

LabVIEW: Лабораторное

Исследование Электрических Цепей и Машин

Др. Несими Эртугрул,

*Факультет Электрической и Электронной Техники,
Университет Аделаиды, Австралия*

Оригинальное издание: Июнь 2000

В переводе на русский язык: Сентябрь 2002

Код продукта 322765A-01

Авторские права

Все права на настоящую публикацию зарегистрированы в 2000г. корпорацией National Instruments Corporation, адрес: 11500 North Mopac Expressway, Austin, Texas 78759-3504.

Университеты, институты и другие образовательные учреждения вправе воспроизводить настоящую публикацию или любую ее часть в образовательных целях. Для любых иных целей настоящая публикация не может быть воспроизведена либо передана ни в какой форме – ни в электронной, ни в виде твердой копии, включая фотокопию, запись на любом носителе информации, а также переведена на другой язык (полностью или частично), без предварительного письменного разрешения от компании National Instruments Corporation.

Торговые марки:

LabVIEW™ является зарегистрированной торговой маркой компании National Instruments Corporation. Наименования продуктов и названия компаний, упоминающиеся в тексте данной публикации, являются торговыми марками соответствующих компаний.

Дополнительная информация

За дополнительной информацией, касающейся данной лабораторной работы, пожалуйста, обращайтесь к автору, д-ру Несими Эргугрулу.

Электронная почта: nesimi@eleceng.adelaide.edu.au

Обратная связь

Российское представительство National Instruments с благодарностью примет ваши рецензии, отзывы, замечания и пожелания по поводу содержания, качества перевода и оформления русского издания данного учебного курса.

Наша контактная информация:

117049 г.Москва, Ленинский проспект 1/2, офис 1013

тел/факс +7 (095) 238 7139

электронная почта: *ni.russia@ni.com*, *books2002@labview.ru*

Интернет: <http://ni.com/russia>, <http://www.labview.ru>

Штаб-квартира корпорации National Instruments:

11500 North Mopac Expressway Austin, Texas 78759-3504 USA Tel: 1 (512) 794 0100

Международные представительства:

Австралия 03 9879 5166, Австрия 0662 45 79 90 0, Бельгия 02 757 00 20, Бразилия 011 284 5011, Канада (Калгари) 403 274 9391, Канада (Онтарио) 905 785 0085, Канада (Квебек) 514 694 8521, Китай 0755 3904939, Дания 45 76 26 00, Финляндия 09 725 725 11, Франция 01 48 14 24 24, Греция 30 1 42 96 427, Германия 089 741 31 30, Гонконг 2645 3186, Индия 91805275406, Израиль 03 6120092, Италия 02 413091, Япония 03 5472 2970, Корея 02 596 7456, Мексика 5 280 7625, Мексика (Монтеррей) 8 357 7695, Нидерланды 0348 433466, Новая Зеландия 09 914 0488, Норвегия 32 27 73 00, Польша 0 22 528 94 06, Португалия 351 1 726 9011, Россия 7 095 238 7139, Сингапур 2265886, Испания 91 640 0085, Швеция 08 587 895 00, Швейцария 056 200 51 51, Тайвань 02 2528 7227, Великобритания 01635 523545

Содержание

Введение	4
-----------------------	----------

Лабораторная работа 1. Основы магнитных цепей..... 8

Основы и расчет магнитных цепей	8
Определение гистерезисных характеристик магнитных цепей и их анализ	14

Лабораторная работа 2. Определения и методы измерения в цепях переменного тока 23

Однофазные цепи переменного тока: принципы и определения	23
Определение мощности и компенсация коэффициента мощности в однофазных цепях переменного тока	31
Преобразование звезда / треугольник и треугольник / звезда в трехфазных цепях переменного тока	38
Напряжения и токи в нагрузках переменного тока, включенных по схемам звезда и треугольник	42
Векторные диаграммы напряжений и токов в трехфазных системах	46
Мощность в трехфазных цепях переменного тока	50

Лабораторная работа 3. Опыты с Электрическими Машинами 59

Определение момента инерции машин вращения	59
Индукционный (Асинхронный) Мотор	64
Синхронизация синхронного генератора	70

Лабораторная работа 4. Динамическое моделирование электромоторов..... 77

Моделирование индукционного (асинхронного) электромотора	77
Динамическое моделирование безщеточных электромоторов переменного тока с постоянным магнитом	82
Моделирование электромотора постоянного тока	89

Приложение А. Оборудование Лаборатории и описание аппаратуры..... 94

Введение



В течение последних десятилетий области электрической, электронной и компьютерной техники весьма тесно переплелись между собой. И если теоретические основы этих разделов знания достаточно сложно разделить, то экспериментальные работы, относящиеся к каждому из них, имеют свои отличительные особенности, требующие особого внимания.

В настоящем лабораторном практикуме в качестве средства программирования задач получения и обработки данных выбран программный пакет LabVIEW. Аппаратные средства физических установок работают под управлением оригинальных программ на LabVIEW. Данный курс сопровождается набором интерактивных экспериментов на LabVIEW, относящихся к предмету «Электрические машины и цепи».

Общая задача данного лабораторного практикума состоит в выполнении как специальных, так и междисциплинарных исследовательских и тренировочных работ, обеспечивающих глубокие экспериментальные навыки в областях электрической и электронной техники.

Главным преимуществом лабораторного исследования в этих областях является улучшение понимания процессов в электрических цепях, электрических машинах и электромеханических устройствах, приобретение навыков работы с сигналами и управлением в реальном времени, а также наблюдение ограничений применимости теоретических моделей. Необходимо, однако, подчеркнуть, что поставленная выше задача не может быть достигнута без предварительной теоретической подготовки и практических упражнений. Теоретическая подготовка должна включать изучение соответствующих книг и лекционные занятия.

Настоящий лабораторный практикум предназначен для изучения основ электротехники. Основная аудитория курса – студенты 1-го и 2-го курсов электротехнических специальностей ВУЗов. В дополнение к этому, *Виртуальные Приборы* (ВП) из Лабораторной работы 4 могут быть использованы для изучения ряда расширенных методов управления в специальности "Электрические машины и приводы".

Основная идея, положенная в основу настоящего курса, заключается в том, чтобы придать моделированию максимально возможную гибкость, позволяющую студенту-пользователю самостоятельно разрабатывать наборы программных приложений, используя базовые принципы, изложенные в курсе. Более того, благодаря открытой структуре

виртуальных приборов, они могут быть впоследствии дополнены модулями, предназначенными для работы с реальной аппаратурой в реальном времени, о чем будет сказано в следующем разделе.

Эксперименты в данном руководстве разделены на четыре основные группы. В каждой из групп содержится набор опытов. Опыты, предлагаемые в главных разделах, содержат основную информацию для проведения и объяснения экспериментов. Дополнительно, в конце ряда подразделов содержатся примерные блок-схемы, иллюстрирующие возможность реализации изложенного материала в эксперименте реального времени.

Лабораторная работа 1 содержит два опыта, посвященных магнитным цепям и определению кривых намагниченности (или ВН характеристик). В Лабораторной работе 2 изучается большое количество основных определений и методик измерений в цепях одно- и трехфазного переменного тока. Этот раздел сопровождается легко изменяемыми, но при этом весьма производительными инструментами визуализации, использующими аппарат «векторных диаграмм».

Три опыта, посвященных электрическим машинам вращения, приведены в Лабораторной работе 3. Эксперименты, сопровождающие этот раздел, могут быть легко внедрены в системы реального времени. Лабораторная работа 4 содержит три расширенных виртуальных прибора для изучения безщеточных моторов с постоянным магнитом, а также два простых инструмента для моделирования моторов постоянного тока и асинхронных электродвигателей.

Выполнение приложений в реальном времени

Как было ранее сказано, в конце ряда разделов приведены примеры блок-схем, пригодных для использования в системах реального времени.

Поскольку аппаратное обеспечение и требования к согласованию сигналов в разных лабораториях ВУЗов могут отличаться, невозможно создать универсальное решение по внедрению этих примеров в системы реального времени. Учитывайте, что при использовании примеров в системах реального времени потребуются изменения в блок-диаграммах соответствующих ВП. В первую очередь, замените источники смоделированных сигналов на виртуальные подприборы (Sub-VI), обеспечивающие получение реальных сигналов с устройств аналогового ввода-вывода (Data Acquisition - DAQ), как показано на Рисунке 1.

Во-вторых, обеспечьте правильное подключение цепей согласования сигналов к плате ввода-вывода и убедитесь, что входные сигналы согласованы до правильного уровня.

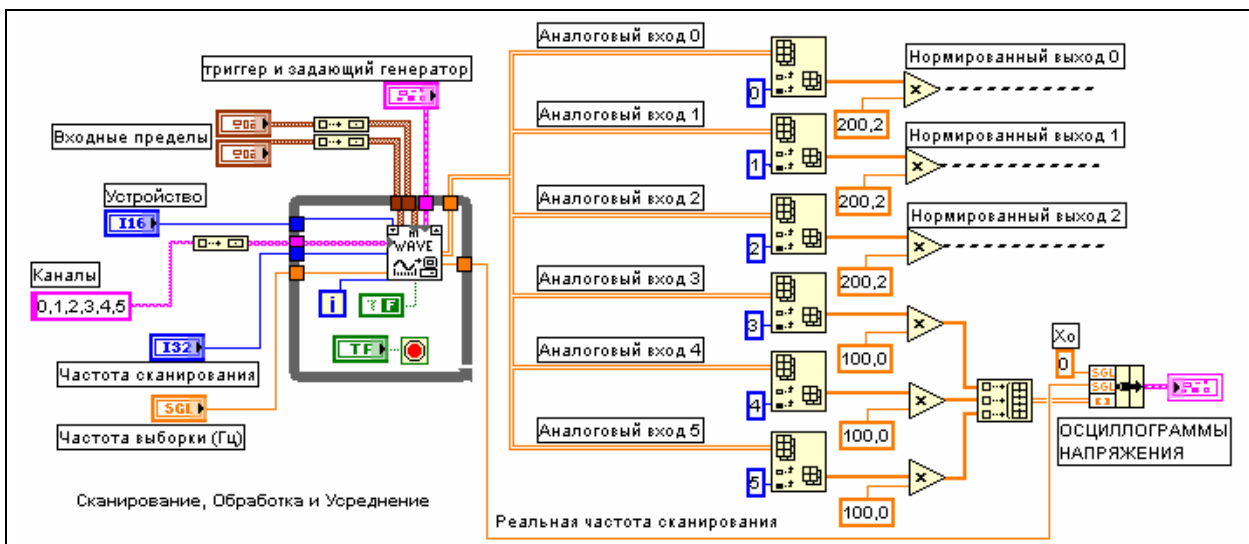


Рисунок 1. Пример модификации виртуального прибора для применения в эксперименте реального времени.

Можно добавить, что технические характеристики использованных в вашей лаборатории машин не принципиальны для возможности реализации опытов, представленных в этой книге. Как указано выше, исследуемые сигналы должны быть ослаблены и изолированы до уровня, безопасного для примененных систем ввода-вывода и операторов (студентов). Полоса пропускания устройств преобразования сигналов важна для точности проводимых измерений.

Основная часть экспериментальных систем реального времени состоит из пяти базовых частей: исследуемого устройства, преобразователей (датчиков) сигнала, персонального компьютера (ПК), снабженного платой ввода-вывода и соответствующего программного обеспечения, как показано на Рисунке 2. Некоторые минимальные требования к аппаратному обеспечению эксперимента в реальном времени приведены ниже в качестве примера. Детальные описания аппаратуры, использовавшейся в экспериментах, будут приведены в соответствующих разделах под заголовком «Описание использованной аппаратуры».

Система ввода-вывода: минимум 8 каналов ввода с дифференциальным входом и 12-разрядным разрешением, частота выборки не ниже 100 кГц.

Компьютер: ПК класса Pentium, 32 Мб ОЗУ, емкость жесткого диска >1 Гб.

Датчики: модули датчиков тока и напряжения, таких как разделительные усилители, датчики эффекта Холла – предназначенные для преобразования и разделения сигналов.

Исследуемые устройства: реостат, однофазный трансформатор, электрические машины вращения (электромотор постоянного тока, индукционный мотор и синхронный генератор, тахогенератор постоянного тока – подсоединенные к общему валу).

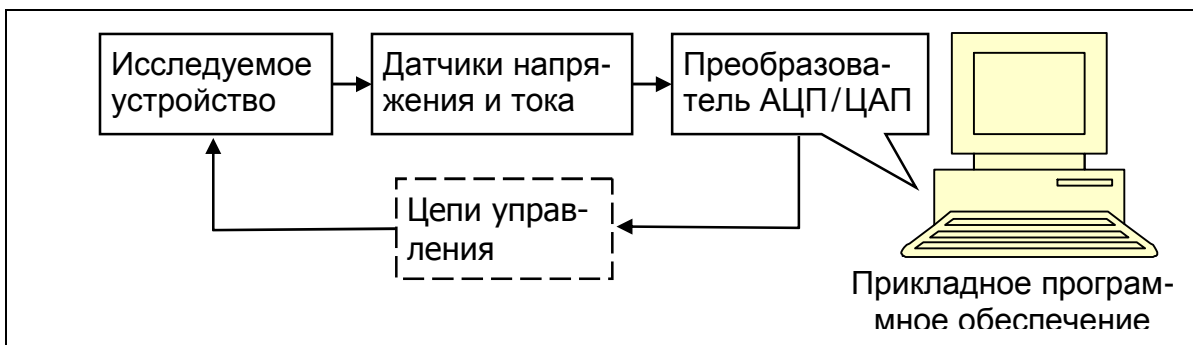


Рисунок 2. Базовые компоненты экспериментальной системы реального времени

Меры предосторожности при работе с экспериментальными установками реального времени

Виртуальные приборы, включенные в настоящий курс, разработаны для реальных экспериментальных систем, работающих при высоких напряжениях. **Не забывайте**, что нарушение соответствующих правил техники безопасности может привести к **несчастному случаю**, в том числе с **угрозой для жизни** операторов.

Таким образом, при работе с высоковольтными установками следует:

- убедиться в достаточном уровне теоретической подготовки операторов в области Электрических машин и цепей, который позволит им предвидеть и избегать потенциальных опасностей
- проверять правильность подключения цепей и обеспечение изоляции перед непосредственным выполнением экспериментов
- подключение цепей выполнять одной рукой
- **НЕ ИСПОЛЬЗОВАТЬ** поврежденные кабели и/или приборы,
- **НЕ ИСПОЛЬЗОВАТЬ "метод проб и ошибок"** для выяснения назначения или проверки того или иного устройства.

Лабораторная работа 1.

Основы магнитных цепей



Основы и расчет магнитных цепей

Задачи раздела

По завершении этого эксперимента студенты должны:

- Понимать фундаментальные основы магнитных цепей,
- Уметь анализировать две типичные магнитные цепи, используя имеющиеся инструменты моделирования,
- Знать, к чему приводят: изменение физических размеров и числа витков обмоток и краевые эффекты в магнитных цепях.

Литература

1. Circuits. Devices and Systems. R. Smith and R. Dorf, John Wiley and Sons, 1992.
2. Electrical Machines, Drives and Power Systems, T. Wildi, Prentice Hall International, 1991.
3. Electrical Engineering: Principles and Applications, A.R. Hambley, Prentice Hall, 1997.
4. Electromechanical Energy Devices and Power Systems, Z.A. Yamayee and J.L. Bala, John Wiley and Sons, 1994.

