5	1,8	2,3	1,4
10	RAM80B4	0,75	1410	76	1,8	1,8	5,0	2,2	2,6	1,9
11	RAM90S4	1,1	1420	77	2,6	2,6	5,0	2,3	2,6	3,4
12	RAM90L4	1,5	1420	79	3,5	3,5	5,5	2,3	2,8	4,2

При моделировании принять номинальные параметры питающей сети равными $U(\Delta/Y) = 220/380\text{В}$; $f = 50$ Гц.

Скорость вращения магнитного поля (синхронная скорость вращения) задается выражением (5.1)

$$n_1 = \frac{60 \cdot f}{p}. \quad (5.1)$$

где p – число пар полюсов исследуемой машины.

Величина номинального скольжения определяется по выражению (5.2)

$$S_n = \frac{n_1 - n}{n_1}. \quad (5.2)$$

Номинальная угловая скорость вращения ротора определяется по выражению (5.3)

$$\omega_n = \frac{\pi \cdot n}{30}. \quad (5.3)$$

Номинальный, максимальный и пусковой моменты определяются по выражению (5.4)

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n}; M_{\text{макс}} = m_{\text{макс}} \cdot M_n; M_n = m_n \cdot M_n. \quad (5.4)$$

Приведенное активное сопротивление ротора определяется по выражению (5.5)

$$R_r = \frac{1}{3} \cdot \frac{(P_n + \Pi_{\text{мех}})}{I_n^2 \cdot \frac{1 - S_n}{S_n}}. \quad (5.5)$$

где $\Pi_{\text{мех}} = (0,01 \dots 0,05) \cdot P_n$.

Отсюда по выражению (5.6) находим величину активного сопротивления статора

$$R_s = \frac{U \cdot \cos \varphi \cdot (1 - \eta)}{I_n} - C^2 \cdot R_r - \frac{\Pi_{\text{мех}}}{3 \cdot I_n^2}. \quad (5.6)$$

где $U = \frac{U_n}{\sqrt{3}}$ – фазное номинальное напряжение.

При определении активных сопротивлений статора и ротора механические потери принимаются равными (0,01–0,05) от номинальной мощности. При этом меньшие значения соответствуют машинам с большей выходной мощностью. Коэффициент приведения C принимается равным 1,01–1,05 (меньшие значения для машин большей мощности).

Приведенная индуктивность рассеяния ротора определяется по выражению (5.7)

$$L_{is} = L_{ir} = \frac{U}{4 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot (1 + C^2) \cdot k_1 \cdot I_n}. \quad (5.7)$$

Индуктивность статора определяется по выражению (5.8)

$$L_s = \frac{U}{2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot I_n \sqrt{1 - (\cos \varphi)^2} - \frac{2}{3} \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot M_{\max}}{p \cdot U} \cdot \frac{S_n}{S_{кр}}}. \quad (5.8)$$

Индуктивность контура намагничивания определяется по выражению (5.9)

$$L_m = L_s - L_{ir}. \quad (5.9)$$

В меню окна настройки параметров универсального блока измерения переменных машин поля Machine type задается тип машины. Флажками выбираются переменные для измерения.

В полях окна настройки параметров трехфазного источника питания задаются:

- амплитуда фазного напряжения источника (В);
- начальная фаза в градусах;
- частота (Гц);
- внутреннее сопротивление (Ом) и индуктивность источника (Гн).

Напряжение и частота источника должны соответствовать параметрам асинхронной машины.

В окне настройки блока измерения активной и реактивной мощности задается только один параметр – частота, которая должна быть равна частоте источника питания.

В полях окна настройки дисплея указывается формат представления числовых результатов, в поле Decimation (разбивка) задается число шагов вычисления, через которые значения выводятся на дисплей. Установка в поле Sampletime значения -1 синхронизирует работу блока с шагом вычислений.

В полях окна настройки блока Мих, объединяющего два сигнала в один векторный, задаются число входов и внешний вид представления блока.

Порядок проведения лабораторной работы

Параметры асинхронной машины для выполнения работы задаются преподавателем. Заполняется окно настройки параметров моделирования.