Теоретическое введение

Многие технические устройства используют, в той или иной форме, магнитные цепи, содержащие катушки, надетые на магнитные материалы (например, на железный сердечник). При оценочном анализе компонент магнитных цепей на этапе разработки можно пользоваться приближением простой цепи постоянного тока. Тем не менее, следует учитывать присущие магнитным цепям ограничения, такие как насыщение, нелинейность, утечки и краевые потоки. При анализе магнитных цепей удобно прослеживать аналогию между электрическими и магнитными величинами. Так мы можем упростить анализ магнитной цепи, тем не менее, некоторые эффекты - например, граничные - присущие реальным

магнитным цепям и затрудняющие точное моделирование, следует принимать во внимание. Далее изложены основные положения для анализа магнитных цепей:

- На частотах ниже 50 Гц применим закон Ампера. (1-1)

$$N \cdot I = \sum_k^N H_k l_{mk} \quad (0.1)$$

Здесь N – число витков катушки, I – ток в цепи, H_k – плотность поля, l_{mk} – действующее значение длины магнитопровода (сердечника).

Произведение в левой части уравнения (1-1), NI , равное магнитодвижущей силе (М.Д.С.) катушки, еще называют ампер-витками.

- Плотность потока магнитной индукции B однородна по поверхности, следовательно, магнитный поток f и напряженность магнитного поля H постоянны, а вектора f и H сонаправлены.

$$f = B \cdot A \quad (0.2)$$

- Здесь B – плотность потока индукции, A – поперечное сечение однородного участка магнитопровода.
- Полный поток через узел равен нулю.
- Одномерный случай может быть использован вместо реального трехмерного для упрощения анализа магнитного поля.
- Поперечные сечения всех участков цепи имеют одинаковую площадь.
- При всех вычислениях в качестве длины магнитной цепи можно использовать ее среднее значение

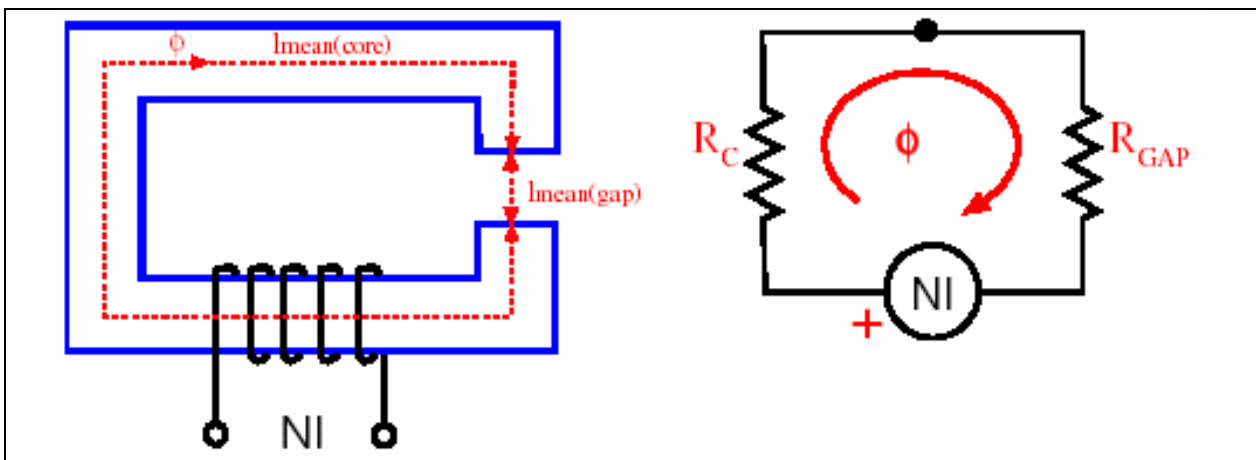


Рисунок 1-1. Пример магнитной цепи: внешний вид магнитопровода на плоскости, эквивалентная магнитная схема, показывающая магнитные сопротивления R и источник М.Д.С., NI .

В дополнение к вышеизложенным положениям, если учитывать краевые эффекты (распространение линий потока в воздушном зазоре), плотность потока в воздушном зазоре будет меньше, чем в сердечнике, и рассчитать его аналитически становится невозможно. Тем не менее, краевые эффекты могут быть учтены, если эффективно увеличить длину зазора (это справедливо и для трехмерного случая, в предположении, что площади поперечных сечений одинаковы).

Как только будет построена эквивалентная магнитная схема цепи, для расчета ее параметров можно использовать закон Ампера. Для применения закона Ампера, в зависимости от неизвестного параметра, используется один из следующих методов:

- Определение магнитодвижущей силы \mathcal{M} при заданной магнитной индукции B
- Определение магнитодвижущей силы для заданного потока Φ .
- Определение потока для заданной М.Д.С. (методом подбора или графическим методом).

В моделирующих инструментах настоящего раздела использовано два первых аналитических метода.

В магнитном сердечнике плотность магнитного потока (индукция) B связана с напряженностью магнитного поля H нелинейной зависимостью – BH , еще именуемой кривой намагничивания. Тангенс угла наклона этой зависимости носит название магнитной проницаемости материала μ , и измеряется в Генри/метр. Зависимость между B и H задается следующим образом:

$$B = m \cdot H \quad (0.3)$$

Как можно заметить, из зависимости BH следует, что проницаемость зависит от текущего значения магнитной индукции. В большинстве случаев электромагнитные устройства и приборы предназначены для работы на линейном участке BH -характеристики магнитного материала. Далее по ходу обсуждения полагаем, что проницаемость магнитного материала сердечника является постоянной величиной, определяемой относительно проницаемости вакуума, равной μ_0 .

$$m = \mu_r \mu_0 \quad (0.4)$$

где μ_r – относительная проницаемость материала сердечника. Магнитное сопротивление цепи (или сопротивление магнитному потоку) определяется как $R = l / m \cdot A$, где l – среднее значение длины, а A – площадь поперечного сечения однородного участка магнитной цепи.

Учебные задания

В этом разделе описываются две типичные магнитные цепи.

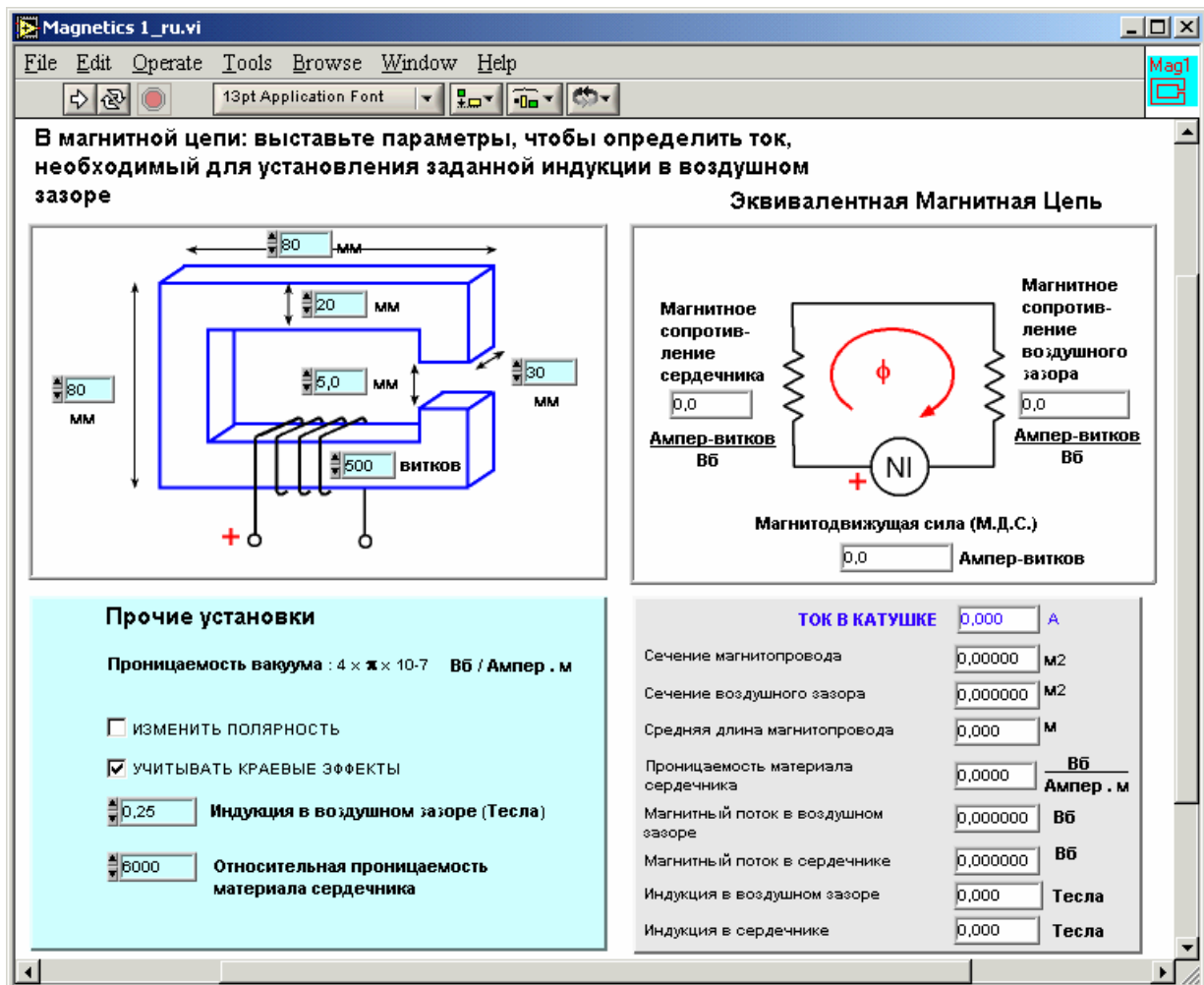
Приведенный здесь инструмент моделирования в целом не нуждается в

комментариях. Пользователь может изменять входные данные с помощью управляющих окошек на лицевой панели и считывать вычисленные результаты с размещенных там же индикаторов.

Для выполнения первого опыта предлагается ВП **«Магнитная Цепь 1»** (**«Magnetics 1.vi»**). На Рисунке 1-2 показана лицевая панель и поясняющая таблица к этому прибору. Второй опыт посвящен анализу более сложной магнитной цепи. Соответствующий ВП именуется **«Магнитная Цепь 2»** (**«Magnetics 2.vi»**), его лицевая панель представлена на Рисунке 1-3.

Постановки задачи приведены непосредственно на лицевых панелях соответствующих ВП.

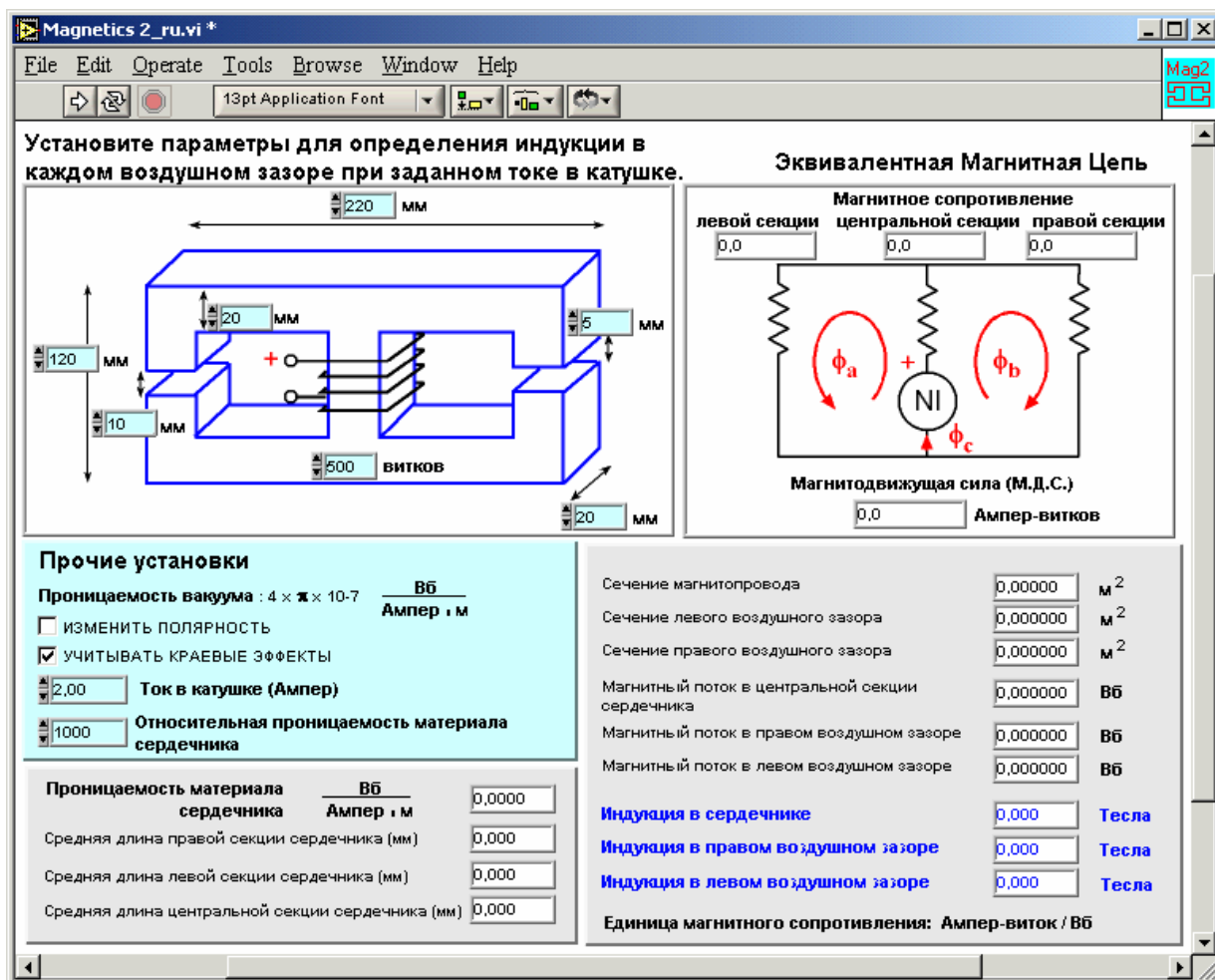
В обоих виртуальных приборах лицевые панели содержат по четыре отдельных секции. Верхняя левая секция отображает объемный вид магнитной цепи с управляющими окошками для ввода физических размеров магнитного сердечника. Двумерная схема эквивалентной магнитной цепи (аналогичная электрической цепи) приведена в правом верхнем углу передней панели. Эта секция показывает также направление потока в цепи и полярность источника М.Д.С. и отображает значения магнитного сопротивления и М.Д.С. источника на эквивалентной схеме. Две другие секции лицевой панели обеспечивают дополнительные входные и индикаторные окошки для ввода/вывода оценочных и вычисленных значений в этом ВП.



«Постановка задачи»

<p>Здесь приведен объемный вид моделируемой магнитной цепи. Используйте численные элементы управления, чтобы установить физические размеры цепи и число витков катушки. Эти параметры могут быть изменены в любой момент во время выполнения ВП.</p>	<p>Здесь приведена эквивалентная магнитная цепь и показано направление потока в цепи. Числовые индикаторы, имеющиеся в этой секции, отображают параметры цепи.</p>
<p>Здесь могут быть установлены: требуемая плотность потока в воздушном зазоре и относительная проницаемость материала сердечника. Чтобы учесть краевые эффекты или изменить полярность источника питания, поставьте пометки в соответствующих полях. При установке отметки «ИЗМЕНИТЬ ПОЛЯРНOSTЬ» изменится изображение цепи и эквивалентная схема.</p>	<p>В этой секции находятся индикаторы, также относящиеся к анализируемой цепи. При изменении установок в ходе моделирования эти значения будут автоматически пересчитаны. Рассчитанное значение силы тока отображается синим цветом.</p>

Рисунок 1- 2. Лицевая панель «Магнитная Цепь 1» (Magnetics 1.vi) и поясняющая таблица



«Постановка задачи»

<p>Здесь приведен объемный вид моделируемой магнитной цепи. Используйте численные элементы управления, чтобы установить физические размеры цепи и число витков катушки. Эти параметры могут быть изменены в любой момент во время выполнения ВП.</p>	<p>Здесь приведена эквивалентная магнитная цепь и показано направление потока в цепи. Числовые индикаторы, имеющиеся в этой секции, отображают вычисленные параметры цепи.</p>
<p>Здесь могут быть установлены некоторые параметры магнитопровода. Для учета краевых эффектов и изменения полярности источника отметьте соответствующие поля</p>	<p>В этой подсекции отображаются оценочные значения параметров. При их изменении в ходе моделирования показания индикаторов автоматически изменятся на обновленные. Оценочные значения потока и индукции также приведены здесь.</p>
<p>Здесь отображаются четыре расчетных параметра.</p>	

Рисунок 1- 3. Лицевая панель «Магнитная Цепь 2» (Magnetics 2.vi) и поясняющая таблица

Используйте кнопку LabVIEW «Непрерывный ЗАПУСК» для запуска виртуального прибора и выполните следующие задания:

- Используя значения, заданные по умолчанию, путем самостоятельных вычислений покажите, что значения на индикаторах правильны.
- Измените относительную проницаемость сердечника и наблюдайте изменения его магнитного сопротивления, а также величины М.Д.С. Изменились ли при этом другие параметры? Почему?
- Проанализируйте результаты изменения параметров «Индукция в воздушном зазоре» (Опыт 1) и «Ток в катушке» (Опыт 2).
- Поменяйте значение числа витков катушки и определите параметры, подвергшиеся наибольшему изменению.
- Измените площадь поперечного сечения и размеры магнитного сердечника и наблюдайте вариации величины магнитного сопротивления.
- Краевые эффекты приводят к расходимости линий потока в воздушном зазоре магнитной цепи. При проведении моделирования используйте элемент управления «Учитывать краевые эффекты» и наблюдайте изменение величины «Сечение воздушного зазора».
- Пронаблюдайте воздействие изменения полярности источника питания на направление потока и полярности М.Д.С.

Определение гистерезисных характеристик магнитных цепей и их анализ

Задачи раздела

По завершении этого эксперимента студенты должны:

- Понимать природу явлений гистерезиса в магнитных цепях.
- Получить гистерезисные характеристики и оценить гистерезисные потери.
- Изучить действие высших гармоник на осциллограммы напряжения и тока.

Литература к разделу

1. Circuits, Devices and Systems, R. Smith and R. Dorf, John Wiley and Sons, 1992.
2. Electrical Machines, Drives and Power Systems, T. Wildi, Prentice Hall International, 1991.

3. Electrical Engineering: Principles and Applications, A.R. Hambley, Prentice Hall, 1997.
4. Electromechanical Energy Devices and Power Systems, Z.A. Yamayee and J.L. Bala, John Wiley and Sons, 1994.

Теоретическое введение

В цепи переменного тока, окруженной железом или иным магнитным материалом, возникает явление гистерезиса, обусловленное цикличностью магнитного потока в переменном магнитном поле.

Переменный магнитный поток, возникающий при протекании тока, приводит к возникновению в электрической цепи противодействующей Э.Д.С. В идеале, если внешняя Э.Д.С. от протекающего тока представляет собой синусоидальную волну, противодействующая сила и результирующий магнитный поток также будут иметь форму синусоидальной волны. Однако, осциллограмма переменного тока в магнитной цепи всегда сильно подвержена искажениям, обусловленным явлением «магнитного насыщения» сердечника магнитной цепи и, следовательно, не является точной синусоидой.

Эта искаженная волна тока может быть разложена на две компоненты: точную синусоидальную волну, по эффективной интенсивности и мощности равную искаженной, и компоненту, состоящую из высших гармоник (известных также как реактивные составляющие) – в основном, из третьей гармоники.

Как упоминалось в предыдущих разделах, существует определенное соотношение между индукцией B и напряженностью магнитного поля H в магнетике, задаваемое как $B = \mu H$. Здесь μ - магнитная проницаемость среды. В вакууме B и H связаны между собой постоянной μ_0 , известной как проницаемость вакуума, $B = \mu_0 H$.

В магнитных материалах связь H и B обычно носит нелинейный характер и может быть графически выражена как кривая намагниченности материала. Для циклической волны входного тока типичная кривая намагниченности (известная также как петля гистерезиса, а также циклическая кривая перемангничивания) выглядит так, как показано на Рисунке 1-4.

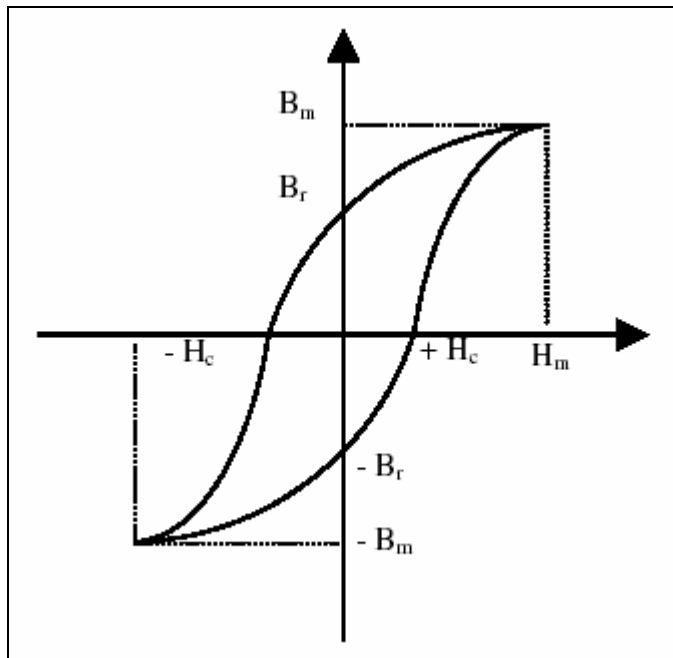


Рисунок 1- 4. Типичная кривая перемагничивания магнитной цепи.

На петле гистерезиса можно отметить точку, когда $H = 0$, а индукция не равна нулю, а имеет значение $\pm B_r$, именуемое остаточной намагниченностью или остаточной индукцией; аналогично, когда $B = 0$, магнитное поле не обращается в нуль, а равно $\pm H_c$ - этот параметр именуется *коэрцитивной (задерживающей) силой* материала. Глядя на петлю гистерезиса, нетрудно заметить, что положительный наклон кривой проницаемости (динамическая проницаемость) уменьшается с увеличением B и окончательно принимает значение, равное проницаемости вакуума, μ_0 . Это асимптотическое состояние известно как состояние «насыщения», в нем $B = B_m$ и $H = H_m$.

Магнитный материал потребляет энергию в течение каждого периода изменения тока, в итоге эта энергия превращается в тепло. Доказано, что общее количество выделяющейся в виде тепла энергии (т.е. потери) в магнитной цепи равно площади под петлей гистерезиса. Таким образом, выбирая магнитный материал, обладающий узкой петлей гистерезиса, можно снизить гистерезисные потери.

Кривая намагниченности, показанная на Рисунке 1-4, может быть наиболее просто получена в случае, если магнитная цепь работает на переменном токе. В такой цепи напряженность H пропорциональна току, протекающему через обмотку, а B – интегралу напряжения на обмотке, U . Этот интеграл именуется *полным потокосцеплением*, его величина:

$$I(t) = \int_0^t n dt \quad (0.5)$$

$$I = N \cdot B \cdot A \quad (0.6)$$

Здесь N – число витков обмотки, A – площадь поперечного сечения магнитного сердечника.

Как отмечалось, каждая искаженная волна тока или напряжения может быть разложена по составляющим ее гармоникам. Амплитуды гармоник могут сильно отличаться, в зависимости от природы их образования, а частоты являются кратными множителями некоей основной частоты. Очевидно, что искаженная волна отличается от волны основной частоты по частоте, амплитуде, фазовому углу. Элементы управления, расположенные на лицевой панели виртуального прибора в этом опыте (Рисунок 1-6), могут быть использованы для воссоздания периодического колебания напряжения или тока любой возможной формы. Для его реализации к основной составляющей добавьте набор ее гармонических составляющих (для данного опыта 3-ю и 5-ю гармоники).

ВП этого опыта включает два различных метода анализа: чтение из файла данных, именуемого «**Осциллограммы Ток и Напряжения.txt**» (**RealTimeVoltageCurrent.txt**) и создание (моделирование) входных осциллограмм на базе установок, введенных с лицевой панели.

Файл с реальными экспериментальными данными, «Осциллограммы Ток и Напряжения.txt» (**RealTimeVoltageCurrent.txt**) содержит набор из временных меток и выборок значений напряжения и тока (осциллограмм) нескольких периодов колебаний. Используйте эти данные для наблюдения формы колебаний в реальной магнитной цепи. Для чтения данного текстового файла в программе следует явно указать путь к нему, как показано на Рисунке 1-5.

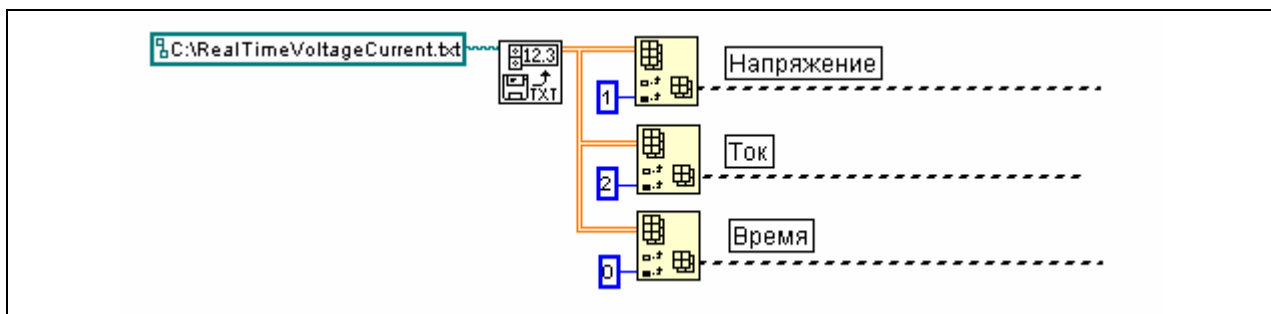
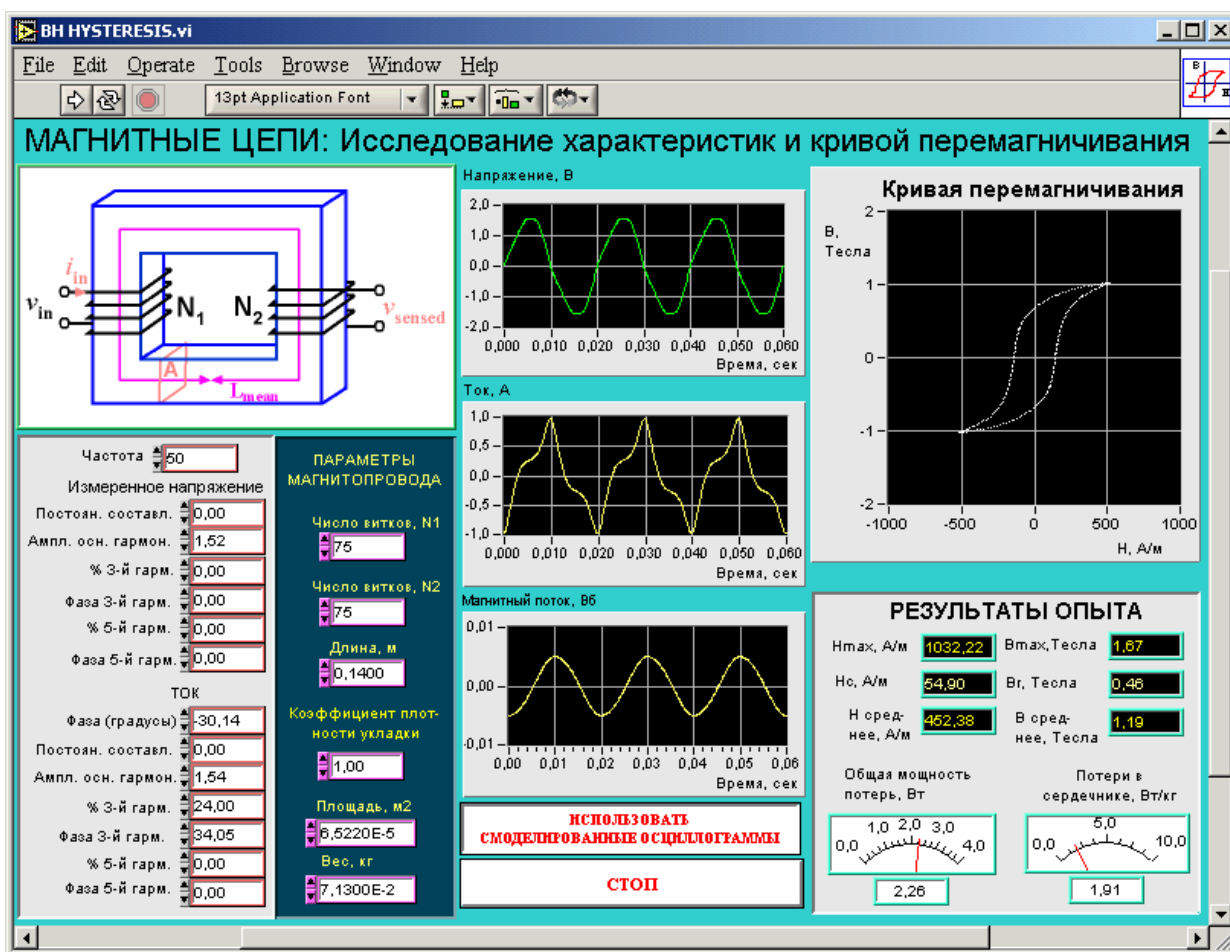


Рисунок 1- 5. Пример блок-диаграммы для установки пути к файлу и считывания реальных экспериментальных данных в данном опыте.



«Название»

Исследуемая магнитная цепь. N_1 - основная обмотка; N_2 - измерительная катушка, используемая для измерения наводимого напряжения в цепи	На этом графике отображается напряжение на измерительной катушке (как в случае моделирования, так и при обработке реальных данных).	Здесь отображается кривая намагничённости магнитной цепи.
Используйте элементы управления из этой секции для установки параметров моделирования. Требуемые осциллограммы напряжения и тока могут быть получены при установке соответствующих параметров 3-й и 5-й гармоник.	Здесь могут быть установлены параметры магнитной цепи. Эти установки будут действовать как для моделирования, так и для обработки реальных экспериментальных данных, взятых из прилагаемого текстового файла. Для считывания файла "Осциллограммы Токa и Напряжения.txt", следует явно указать путь к нему.	На этом графике отображается искажённая форма тока в цепи (как в случае моделирования, так и при обработке реальных данных). На этом графике отображается осциллограмма магнитного потока, рассчитанная по следующему уравнению: $e = d\Phi / dt$ Используйте эти кнопки для переключения между режимами моделирования осциллограммы или чтения ее из файла, а также для прекращения опыта.
В этой секции приводятся рассчитанные значения характерных точек кривой намагничённости, мощности и потерь в магнитопроводе этой цепи		

Рисунок 1- 6. Лицевая панель ВП «Петля Гистерезиса» (BH Hysteresis.vi) и поясняющая таблица

Учебные задания

Обозначим площадь поперечного сечения магнитного сердечника через A , среднюю длину магнитной цепи как L_{cp} , а число витков двух обмоток как N_1 и N_2 , соответственно. Обмотка N_1 возбуждается искаженной волной тока, периодически изменяющегося от $-I_m$ до $+I_m$. Соответственно меняется и магнитный поток в цепи, от значения $-f_m$ до $+f_m$. Вторичная обмотка N_2 (измерительная) предназначена для определения наведенного напряжения, которое равно $e = -N_2 \cdot (df/dt)$.

Далее вам предлагается выполнить следующие опыты.