Снятие механической характеристики машины в двигательном и генераторном режимах производится на модели при изменении нагрузочного момента во всем диапазоне $(-1,5 \div 1,5)$ от номинального). При этом для каждого значения момента нагрузки осуществляется моделирование. При проведении исследований заполняется таблица $\omega(M)$.

Снятие рабочих характеристик двигателя проводится на модели при изменении нагрузочного момента в пределах $0 \div 1,2$ от номинального. При этом для каждого значения момента нагрузки осуществляется моделирование.

При проведении исследований заполняется таблица 5.1.

Таблица 5.1 – Измеренные и рассчитанные значения

M Нм	Измерения					Вычисления				
	P_1 Вт	Q_1 ВА	U_1 В	I_1 А	ω рад/с	φ град	$\cos \varphi$	P_2 Вт	η %	s %

Вычисления производятся по выражениям (5.10)

$$\varphi = \arctg \frac{Q_1}{P_1}; P_2 = M \cdot \omega; \eta = \frac{P_2}{P_1}; S = \frac{\omega_1 - \omega}{\omega_1}. \quad (5.10)$$

По данным таблиц строится механическая характеристика машины и на отдельном графике – рабочие характеристики.

Временные зависимости переменных состояния машины можно наблюдать на экране осциллографа. Здесь видны и переходной процесс при пуске машины, и установившиеся процессы.

Содержание отчета

1. Номер лабораторной работы и варианта, тема, цель.
2. Схема модели и описание виртуальных блоков.
3. Механическая характеристика машины в двигательном и генераторном режимах.
4. Рабочие характеристики машины в двигательном режиме.
5. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. В чем состоит принцип действия трехфазного асинхронного двигателя?
2. Какие виды асинхронных двигателей Вы знаете?
3. Как влияет изменение питающего напряжения на вращающий момент асинхронного двигателя?
4. Перечислите способы регулирования частоты вращения асинхронных двигателей.
5. Что такое номинальное и критическое скольжение?
6. Чем определяется перегрузочная способность асинхронного двигателя?
7. Каковы преимущества и недостатки асинхронных двигателей?
8. Особенности конструкции асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 6 ИССЛЕДОВАНИЕ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Цель работы: снятие характеристик синхронного генератора при работе на пассивную нагрузку.

Содержание работы

1. Снятие угловой характеристики синхронного генератора.
2. Снятие внешней и рабочих характеристик синхронного генератора при активной нагрузке.
3. Снятие внешней характеристики синхронного генератора при активно-индуктивной нагрузке.
4. Снятие внешней характеристики синхронного генератора при активно-емкостной нагрузке.

Модель виртуальной установки для исследования синхронного генератора показана на рисунке 15.

Модель синхронного генератора содержит:

- исследуемую трехфазную синхронную машину Simplified Synchronous Machine SI Units из библиотеки SimPowerSystems/Machines;
- блок Machines Measurement Demux из библиотеки SimPowerSystems/Machines;
- трехфазный измеритель активной и реактивной мощности 3-Phase Instantaneous Active & Reactive Power из библиотеки SimPowerSystems/Extra Library/Discrete Measurements;

- трехфазную нагрузку 3-Phase Parallel RLC Load из библиотеки SimPowerSystems/Elements;
- блоки RMS и Fourier (SimPowerSystems/Extra Library/Measurement), для измерения действующих значений, амплитуды и начальной фазы;
- блоки Display для количественного представления измеренных величин;
- блок Scope для наблюдения тока якоря, скорости и электромагнитной мощности синхронной машины из главной библиотеки Simulink/Sinks;
- блок Constant для задания ЭДС возбуждения из главной библиотеки Simulink/Source;
- сумматор Sum из библиотеки Simulink/Math Operations;
- блок пользователя (SimPowerSystems/Powergui), который измеряет значения $V1$, $V2$, $I1$, $I2$;
- блоки Mux из главной библиотеки Simulink/SignalRouting.