- Нажмите кнопку «Использовать экспериментальные данные» и запустите моделирование – виртуальный прибор «Петля Гистерезиса» («ВН Hysteresis.vi»). Используйте значения параметров настройки, заданные по умолчанию, и считайте текстовый файл под названием «Осциллограммы Тока и Напряжения.txt», который содержит реальные экспериментальные данные, представленные в виде колонок: значения временных меток (в секундах), напряжения на измерительной обмотке (Вольты) и ток в обмотке (в Амперах).
- Пронаблюдайте, как меняется ток, напряжение, потокосцепление и кривая намагничивания. Определите, какие осциллограммы наиболее близки по форме к идеальной синусоиде.
- Подтвердите путем самостоятельных вычислений, что рассчитанные при моделировании значения B_r , H_c , B_m и H_m верны. Для этого вы можете использовать график с петлей гистерезиса, и, изменив пределы шкал, точно считать численные значения величин.
- Предложите варианты аналитических решений для среднеквадратических значений напряжения, тока и осциллограмм потокосцепления.
- В процессе выполнения виртуального прибора, выберите режим проведения опыта «Использовать смоделированные осциллограммы» нажатием соответствующей кнопки и затем измените управляющие параметры. Установите управляющие элементы так, чтобы компонента третьей гармоники в осциллограмме тока стала существенной. Отслеживая соответствующую петлю гистерезиса, получите кривую $B-H$ характеристики, подобную той, что наблюдалась ранее для реальных экспериментальных данных.
- Находясь в режиме моделирования, введите некоторые значения постоянной составляющей в осциллограммы напряжения и тока и зафиксируйте изменения на соответствующих графиках потокосцепления и кривой намагниченности. Объясните наблюдаемые на графиках изменения.
- Измените коэффициент плотности укладки обмотки, а также поперечное сечение магнитопровода и наблюдайте изменения на графиках и индикаторах. Какие выводы вы можете сделать на основе этих наблюдений?

Рекомендации к проведению эксперимента в реальном времени

Цепь, блок-схема которой приведена на Рисунке 1-7, может быть использована в экспериментальной установке, работающей в реальном времени. Следует, однако, учитывать, что в данном опыте можно будет реально измерять лишь две физические величины: ток в цепи питания и напряжение на обмотке. Другие параметры придется вводить вручную при помощи элементов управления, расположенных на лицевой панели. Результаты измерений можно передавать в ВП как при помощи виртуальных подпрограмм, обеспечивающих аналого-цифровое преобразование (DAQ), либо считывать их из заранее записанного файла-протокола.

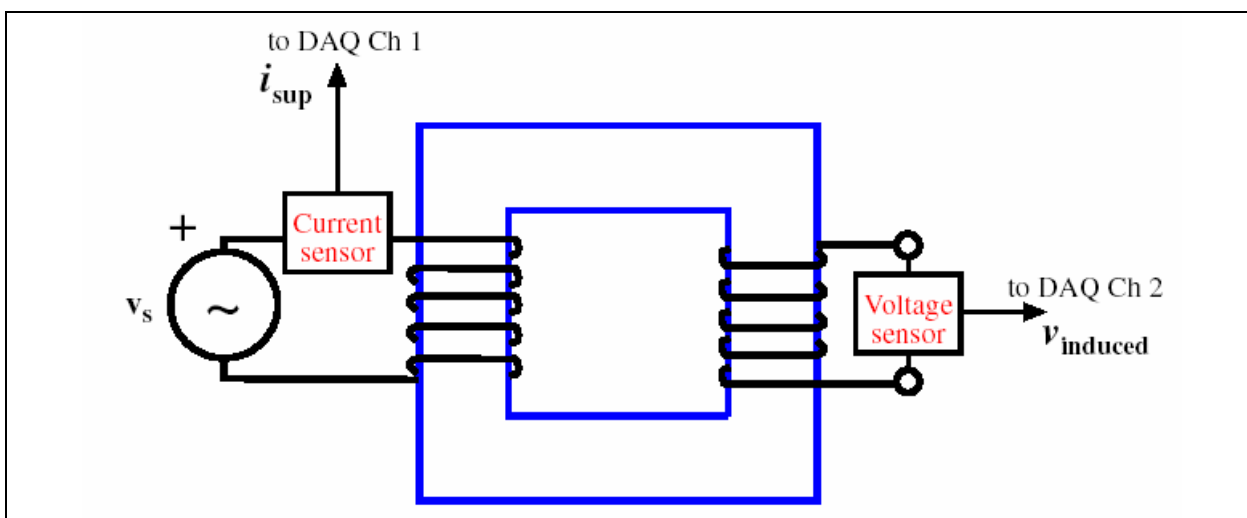


Рисунок 1- 7. Рекомендуемая блок-схема цепи для использования в экспериментальной установке реального времени.

Описание использованной аппаратуры

Аппаратное обеспечение этой экспериментальной установки содержит следующие основные компоненты:

Компьютер: ПК класса Pentium, 32 Мб ОЗУ, емкость жесткого диска >1 Гб.

Система ввода-вывода: плата National Instruments AT-MIO-16E-10 с 8 каналами ввода с дифференциальным входом и 12-разрядным разрешением, частота выборки 100 кГц, 2 аналоговых выхода (12-разрядные ЦАП), 8 цифровых ТТЛ линий ввода/вывода.

Исследуемые устройства: Фото исследуемого устройства приведено на Рисунке 1-8. Отметим, что устройство позволяет изменять толщину воздушного зазора в сердечнике, что позволяет исследователю проводить опыты в различных режимах.

Максимальный ток в обмотке: 300 мА

Калиброванные воздушные зазоры в сердечнике: 1мм, 2мм, 3мм, 4мм

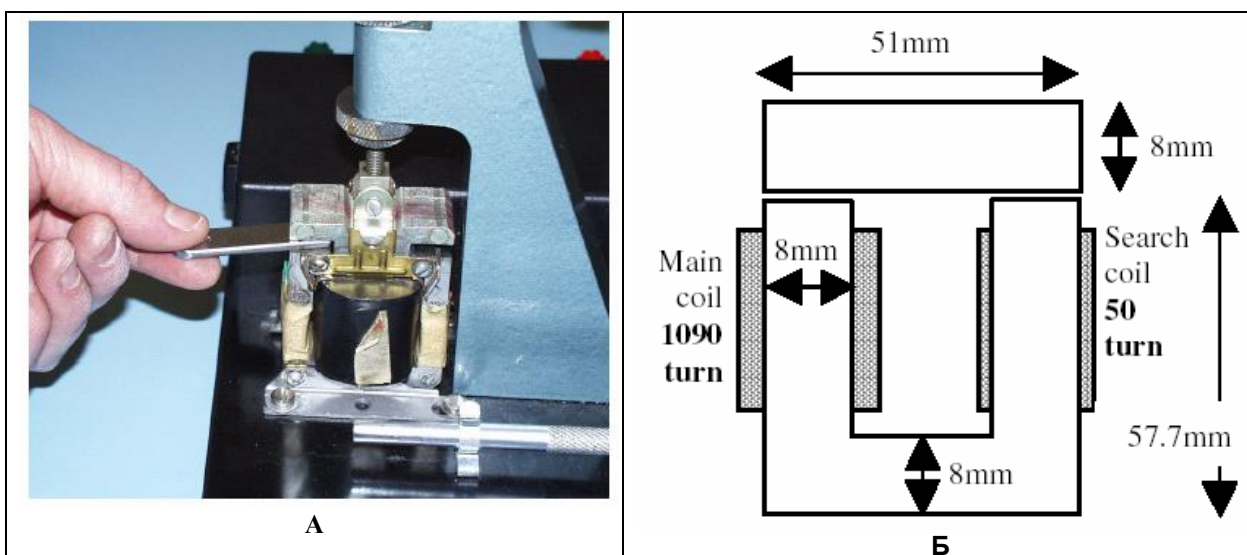


Рисунок 1- 8. Фото исследуемого устройства (А) и чертеж магнитопровода (Б).

Система согласования сигналов:

Как отмечалось, в настоящем эксперименте измеряются напряжение на измерительной обмотке, а также величина тока в основной (питающей) обмотке. Для решения этой задачи использовалась оригинальная (самодельная) схема согласования сигналов. Ее внешний вид и схема изображены на Рисунке 1-9. Схема обеспечивает необходимую изоляцию сигналов и позволяет проводить опыты с исследуемым устройством на постоянном и переменном токах.

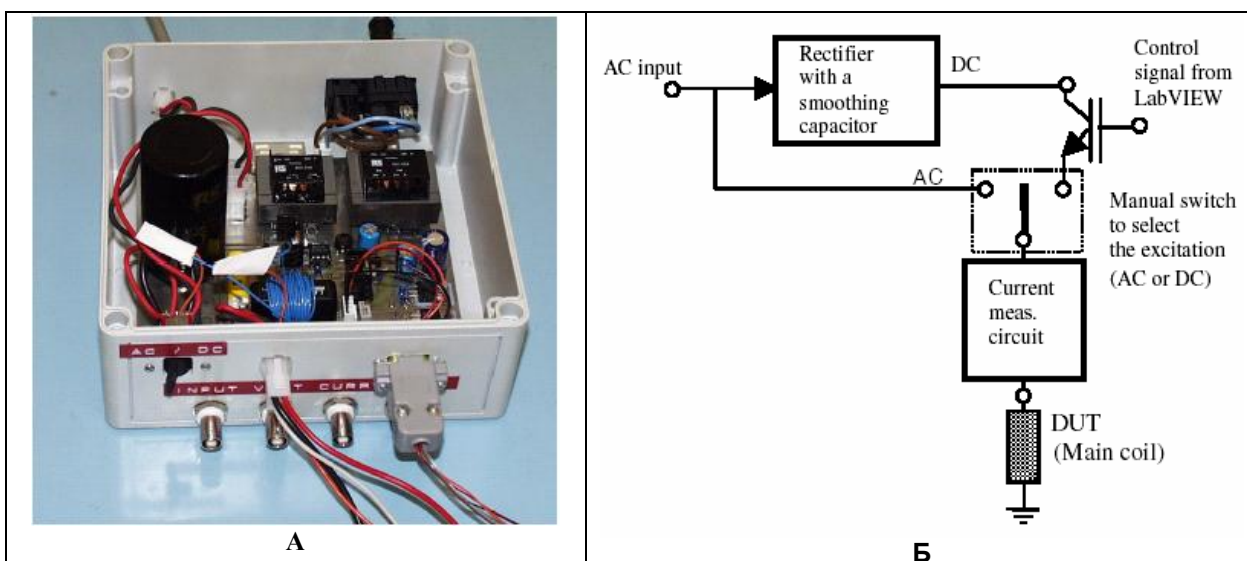


Рисунок 1- 9. Цепь согласования сигналов: внешний вид (А) и схема (Б).

Прочие принадлежности:

Питание: 240 В, 50 Гц

Автотрансформатор (для различных входных напряжений): 240 В, 8А, 50 Гц

Лабораторная работа 2.

Определения и методы измерения в цепях переменного тока



Переменный ток (ПТ) используется в огромном количестве промышленных и бытовых приборов и устройств. Поскольку в современных системах электропитания переменный ток генерируется и передается как синусоидальная волна напряжения и тока, анализ электрических цепей с синусоидальными источниками представляется наиболее важным. Анализ цепей переменного тока для систем электропитания включает в себя исследования поведения системы в нормальных и экстремальных условиях и, естественно, требует хорошего владения теоретическими основами функционирования цепей ПТ. В опытах, проводимых в этом разделе, рассматриваются как однофазные, так и трехфазные цепи ПТ. В разделе приведены основные определения и принципы цепей переменного тока, которые затем изучаются при помощи специальных виртуальных приборов.

Отметим, что в представленных опытах предполагается, что всеми переходными процессами, связанными с включением переменного тока, можно пренебречь: таким образом, мы работаем с установившейся синусоидальной волной, что значительно упрощает анализ цепи.

Однофазные цепи переменного тока: принципы и определения

Задачи раздела

По завершении этого эксперимента студенты должны:

- уметь изобразить и объяснить характеристики осциллограмм синусоидального тока и напряжения,
- понимать определения амплитудного значения, пикового и среднеквадратического значения величины, фазового угла, комплексного импеданса и действующего значения в цепях переменного тока.
- изучить омическую, индуктивную и емкостную нагрузку в однофазной цепи переменного тока,

- уметь анализировать установившийся синусоидальный режим однофазной цепи переменного тока, используя метод векторных диаграмм.

Литература

1. Electromechanical Energy Devices and Power Systems, Zia A. Yamaee, L. Juan, and JR. Bala, John-Wiley and Sons, 1994.
2. Theory and Problems of Electric Circuits, J, A. Edminister, Schaum's Outline Series, McGraw-Hill Book Company, 1972.
3. Electrical Machines, Drives, and Power Systems, T. Wildi, Prentice Hall, 1991.
4. N. Ertugrul, Electric Power Applications Lecture Notes, Department of Electrical and Electronic Engineering, University of Adelaide, 1997.

Теоретическое введение

Зависимость установившейся синусоидальной волны напряжения (тока) от времени задается следующим выражением:

$$v(t) = V \sin(\omega t + q) \quad (2.1)$$

где v - напряжение, t – время, V – пиковое (амплитудное) значение, ω - угловая частота, q - фазовый угол. Синусоидальный сигнал периодичен, т.е. совокупность его значений точно повторяется через интервал времени, называемый периодом, T . Частота периодического сигнала, f , показывает, сколько периодов сигнала укладывается в единицу времени. Таким образом, период и частота – взаимно обратные величины:

$$f = 1/T \quad (2.2)$$

Амплитудным значением (или размахом) сигнала называется разность между его минимальным и максимальным значением на одном периоде. На первый взгляд, трудно говорить об определенной величине сигнала переменного тока, т.к. его мгновенное значение непрерывно меняется. Однако можно ввести так называемое эффективное (или действующее) значение переменного тока, равное его среднему значению, или более строго, среднеквадратичному значению, которое для периодического сигнала, например, напряжения $v(t)$, вводится как:

$$V_{\text{сред}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt} \quad (2.3)$$

Для синусоидального напряжения среднеквадратичное значение равно:

$$V_{\text{сред}} = V / \sqrt{2} \quad (2.4)$$

При вычислениях для цепей переменного тока имейте в виду, что напряжения и токи задаются именно своими среднеквадратичными или действующими значениями, но не амплитудными.

Импеданс

Импедансом Z в цепях переменного тока именуется величина отношения напряжения к току. Импеданс является комплексной величиной и записывается как:

$$Z = R \pm jX \quad (2.5)$$

Действительная часть импеданса называется сопротивлением, R , а мнимая – реактивным сопротивлением или реактивностью, X .

Реактивность является функцией ω при индуктивной (L) и емкостной (C) нагрузке. Импеданс можно графически изобразить на комплексной плоскости осциллограмм напряжений и токов. Поскольку сопротивление не может быть отрицательным, график импеданса может находиться лишь в первом и четвертом квадрантах.