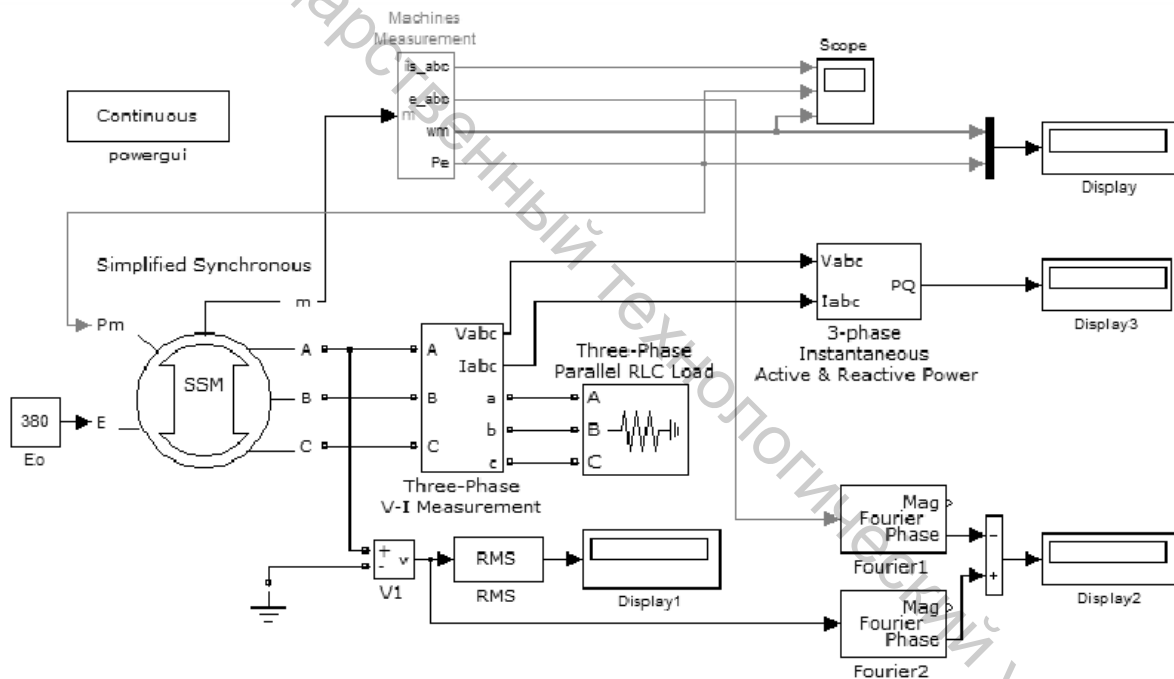


Рисунок 15 – Модель для исследования синхронного генератора

Описание лабораторной установки

В полях окна настройки параметров синхронного генератора последовательно задаются:

- схема соединения обмоток статора машины. В выпадающем меню этого поля можно выбрать соединение звездой без нулевого и с нулевым проводом;
- полная мощность (ВА), действующее линейное напряжение и частота;

- момент инерции ($\text{кг}\cdot\text{м}^2$), коэффициент демпфирования, число пар полюсов;
- активное сопротивление и индуктивность обмотки якоря (статора);
- начальные условия при пуске модели.

В окне блока настройки измерителя действующих значений задается частота, на которой производятся измерения.

В полях окна настройки блоков Fourier задается частота и номер гармоники измеряемого напряжения.

В поля окна настройки параметров нагрузки вводятся действующее линейное напряжение и частота, которые должны быть согласованы с напряжением и частотой генератора, активная, индуктивная и емкостная мощности. Удобней эти мощности задавать как номинальную мощность генератора, умноженную на коэффициент.