Векторные диаграммы

При изучении большинства цепей переменного тока частоту можно положить фиксированной, что существенно упрощает анализ. Анализ стационарных синусоидальных колебаний очень удобно проводить, представив напряжения и токи векторами, вращающимися на комплексной плоскости, и именуемыми векторными диаграммами. Удобство векторной диаграммы заключается в возможности наблюдать одновременно мгновенные значения и фазовый угол между двумя или более колебаниями токов и напряжений. Представление векторных диаграмм бывает различным: прямоугольным, полярным, экспоненциальным или тригонометрическим. Наиболее общеупотребительным является графическое представление. Как показывается далее для функции напряжения, множителем, осциллирующим с угловой частотой ω , можно пренебречь, и векторная диаграмма записывается действительной частью комплексной функции в полярных координатах.

$$\begin{aligned} v(t) &= V \cos(\omega t + q) = \\ &= \operatorname{Re} \left[V e^{j(\omega t + q)} \right] = \operatorname{Re} \left[(V_{\text{сред}} e^{jq}) (\sqrt{2} \cdot e^{j\omega t}) \right] \end{aligned} \quad (2.6)$$

$$\text{Вектор напряжения } \mathbf{V} = V_{\text{сред}} e^{jq} = V_{\text{сред}} \angle q$$

Эта векторная диаграмма отображается как вектор длиной $V_{\text{сред}}$, вращающийся на комплексной плоскости по часовой стрелке с угловой скоростью ω . При вращении вектора, его проекция на реальную ось описывает зависимость величины напряжения от времени. Векторная диаграмма в данном случае представляет собой мгновенный "снимок" вращающегося вектора в момент $t=0$, как показано на графике, расположенном на лицевой панели виртуального прибора данного опыта. В линейной электрической цепи, возбуждаемой синусоидальным источником, в установившемся режиме все токи и напряжения

представляют собой синусоиды той же частоты. Однако между токами и напряжениями существует разность фаз, зависящая от типа использованной нагрузки. В данном опыте рассматриваются три основных типа нагрузок: сопротивление (резистор R), индуктивность (L) и емкость (конденсатор C). Нагрузкой цепи ПТ может являться и комбинация этих пассивных нагрузок, как, например $R+L$ и $R+C$.

Для резистивной нагрузки напряжение и ток синфазны, в то время как для индуктивной ток в катушке отстает от напряжения на фазовый угол в 90° , а для емкостной - ток опережает напряжение на тот же угол.

Нормированные величины

Использование нормировки величин для измерений и вычислений в электротехнике обусловлено двумя основными причинами:

- чтобы исключить необходимость в постоянном пересчете напряжений, токов и импедансов в цепи, а также, чтобы избежать преобразований от трехфазных цепей к однофазным и наоборот.
- чтобы иметь возможность отображать множество величин в одном масштабе для сравнения.

Величина, подлежащая преобразованию, численно делится на характерную величину выбранной размерности, именуемую иногда размерной базой (или нормой) данной системы. После такой нормировки величины становятся безразмерными, т.е., просто числами. Для вычисления реальных (абсолютных) значений величин, необходимо умножить безразмерное число на значение соответствующей размерной базы.

В электрических цепях единицы напряжения, силы тока, импеданса и мощности могут быть выбраны в качестве размерной базы. Если выбрать в качестве базовых величин системы напряжение и мощность, то нормированные величины станут независимыми друг от друга численными характеристиками. Однако при обратном пересчете легко можно получить величины тока и импеданса, т.к. величины исходной размерной базы имеют взаимную зависимость.

Так, опыты, проводимые в этом разделе, используют напряжение и силу тока в качестве размерной базы, преимущественно, из-за удобства построения и наблюдения графиков.

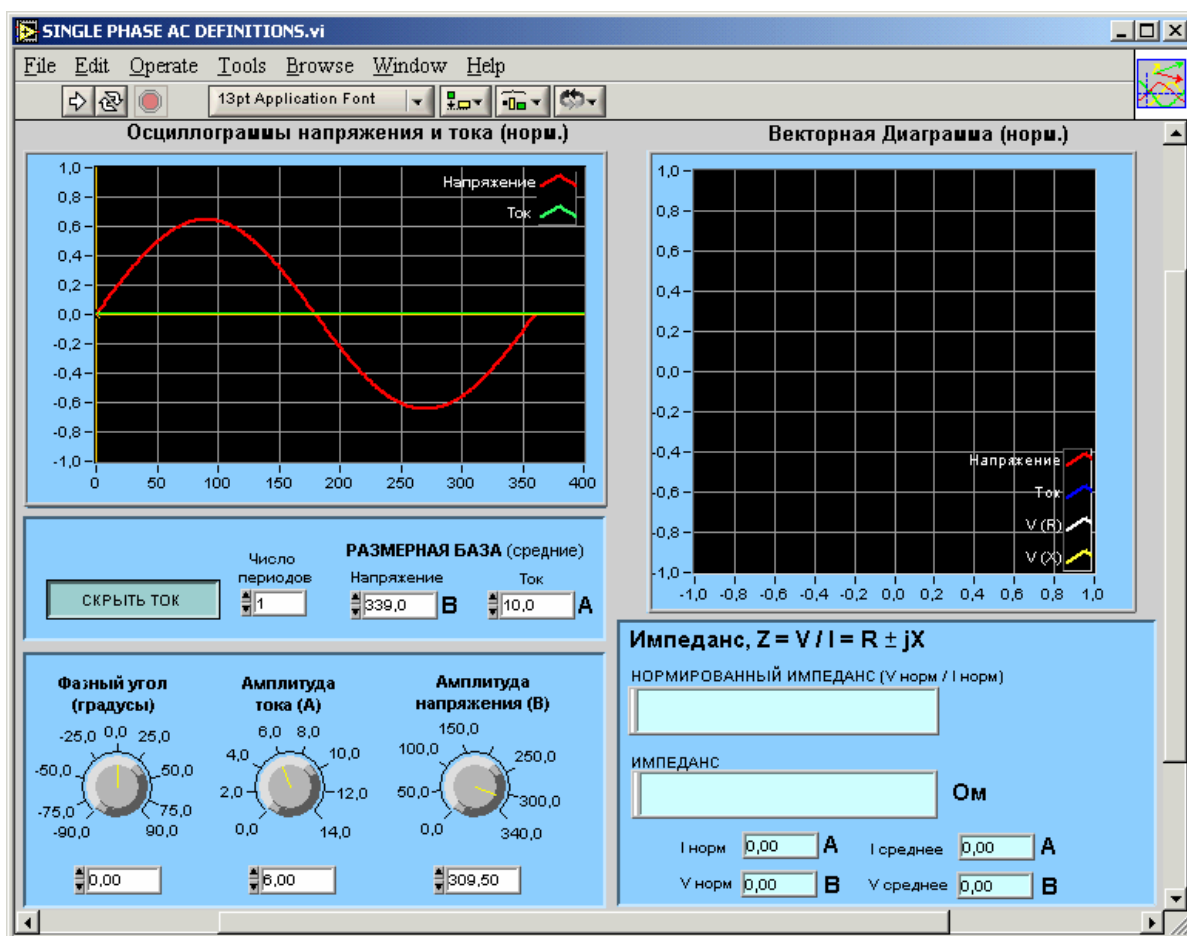
В ВП этого опыта осциллограммы напряжения и тока моделируют соответствующие значения, которые можно измерить в однофазной цепи ПТ. Эквивалентный импеданс нагрузки вычисляется и отображается на лицевой панели ВП (как нормированная, так и абсолютная величина). На Рисунке 2-1 показана лицевая панель и поясняющая таблица к виртуальному прибору данного опыта.

В этом ВП предполагается, что осциллограммы напряжения и тока на произвольной однофазной нагрузке уже измерены (заданы пользователем), а также известен импеданс этой нагрузки. Комплексный импеданс нагрузки отображается на лицевой панели прибора, его можно

использовать для определения природы нагрузки (R , L , C , $R+L$ или $R+C$). Векторная диаграмма, приведенная здесь же, иллюстрирует идею графического представления комплексных величин, часто используемого при анализе систем ПТ.

Учебные задания

- Запустите ВП, именуемый «**Основы однофазных цепей переменного тока**» («**Single Phase AC Definitions.vi**»), затем поменяйте значения фазового угла, амплитуды напряжения и тока путем вращения соответствующих регулирующих ручек. Наблюдайте относительное расположение осциллограмм напряжения и тока (т.е., фазовый угол) на графике.
- Установите амплитуды напряжения и тока равными базовым и проанализируйте полученные нормированные значения напряжения и тока, а также действующие значения.
- Проверьте правильность значения импеданса, отображенного на лицевой панели, на основе введенных данных.
- Без использования векторной диаграммы, приведенной в данном ВП, постройте ее самостоятельно для осциллограмм напряжения и тока, отображенных на соответствующем графике, после чего сравните эти векторные диаграммы. К какому типу принадлежит нагрузка: "резистивному", "емкостному" или "индуктивному" и почему?
- После наблюдения осциллограмм напряжения и тока в трех типичных случаях (в фазе, с запаздыванием и опережением по фазе), также пронаблюдайте и запишите значение импеданса в виде комплексных математических уравнений. Запишите комплексные уравнения для импеданса для предыдущих опытов и подтвердите приведенные значения собственными вычислениями. Учитывайте, что импеданс точной индуктивности и точной емкости – чисто мнимая комплексная величина.
- В случае комбинированной $R+L$ или $R+C$ нагрузки, вычислите значение индуктивности L или емкость C . Положите частоту источника питания равной 50 Гц.



«Название»

<p>Этот график отображает осциллограммы тока и напряжения в однофазной цепи ПТ</p> <p>В этой секции находятся: кнопка, управляющая отображением осциллограмм тока, а также элементы управления для установки значений размерной базы напряжения и тока. Следует указывать максимальные значения для данной цепи.</p>	<p>На этом графике строятся векторные диаграммы напряжения и тока. Для вектора напряжения реальная и мнимая части приводятся отдельно. Подписи к графику помогут вам найти нужный вектор.</p>
<p>Эти ручки предназначены для установки фазного угла, а также амплитуд тока и напряжения в цепи</p>	<p>Здесь приведены значения нормированного и реального (преобразованного) импеданса в комплексной форме. Отображается также природа нагрузки: «емкостная», «индуктивная» и «омическая».</p> <p>Нормированные и средние значения напряжений и токов, построенных на графике, приводятся здесь</p>

Рисунок 2 - 1. Лицевая панель «Основы однофазных цепей переменного тока» (Single Phase AC Definitions.vi) и поясняющая таблица.

Рекомендации к проведению эксперимента в реальном времени

Образец блок-схемы, приведенный на Рисунке 2-2, может быть использован в эксперименте реального времени. Как показано на Рисунке, в данном случае только два параметра – напряжение источника

питания и линейный ток в цепи могут быть экспериментально измерены. При переходе к эксперименту реального времени ручки управления процессом моделирования следует поменять на элементы управления устройством ввода аналоговых сигналов. Амплитуда и фазовый угол напряжений и токов в таком случае будут определяться реальной нагрузкой и напряжением источника питания в реальной установке.

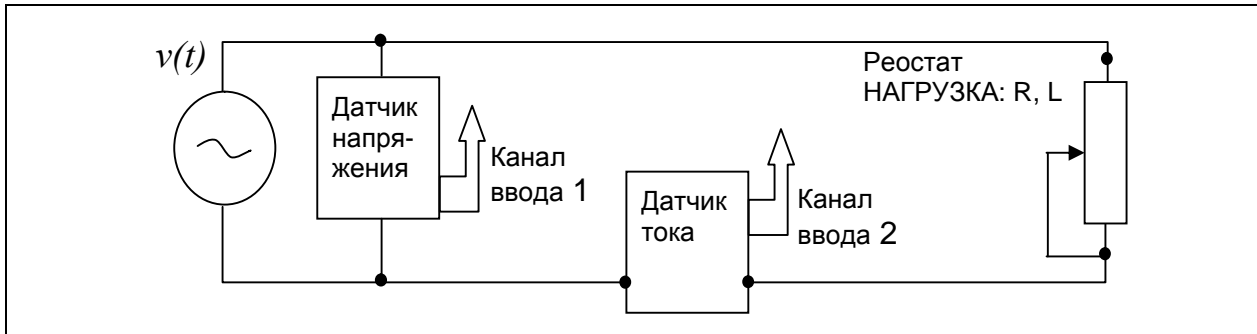


Рисунок 2 - 2. Образец блок-схемы для опыта с однофазной цепью переменного тока

Описание использованной аппаратуры

Аппаратное обеспечение этой экспериментальной установки содержит следующие основные компоненты:

Компьютер: ПК класса Pentium, 32 Мб ОЗУ (RAM), емкость жесткого диска >1 Гб.

Система ввода-вывода: плата National Instruments AT-MIO-16E-10 с 8 каналами ввода с дифференциальным входом и 12-разрядным разрешением, частота выборки 100 кГц, 2 аналоговых выхода (12-разрядные ЦАП), 8 цифровых ТТЛ линий ввода/вывода.

Исследуемое устройство:

Реостат: 50 Ом, 5 А

Устройства согласования сигналов:

Для обеспечения полной электрической изоляции использовались: датчик тока, основанный на применении эффекта Холла (50 А и 100 А, частота: от постоянного тока до 100 кГц), а также изолированный усилитель (до 1000 В, 50 кГц) для измерения напряжения. Принципиальная схема специально изготовленных датчиков напряжения и тока и фотография печатной платы устройства с размещенными на ней компонентами, приведены на Рисунке 2-3.

Прочие принадлежности:

Питание: 240 В, 50 Гц

Автотрансформатор (для различных входных напряжений): 240 В, 8А, 50 Гц

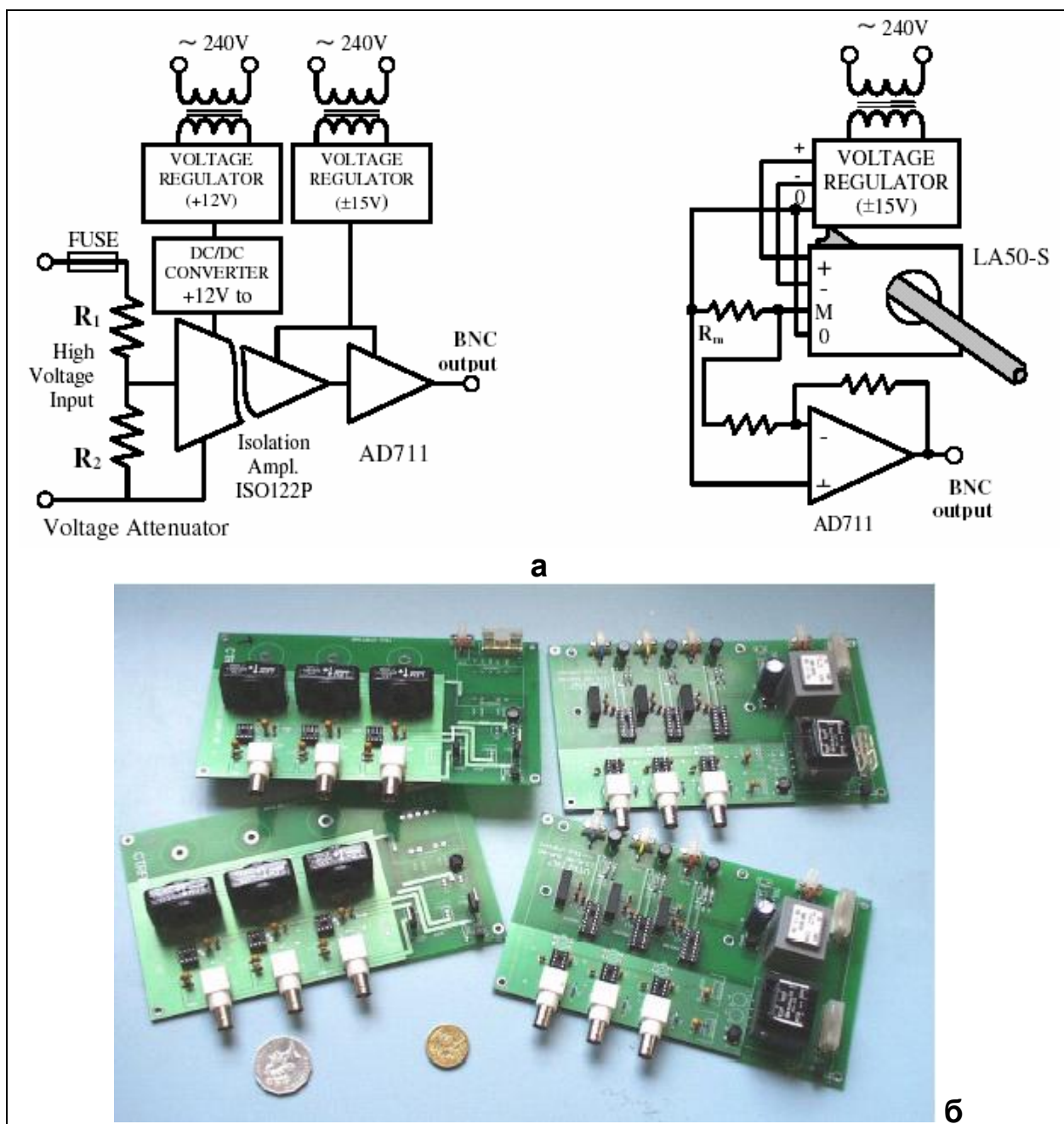


Рисунок 2 - 3. Принципиальная схема (а) и фотография (б) оригинальных датчиков напряжения и тока

Определение мощности и компенсация коэффициента мощности в однофазных цепях переменного тока

Задачи раздела

По завершении этого эксперимента студенты должны:

- Изучить понятие комплексной мощности однофазных систем переменного тока.
- Понимать сущность треугольников мощностей.
- Изучить требования на компенсацию коэффициента мощности и понимать концепцию методики.

Литература

1. Electromechanical Energy Devices and Power Systems, Zia A. Yamaee, L. Juan, and JR. Bala, John-Wiley and Sons, 1994.
2. Theory and Problems of Electric Circuits, J. A. Edminister, Schaum's Outline Series, McGraw-Hill Book Company, 1972.
3. Electrical Machines, Drives, and Power Systems, T. Wildi, Prentice Hall, 1991.
4. N. Ertugrul, Electric Power Applications Lecture Notes, Department of Electrical and Electronic Engineering, University of Adelaide, 1997.

Теоретическое введение

Понятие мгновенной мощности, доставляемой к нагрузке, определяется как

$$p(t) = v(t) \cdot i(t) \quad (2.7)$$

Мгновенная мощность может иметь положительное или отрицательное значение в зависимости от знака функций $v(t)$ и $i(t)$, т.е., от абсолютного значения сигнала в данный момент времени.

При положительном знаке мощности энергия перетекает от источника питания к нагрузке, при отрицательном – от нагрузки к источнику.

В случае синусоидальной волны напряжения и тока мгновенная мощность может быть выражена через сумму двух синусоид или как сумма двух синусоид удвоенной частоты, как показано ниже:

$$v(t) = V \cos \omega t$$

$$i(t) = I \cos(\omega t + q)$$

$$p(t) = V \cdot I \cos q + V \cdot I \cos(2\omega t + q)$$

$$p(t) = V \cdot I \cos q \cdot [1 + \cos(2\omega t)] + V \cdot I \sin q \cdot \cos\left(2\omega t + \frac{P}{2}\right) \quad (2.8)$$

В приведенном выше выражении для мощности первый член в правой части уравнения известен как «**мгновенная средняя мощность, реальная или активная мощность**», и измеряется в Ваттах (Вт), килоВаттах (кВт) и МегаВаттах (МВт). Следующий член в правой части именуется «**мгновенной реактивной мощностью**», ее среднее значение равно нулю, а максимальное значение еще известно как «**реактивная мощность**», измеряемая в Реактивных Вольт-Амперах (ВАР). Таким образом, **активная** и **реактивная** мощности могут быть записаны как:

$$P = V \cdot I \cos q \quad (2.9)$$

$$Q = V \cdot I \sin q \quad (2.10)$$

Косинус **фазового угла** q между напряжением и током называется **коэффициентом мощности**.

Существует понятие **кажущейся мощности** S , определяемой через P и Q как

$$S = V \cdot I = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2.11)$$

Кажущаяся мощность измеряется в Вольт-Амперах (В·А).

Выражение для мощности в цепях переменного тока записывается в следующей комплексной форме:

$$S = P \pm jQ = V \cdot I \cos q \pm j \cdot V \cdot I \sin q \quad (2.12)$$

Нетрудно видеть, что действительная часть комплексной мощности равна активной мощности P , а мнимая – реактивной Q .

Таким образом, следуя уравнениям, приведенным выше, видим, что уравнения, связывающие активную, реактивную и кажущуюся мощности могут быть геометрически отображены прямоугольным треугольником, именуемым **треугольником мощностей**. Треугольник мощностей на векторной диаграмме приведен на лицевой панели ВП данного опыта (см. Рисунок 2-4). На графике этой векторной диаграммы по горизонтальной оси отложена активная мощность, а по вертикальной – реактивная. На графике также приведена комплексная мощность компонента, который добавляется в систему для компенсации коэффициента мощности, о чем будет подробно рассказано далее.

Компенсация (корректировка) коэффициента мощности

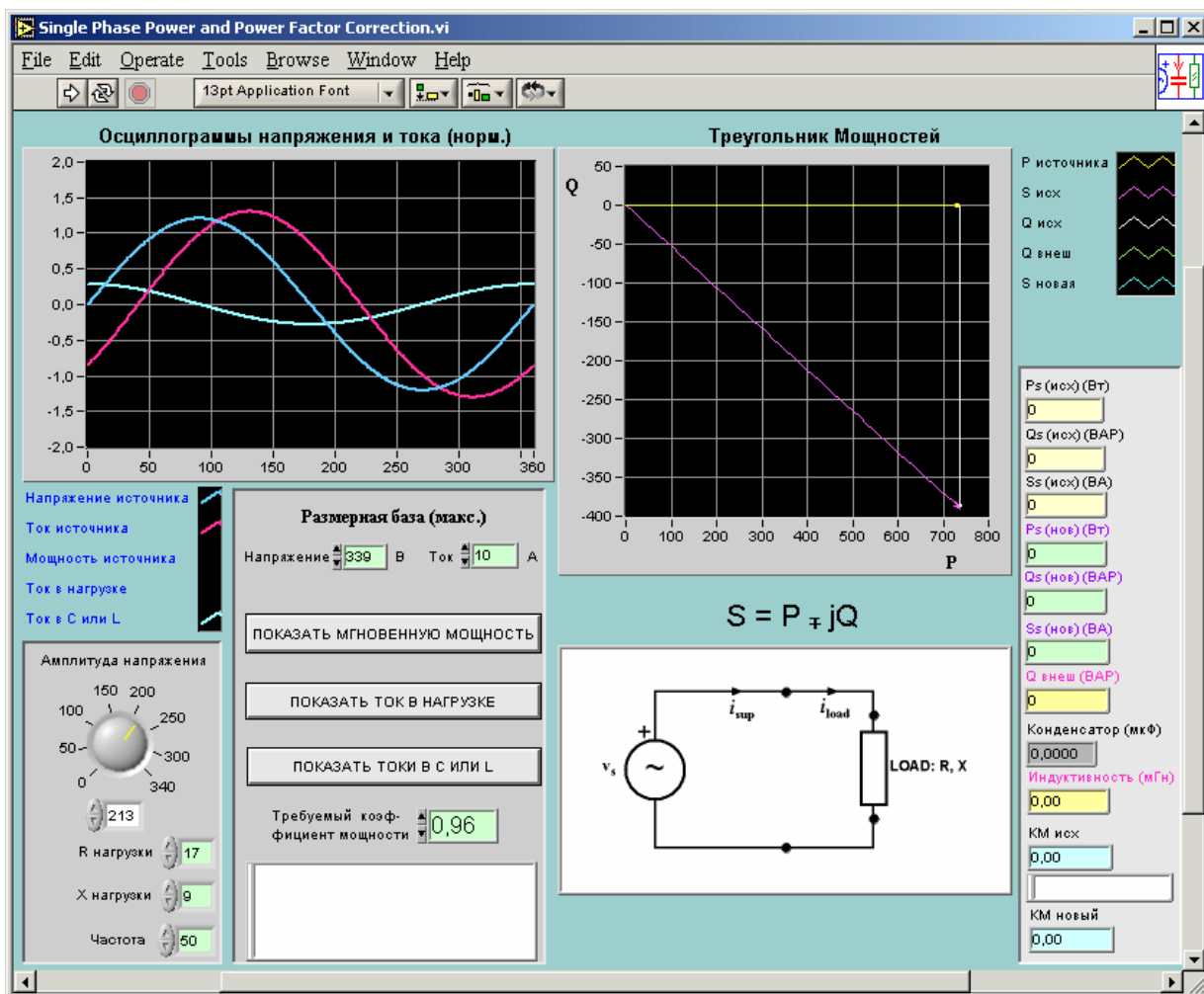
При анализе понятия комплексной мощности можно заметить, что если к источнику питания подключена чисто индуктивная или чисто емкостная нагрузка, источник питания будет полностью нагружен, хотя активная мощность в нагрузке будет нулевой. Взглянув на треугольник мощностей, мы увидим, что гипотенуза S является мерой нагрузки источника питания, в то время как катет P равен полезной мощности, отданной источником. Поэтому весьма желательно, чтобы кажущаяся мощность была

максимально близка к активной мощности, тогда коэффициент мощности будет стремиться к 1. Процесс повышения коэффициента мощности до значения, максимально близкого к 1 (или, по крайней мере, большего, чем первоначальное значение), именуется компенсацией (корректировкой) коэффициента мощности.

На практике, компенсация коэффициента мощности осуществляется простым подключением конденсатора или катушки индуктивности параллельно существующей нагрузке, которая, в свою очередь, может иметь индуктивный или емкостной характер. В процессе осуществления компенсации коэффициента мощности напряжение на нагрузке не меняется, и активная мощность также остается неизменной. Однако, ток, и, следовательно, кажущаяся мощность, потребляемая от источника питания, снижается, и, таким образом, можно увеличить нагрузку на источник без увеличения его расчетной мощности.

Например: если первоначальная мощность и коэффициент мощности (КМ) однофазной цепи переменного тока соответственно равны $P = 1200$ Вт, $Q = 1600$ В·А·Р, $S = 2000$ В·А, и $КМ = \cos \varphi = 0.6$ запаздывания, и мы хотим скомпенсировать коэффициент мощности до 0.9 запаздывания, нам следует включить параллельно нагрузке конденсатор. После компенсации активная мощность остается неизменной, в то время как кажущаяся снижается до 1333 В·А, а реактивная мощность конденсатора составит 1015 В·А·Р с опережением.

Лицевая панель ВП, именуемого «**Однофазная мощность и компенсация коэффициента мощности**» («**Single Phase Power and Power Factor Correction.vi**») приведена на Рисунке 2-4. Этот ВП является легко изменяемым инструментом для изучения мощности и компенсации коэффициента мощности в однофазной цепи переменного тока.



Этот график демонстрирует осциллограммы напряжения и тока однофазного источника переменного тока и потребляемую от него мгновенную мощность. Показан также ток, протекающий через компонент, включенный для компенсации коэффициента мощности		Этот график показывает векторную диаграмму комплексной мощности (для индуктивной и емкостной нагрузки) – «Треугольник мощностей»	Эти индикаторы показывают вычисленные значения активной, реактивной и кажущейся мощности в изображенной слева внизу цепи, а также значение коэффициента мощности нагрузки
Этими ручками можно изменять амплитуду напряжения источника питания, импеданс нагрузки и частоту источника питания	Этими кнопками вы можете показать/скрыть интересные осциллограммы на вышеприведенном графике Используйте этот элемент управления для установки нужного коэффициента мощности. Убедитесь, что желаемый коэффициент мощности превышает первоначальный (некомпенсированный)		

Рисунок 2 - 4. Лицевая панель ВП и поясняющая таблица прибора «Однофазная мощность и компенсация коэффициента мощности» (Single Phase Power and Power Factor Correction.vi).

Учебные задания

В этом опыте можно изучить довольно много разнообразных задач. И хотя комбинаций установочных параметров много, наиболее существенными для понимания понятий мощности и компенсации коэффициента мощности в однофазных цепях переменного тока являются следующие задания. Отметим также, что эти опыты легко могут быть расширены и для анализа многофазных цепей переменного тока.

1. Установите амплитуду напряжения равной 339 В, базовое напряжение = 339 В, базовый ток = 10А, $R_{наг} = 10 \text{ Ом}$, $X_{наг} = 0 \text{ Ом}$, $f = 50 \text{ Гц}$ и наблюдайте осциллограммы напряжения, тока, мощности и векторные диаграммы мощности.
 - Каковы значения активной, реактивной и кажущейся мощности, а также КМ нагрузки? Подтвердите отображенные значения самостоятельными расчетами.
 - Были ли вами замечены какие-либо изменения в вышеперечисленных величинах мощности при изменении «Требуемого коэффициента мощности»? Почему?
2. Не меняя прочих настроек, измените значения импеданса на $R_{наг} = 0 \text{ Ом}$, $X_{наг} = 10 \text{ Ом}$, и наблюдайте изменения осциллограмм напряжения, тока, мощности и векторных диаграмм мощности.
 - Постепенно увеличивая «Требуемый коэффициент мощности» до единичного значения (1.0) наблюдайте график «Треугольника мощностей». Какие изменения вы можете отметить?
 - Каковы значения активной, реактивной и кажущейся мощности, а также коэффициента мощности нагрузки были до и после компенсации КМ?

ПОЛЕЗНЫЙ СОВЕТ: Наблюдайте эти значения для двух различных случаев: когда «Требуемый коэффициент мощности» меньше, чем исходный КМ и когда он больше конечного значения КМ.
3. Установите амплитуду напряжения = 339 В, базовое напряжение = 339 В, базовый ток = 10А, $R_{наг} = 0 \text{ Ом}$, $X_{наг} = -10 \text{ Ом}$, $f = 50 \text{ Гц}$ и наблюдайте осциллограммы напряжения, тока, мощности и векторные диаграммы мощности.
 - Постепенно увеличивая «Требуемый коэффициент мощности» до единичного значения (1.0) наблюдайте график «треугольника мощностей». Какие различия (изменения) вы можете отметить?
 - Каковы значения активной, реактивной и кажущейся мощности, а также коэффициента мощности нагрузки были до и после компенсации коэффициента мощности?

ПОЛЕЗНЫЙ СОВЕТ: Тот же, что и в предыдущем случае.

4. В этом опыте можно не трогать других настроек, кроме значения импеданса, изменив его на $R_{\text{наг}} = 10 \text{ Ом}$, $X_{\text{наг}} = -10 \text{ Ом}$. При этом наблюдайте осциллограммы напряжения, тока, мощности и треугольник мощностей.
- Постепенно увеличивая «Требуемый коэффициент мощности» до единичного значения, снова наблюдайте за графиком «треугольника мощностей». Можете ли вы отметить какие-либо изменения? Объясните.
 - Каковы величины активной, реактивной и кажущейся мощности, а также коэффициента мощности нагрузки до и после компенсации коэффициента мощности?
 - **ПОЛЕЗНЫЙ СОВЕТ:** Тот же, что и в предыдущем случае.
 - Подтвердите отображенные значения самостоятельными расчетами.
5. Как и в предыдущем опыте, не меняйте никаких настроек, кроме импеданса, изменив его на $R_{\text{наг}} = -10 \text{ Ом}$, $X_{\text{наг}} = 10 \text{ Ом}$. При этом наблюдайте осциллограммы напряжения, тока, мощности и треугольник мощностей.
- Постепенно увеличивая «Требуемый коэффициент мощности» до единичного значения, снова наблюдайте за графиком «треугольника мощностей». Можете ли вы отметить какие-либо изменения?
 - Каковы величины активной, реактивной и кажущейся мощности, а также коэффициента мощности нагрузки до и после компенсации коэффициента мощности?
 - **ПОЛЕЗНЫЙ СОВЕТ:** Тот же, что и в предыдущем случае.
 - Подтвердите отображенные значения самостоятельными расчетами.
 - Сравните результаты, полученные в опытах 4 и 5.

Рекомендации к проведению эксперимента в реальном времени

Схема, приведенная на Рисунке 2-5, пригодна для проведения в реальном времени экспериментов, соответствующих опытам, изложенным в данном разделе. Здесь мы экспериментально можем измерять напряжение источника питания, ток через нагрузку и ток через добавочный элемент (L или C) при помощи платы аналогового ввода.