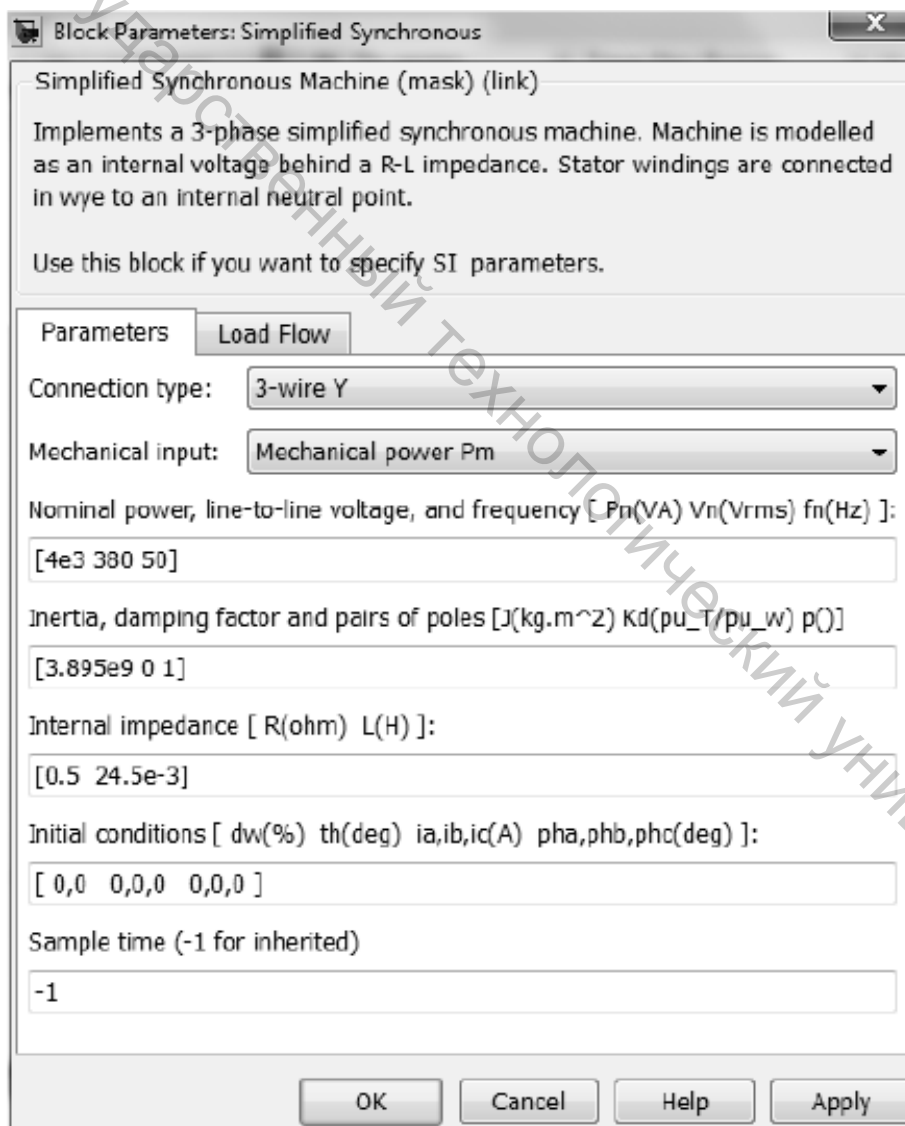


Рисунок 16 – Окно настройки синхронного генератора

Порядок проведения лабораторной работы

Параметры синхронной машины для выполнения работы задаются преподавателем.

Значение ЭДС возбуждения при проведении измерений остается постоянным, равным номинальному линейному напряжению генератора в режиме холостого хода. Момент инерции машины принят равным бесконечности, коэффициент демпфирования и начальные условия при пуске модели – нулевыми.

Заполняется окно настройки параметров моделирования согласно данным из таблицы 6.1.

Снятие угловой характеристики генератора производится при изменении активной мощности нагрузки от 0 до 1,6 от номинальной мощности генератора.

При этом коэффициент при активной мощности изменяется от 0 до 1,6 с шагом 0,2. Коэффициенты при реактивных мощностях равны нулю.

Таблица 6.1 – Параметры трехфазных синхронных генераторов

№	S_n кВА	U_n В	R_{cm} Ом	L_{cm} мГн	p
1	4	380	0,50	24,5	1
2	5	380	0,40	19,6	1
3	6	380	0,33	16,3	1
4	7	380	0,29	14,0	1
5	8	380	0,25	12,3	2
6	9	380	0,22	10,9	2
7	10	380	0,20	9,8	2
8	11	660	0,55	15,5	2
9	12	660	0,50	14,2	2
10	13	660	0,46	13,1	2
11	14	660	0,43	12,2	2
12	15	660	0,40	11,3	2

Для каждого значения активной мощности осуществляется моделирование. При проведении исследований заполняется таблица 6.2.