Тем не менее, блок-схема виртуального прибора должна быть существенно изменена. Во-первых, необходимо удалить элементы управления: *Амплитуда Напряжения*, $R_{\text{наг}}$, $X_{\text{наг}}$, *Частота* и *Требуемый Коэффициент Мощности*, поскольку эти величины будут определяться

установками на реальном блоке питания, а также выбором нагрузки и добавочных элементов, C или L . На Рисунке 2-5 приведена примерная электрическая схема цепи с индуктивной нагрузкой, в которой для компенсации коэффициента мощности применен конденсатор. Для достижения требуемого коэффициента мощности номинал конденсатора должен быть заранее рассчитан аналитически. Ток через конденсатор в схеме, приведенной на Рисунке 2-5, определяется как $i_{\text{конд}} = i_{\text{ист}} - i_{\text{наг}}$.

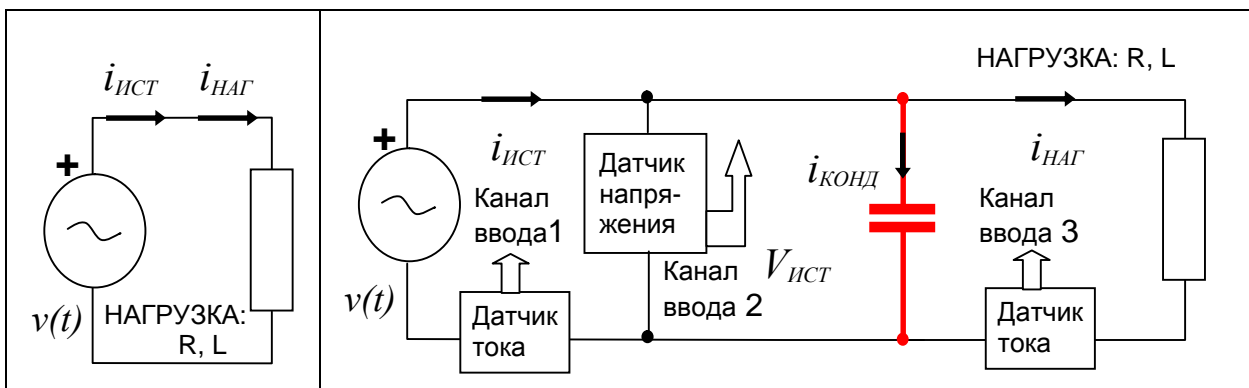


Рисунок 2 - 5. Примерная электрическая схема цепи для экспериментального опыта по компенсации коэффициента мощности.

- а) Цепь без компенсации коэффициента мощности,
- б) Цепь с компенсацией коэффициента мощности добавочным конденсатором.

Описание использованной аппаратуры

Аппаратное обеспечение этой экспериментальной установки содержит следующие основные компоненты:

Компьютер и система ввода-вывода: те же, что и в предыдущем опыте.

Исследуемое устройство:

Реостат: 50 Ом, 5 А

Конденсатор: 4мкФ, 1000 В

Устройства согласования сигналов:

В этом эксперименте для измерения напряжения и тока использовалась та же схема согласования сигналов, что и в предыдущем опыте, см. Рисунок 2-3.

Прочие принадлежности:

Питание: 240 В, 50 Гц

Автотрансформатор (для различных входных напряжений): 240 В, 8А, 50 Гц

Преобразование звезда/треугольник и треугольник/звезда в трехфазных цепях переменного тока

Задачи раздела

По завершении данного эксперимента студенты должны:

- Понимать принципы преобразования звезда-треугольник и треугольник-звезда, необходимого в трехфазных цепях переменного тока,
- Уметь вычислять и сравнивать импедансы этих двух схем подключения

Литература

1. Theory and Problems of Electric Circuits, Schaum's Outline Series, J. A. Edminister, McGraw-Hill Book Company, 1972.
2. N. Ertugrul, Electric Power Applications Lecture Notes, Department of Electrical and Electronic Engineering, University of Adelaide, 1997.

Теоретическое введение

Как известно, генерирование, передача и распределение электрической энергии чаще всего осуществляется трехфазными системами. И хотя большое количество потребителей электроэнергии как в домашних, так и во многих промышленных системах – однофазные, их энергопотребление реально распределяется между тремя фазами для обеспечения равномерной (сбалансированной) нагрузки. Сбалансированными являются также большинство трехфазных потребителей, таких, например, как трехфазные электродвигатели переменного тока.

В сбалансированной трехфазной системе, т.е., при равенстве суммы фазных токов нулю, нейтральный (нулевой) провод нагрузки может быть подключен к нулевому проводу источника питания. Таким образом, любая из фаз представляет собой сочетание нулевого и одного фазного проводов и ее можно анализировать как однофазную эквивалентную схему.

Если трехфазный источник или нагрузка подключены по схеме треугольника, их можно преобразовать в эквивалентную схему звезда, после анализа схемы - провести обратное эквивалентное преобразование.

Формулы преобразования от треугольника к звезде и наоборот приведены ниже, в соответствии с электрической схемой, изображенной на Рисунке 2-6.

$$\begin{aligned}
Z_A &= \frac{Z_1 \cdot Z_2 + Z_2 \cdot Z_3 + Z_3 \cdot Z_1}{Z_3} \\
Z_B &= \frac{Z_1 \cdot Z_2 + Z_2 \cdot Z_3 + Z_3 \cdot Z_1}{Z_2} \\
Z_C &= \frac{Z_1 \cdot Z_2 + Z_2 \cdot Z_3 + Z_3 \cdot Z_1}{Z_1}
\end{aligned} \quad (2.13)$$

$$\begin{aligned}
Z_2 &= \frac{Z_A \cdot Z_C}{Z_A + Z_B + Z_C} \\
Z_1 &= \frac{Z_A \cdot Z_B}{Z_A + Z_B + Z_C} \\
Z_3 &= \frac{Z_B \cdot Z_C}{Z_A + Z_B + Z_C}
\end{aligned} \quad (2.14)$$

Где Z – комплексный импеданс, $Z = R \pm jX$

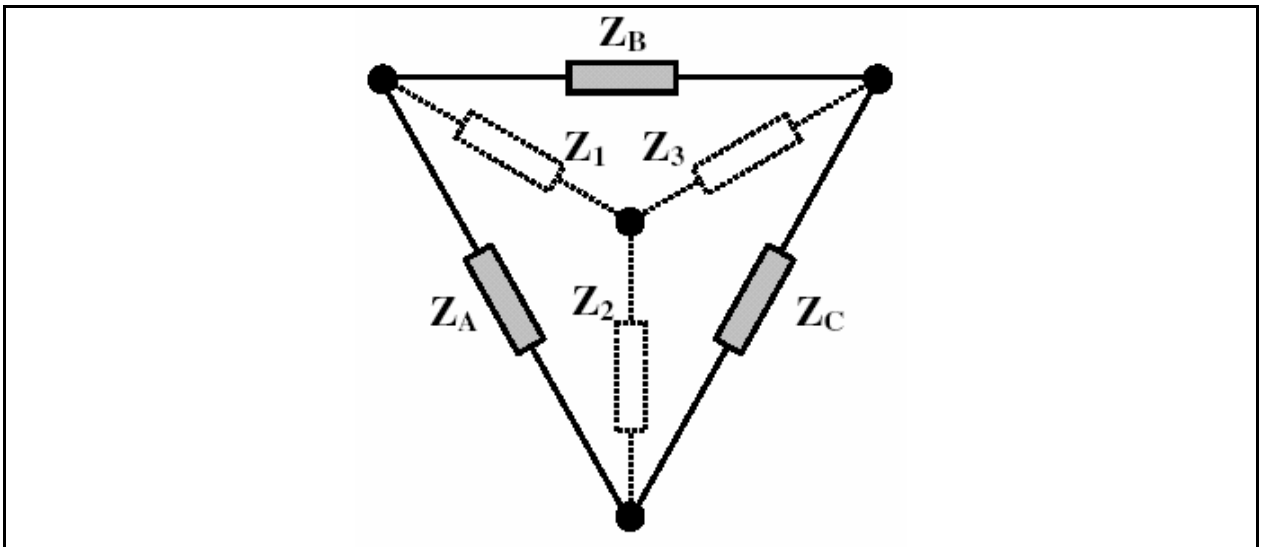


Рисунок 2 – 6. Эквивалентные схемы треугольник-звезда и звезда-треугольник.

Когда нагрузка сбалансирована, импеданс одной фазы нагрузки, подключенной по схеме звезда, равен одной трети от импеданса той же нагрузки, включенной по схеме треугольника. Отсюда эквивалентный импеданс задается следующим выражением:

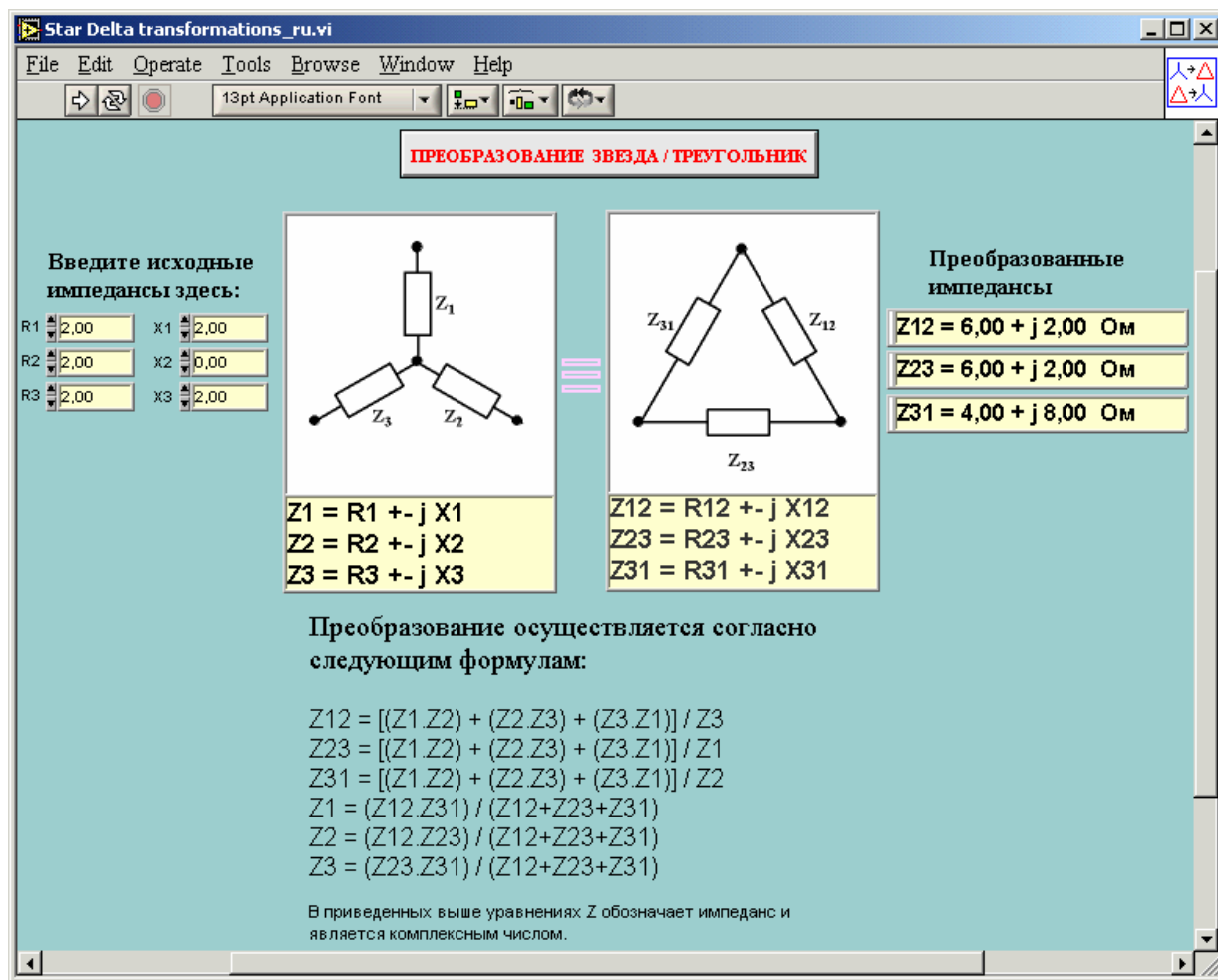
$$Z_A = Z_B = Z_C = Z; \quad Z_1 = Z_2 = Z_3 = Z/3 \quad (2.15)$$

Трехфазный источник питания переменного тока обычно подключается к сбалансированной нагрузке по схеме звезда или треугольник. Лицевая панель виртуального прибора для этого опыта – «**Преобразование звезда – треугольник**» (**Star Delta Transformations.vi**) показана на Рисунке 2-7.

Этот ВП может преобразовывать как сбалансированную, так и несбалансированную трехфазные нагрузки. Одним из наиболее общих является использование таких преобразований для анализа трехфазных трансформаторов. Анализ цепи с трехфазными трансформаторами, работающими со сбалансированной нагрузкой может быть проведен в нормировке на одну фазу. Когда установлены звезда-треугольник или треугольник-звезда - соединения, параметры относятся к цепи звезды. При соединениях треугольник-треугольник, импедансы преобразуются к эквивалентным импедансам, включенным по схеме звезда.

Учебные задания

- Установите все импедансы одинаковыми и проведите преобразования звезда-треугольник и треугольник-звезда.
- Повторите предыдущее задание, устанавливая *одинаковые* импедансы в каждой ветви,
- Повторите предыдущее задание, устанавливая *различные* импедансы.
- Подтвердите полученные результаты самостоятельными вычислениями.



Используйте эти элементы управления для ввода импедансов, которые будут преобразованы в Д или З	Эта кнопка переключает направление преобразования от треугольник-звезда на звезда-треугольник		Эти индикаторы показывают значения импедансов после преобразования
	Этот рисунок содержит схему цепи и уравнения для импедансов	Этот рисунок содержит схему включения цепи и уравнения для импедансов, преобразованные из цепи слева	
Формулы, использованные для преобразования, отображены здесь			

Рисунок 2 - 7. Лицевая панель ВП и поясняющая таблица прибора «Преобразование звезда – треугольник» (Star Delta Transformations.vi).

Напряжения и токи в нагрузках переменного тока, включенных по схемам звезда и треугольник

Задачи раздела

По завершении данного эксперимента студенты должны:

- Понимать определения фазного и линейного напряжения, фазного и линейного тока в системах переменного тока, включенных по схемам звезда и треугольник.
- Наблюдать и оценивать мгновенные напряжения и токи в цепях переменного тока, включенных по схемам звезда и треугольник.

Литература

1. Electromechanical Energy Devices and Power Systems, Zia A. Yamaee, L. Juan, and JR. Bala, John-Wiley and Sons, 1994.
2. Theory and Problems of Electric Circuits, Schaum's Outline Series, J. A. Edminister, McGraw-Hill Book Company, 1972.
3. Electrical Machines, Drives, and Power Systems, T. Wildi, Prentice Hall, 1991.
4. Electrical Engineering, Principles and Applications, A.R. Hambley, Prentice-Hall Inc., 1997.

Теоретическое введение

Трехфазная система переменного тока состоит из трех источников напряжения, которые отдают мощность в нагрузку по линиям питания. Нагрузка в трехфазной системе переменного тока может быть подключена к источнику питания по схемам звезда и треугольник, как было изложено в предыдущем разделе.

В трехфазных системах напряжения имеют одинаковую амплитуду и частоту, но различаются по фазе на 120° . Если нагрузка трехфазной системы сбалансирована, т.е. имеет одинаковый импеданс для всех фаз, анализ трехфазной цепи может быть упрощен при пофазном рассмотрении. Это следует из того факта, что как реальная, так и реактивная мощность, приходящиеся на одну фазу, равны одной третьей от полной реальной и реактивной мощности, соответственно. Очень удобно проводить пофазные вычисления для цепи, соединенной по схеме звезда с общим нейтральным проводом. Если имеют место подключения типа треугольник – звезда, звезда – треугольник или треугольник – треугольник, параметры, соответствующие сторонам треугольника, преобразуются в узлы звезды и расчеты можно проводить далее.