Таблица 6.2 – Измеренные и рассчитанные значения

Измерения			Вычисления
P_z Вт	ω рад/с	θ град	M Нм

Момент на валу генератора вычисляется по формуле (6.1)

$$M = \frac{P_z}{\omega}. \quad (6.1)$$

По данным таблицы строится зависимость $M = f(\Theta)$.

Снятие внешней и рабочих характеристик генератора при активной нагрузке производится при изменении активной мощности нагрузки в диапазоне 0–1,2 от номинальной. По данным измерений заполняется таблица 6.3.

Таблица 6.3 – Измеренные и рассчитанные значения

Измерения				Вычисления		
$P_{нагр}$ Вт	$Q_{нагр}$ ВА	ω рад/с	P_2 Вт	U_1 В	$\cos \varphi$	I_a А

Вычисления производятся по формулам (6.2)

$$\varphi = \arctg \frac{Q_{нагр}}{P_{нагр}}; I_a = \frac{P_{нагр}}{U_1 \cdot \cos \varphi}. \quad (6.2)$$

По результатам измерений и вычислений строится внешняя характеристика

$$U_1 = f(I_a).$$

и рабочие характеристики

$$U_1, \cos \varphi, I_a, = f(P_2).$$

Снятие внешних характеристик при активно-индуктивной и активно-емкостной нагрузках производится аналогично предыдущему пункту. При изменении мощности нагрузки необходимо соблюдать условие постоянства коэффициента мощности. По результатам измерений заполняется таблица, аналогичная таблице 6.3, и строятся внешние характеристики на том же графике, на котором построена внешняя характеристика предыдущего опыта.

Мгновенные значения токов в фазах якоря генератора, скорость и мощность генератора можно наблюдать на экране осциллографа.

Содержание отчета

1. Номер лабораторной работы и варианта, тема, цель.
2. Схема модели и описание виртуальных блоков.
3. Угловая характеристика генератора.
4. Внешние характеристики генератора при различных коэффициентах

мощности нагрузки.

5. Рабочие характеристики генератора.
6. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Каково назначение синхронных машин?
2. Опишите принцип действия синхронных машин?
3. Приведите основные конструкционные элементы синхронных машин?
4. Характеристики синхронного генератора.
5. Реакция якоря в синхронных генераторах.

Витебский государственный технологический университет

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Кацман, М. М. Электрические машины / М. М. Кацман. – Издательский центр «Академия», 2008. – 496 с.
2. Копылов, И. П. Электрические машины: учебник для вузов / И. П. Копылов. – 5-е изд., стер. – М.: Высш. шк., 2006. – 607 с.
3. Штыков, В. Ф. Электрические машины [Электронный ресурс]: учебное пособие / В. Ф. Штыков. – СПб. : Изд-во СЗТУ, 2009. – 475 с.
4. Герман-Галкин, С. Г. Электрические машины: лабораторные работы на ПК / С. Г. Герман-Галкин, Г. А. Кордонов. – СПб.: КООНА принт, 2003. – 256 с.

Учебное издание

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Лабораторный практикум

Составители:

Клименкова Светлана Александровна

Куксевич Виталий Федорович

Черненко Дмитрий Владимирович

Редактор *Т.А. Осипова*

Корректор *Т.А. Осипова*

Компьютерная верстка *Д.В. Черненко*

Подписано к печати 26.08.2021. Формат 60x90^{1/16}. Усл. печ. листов 2,3.

Уч.-изд. листов 2,8. Тираж 35 экз. Заказ № 206.

Учреждение образования «Витебский государственный технологический университет»
210038, г. Витебск, Московский пр., 72.

Отпечатано на ризографе учреждения образования

«Витебский государственный технологический университет».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 1/172 от 12 февраля 2014 г.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 3/1497 от 30 мая 2017 г.