На Рисунке 2-8 показаны два наиболее распространенных типа подключения трехфазных цепей переменного тока. Нагрузки в этом

случае запитываются от трехфазного источника, подключенного по схеме звезда.

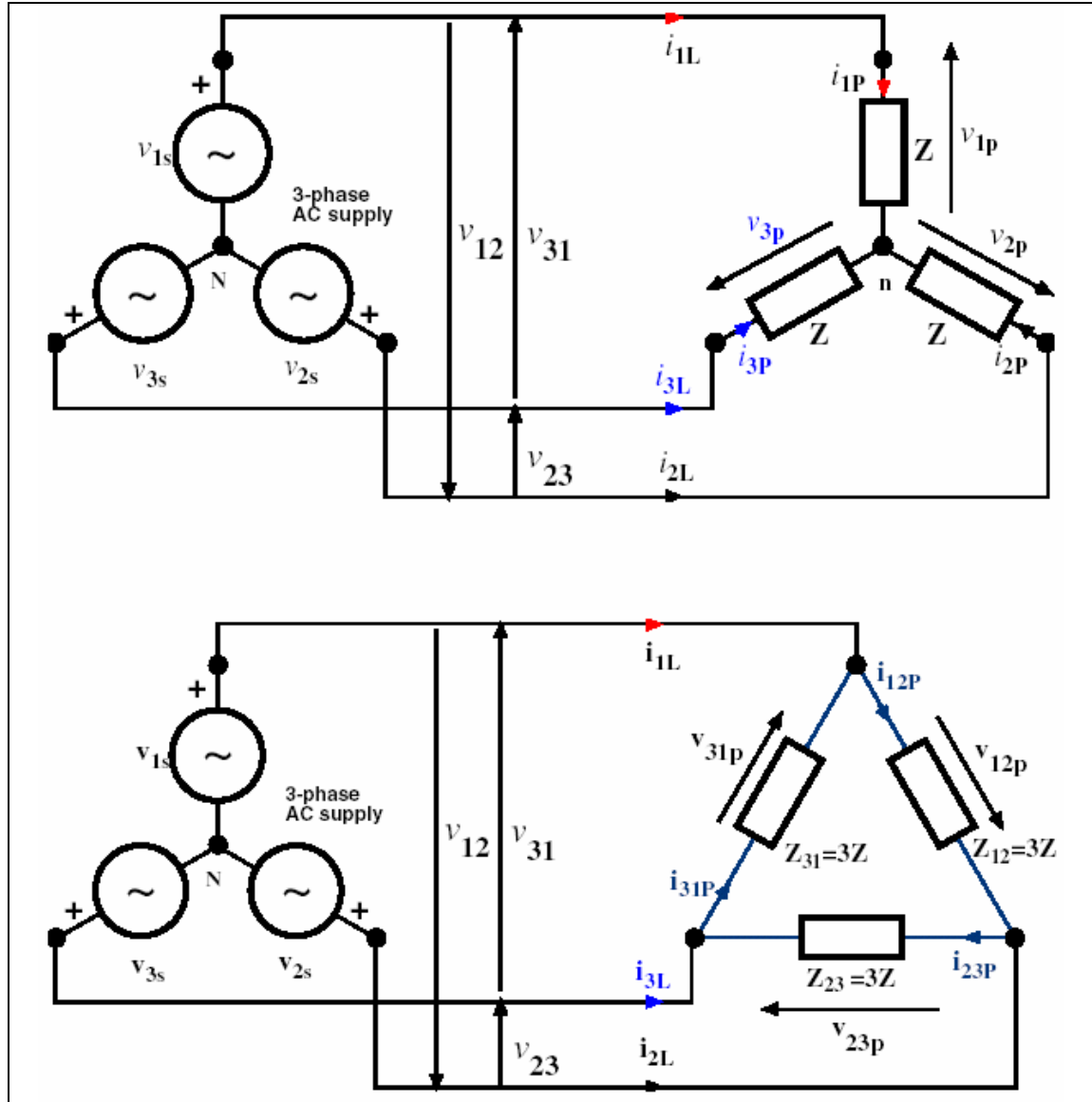


Рисунок 2 - 8. Два основных способа подключения сбалансированной нагрузки в трехфазных цепях переменного тока

В идеальном трехфазном источнике питания частоты и амплитуды напряжений всех фаз равны между собой, тогда напряжение на каждой из фазных линий можно записать как:

$$\begin{aligned} v_{1s}(t) &= V \sin \omega t \\ v_{2s}(t) &= V \sin(\omega t - 2\pi/3) \\ v_{3s}(t) &= V \sin(\omega t - 4\pi/3) \end{aligned} \quad (2.16)$$

Подобными выражениями описываются и осциллограммы токов в случае установившейся синусоидальной волны. Далее, введем четыре основные

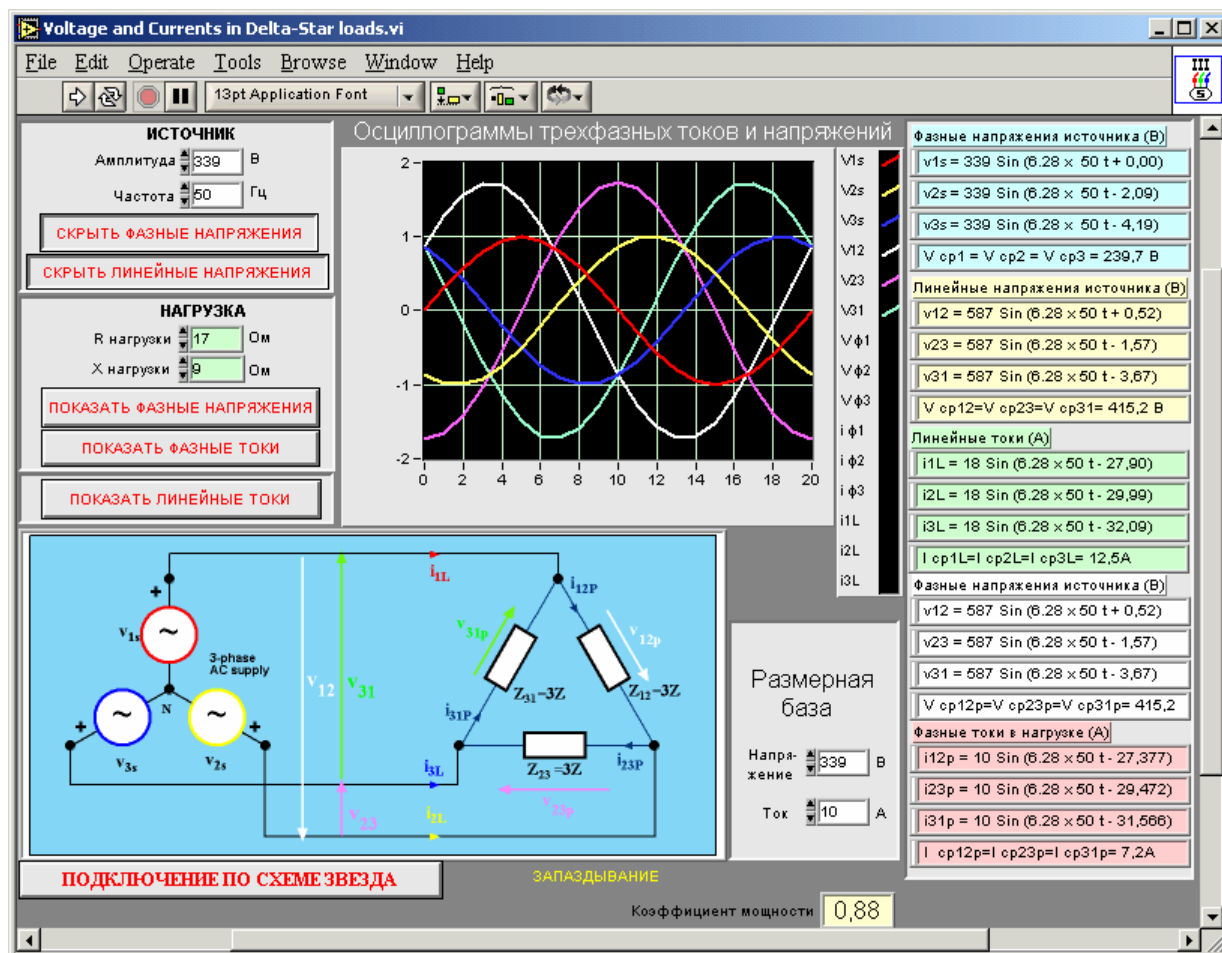
определения, необходимые для напряжений и токов в трехфазных системах (имеются в виду среднеквадратические, не амплитудные, значения):

- **Фазное напряжение**, вводится как величины, обозначенные на Рисунке 2-8 $V_{1S}, V_{2S}, V_{3S}, V_{1P}, V_{2P}, V_{3P}, V_{12P}, V_{23P}, V_{31P}$.
- **Межфазное (линейное) напряжение**, вводится как V_{12}, V_{23}, V_{31} на Рисунке 2-8.
- **Фазный ток** - $i_{1P}, i_{2P}, i_{3P}, i_{12P}, i_{23P}, i_{31P}$ на Рисунке 2-8.
- **Линейный ток** - i_{1L}, i_{2L}, i_{3L} на Рисунке 2-8.

Трехфазная нагрузка называется **сбалансированной**, если линейные напряжения на всех фазах, так же как и линейные токи, равны между собой. В сбалансированной трехфазной системе соотношение между линейными и фазными величинами весьма простое, его можно определить по векторным диаграммам либо по динамическим (зависящим от времени) выражениям для напряжения/тока. Наиболее легко это можно сделать для среднеквадратических значений напряжений и токов (V и I). Согласно Рисунку 2-8, можно составить следующую таблицу соотношений:

Сбалансированная нагрузка, подключенная по схеме «звезда»	Сбалансированная нагрузка, подключенная по схеме «треугольник»
$I_{1P} = I_{1L}, I_{2P} = I_{2L}, I_{3P} = I_{3L};$ $I_L = I_{1L} = I_{2L} = I_{3L}$	$I_P = \frac{I_L}{\sqrt{3}}$ $I_L = I_{1L} = I_{2L} = I_{3L} \text{ и } I_L = I_{1L} = I_{2L} = I_{3L}$
$V_P = \frac{V_L}{\sqrt{3}}$ $V_L = V_{12} = V_{23} = V_{31} \text{ и}$ $V_P = V_{1P} = V_{2P} = V_{3P}$	$V_{12} = V_{12P}, V_{23} = V_{23P}, V_{31} = V_{31P}$ $V_L = V_{12} = V_{23} = V_{31}$
Напряжения на импедансах и токи через них отличаются по фазе на 120°	

На Рисунке 2-9 приведена лицевая панель ВП, именуемого «**Напряжения и Токи в нагрузках, подключенных по схемам звезда и треугольник**» (Voltage and currents in delta/star loads.vi).



Используйте эти элементы управления для установки амплитуды и частоты источника питания. Эти кнопки позволяют показать/скрыть фазные и линейные напряжения источника	Этот график отображает осциллограммы трехфазных синусоидальных напряжений и токов в установившемся режиме. Чтобы включить/выключить отображение осциллограмм, используйте кнопки, расположенные слева. Убедитесь, что введенные вами значения напряжений и токов правильны		Осциллограммы трехфазных напряжений и токов в цепи, изображенной снизу, отображаются здесь в виде формул, зависящих от времени. Обратите внимание, что напряжения и токи сгруппированы и выделены цветом, чтобы подчеркнуть отдельно фазные и линейные величины
Здесь можно вводить импеданс нагрузки. Эти кнопки позволяют показать/скрыть фазные и линейные токи и напряжения на нагрузке			
Этот рисунок показывает схему исследуемой цепи трехфазного переменного тока. Учтите, что нагрузка может быть подключена как по схеме ЗВЕЗДА, так и ТРЕУГОЛЬНИК и импедансы в каждой фазе будут равны Z и $3Z$, соответственно (значения находятся из преобразований звезда/треугольник)		Установите значения размерной базы напряжения и тока в этом окошке для масштабирования осциллограмм, отображаемых на верхнем графике	
Эта кнопка управляет отображением рисунка, приведенного выше.	Здесь отображается коэффициент мощности нагрузки		

Рисунок 2 – 9. Лицевая панель и поясняющая таблица к виртуальному прибору «Напряжения и Токи в нагрузках, подключенных по схемам звезда и треугольник» (Voltage and currents in delta/star loads.vi)

Учебные задания

- Покажите, что линейное напряжение V_L в трехфазной системе в $\sqrt{3}$ раз больше фазного напряжения, V_P . Подтвердите этот результат, запустив виртуальный прибор при заданном фазном напряжении.
- Исследуйте применимость вышеописанного результата к линейным и фазным токам в нагрузке, подключенной по схеме треугольник.
- Для обоих предыдущих случаев найдите углы (в градусах) между фазными и линейными величинами со стороны источника питания и нагрузки.
- Установите напряжения и импедансы нагрузки, и затем вычислите фазные токи. В случае сбалансированной нагрузки, вычисления можно провести для одной любой эквивалентной цепи.
- Три лампы накаливания на напряжение 120 В мощностью по 60 Вт каждая включены по схеме треугольник. При каком линейном напряжении лампы будут светиться нормально? Каковы будут линейные и фазные токи в такой цепи?

ПОЛЕЗНЫЙ СОВЕТ: Сначала рассчитайте и установите сопротивления ламп, используя элементы управления виртуального прибора.

- Три нагрузочных резистора подключены по схеме треугольник. Для линейного напряжения 415 В (среднеквадратичное) и линейного тока 100 А (то же), определите ток через каждый резистор, напряжения на резисторах и их сопротивление. Подтвердите полученные значения самостоятельными вычислениями.

Векторные диаграммы напряжений и токов в трехфазных системах

Задачи раздела

По завершении данного эксперимента студенты должны:

- Понимать суть векторных диаграмм и фазовых последовательностей в трехфазных сбалансированных цепях переменного тока.

Литература

1. Electromechanical Energy Devices and Power Systems, Zia A. Yamaee, L. Juan, and JR. Bala, John-Wiley and Sons, 1994.
2. Theory and Problems of Electric Circuits, Schaum's Outline Series, J. A. Edminister, McGraw-Hill Book Company, 1972.
3. Electrical Machines, Drives, and Power Systems, T. Wildi, Prentice Hall, 1991.
4. Electrical Engineering, Principles and Applications, A.R. Hambley, Prentice-Hall Inc., 1997.
5. N. Ertugrul, Electric Power Applications Lecture Notes, Department of Electrical and Electronic Engineering, University of Adelaide, 1997.

Теоретическое введение

Как можно заметить из уравнения 2-16, в трехфазной цепи напряжение достигает максимального значения сначала в Фазе 1, затем в Фазе 2, и, наконец, в Фазе 3, т.е., реализуется фазная последовательность 123. Эта последовательность очевидна из векторной диаграммы трехфазного источника, на которой вектора последовательно проходят через фиксированную точку в следующем порядке: 1-2-3, 1-2-3,

В настоящем опыте исследуются вариации векторов на векторной диаграмме трехфазной цепи переменного тока. Вначале одно из напряжений принимается за исходное (опорное), при этом его фазовый угол будет равен нулю – тогда достаточно определить фазовые углы двух оставшихся фаз. При равных амплитудах и частотах фазных источников, вектора будут равной длины и построение их не вызывает затруднений.

Вектора фазных и линейных напряжений могут также быть представлены в полярных координатах, как показано на рисунке, приведенном ниже. Следует также иметь в виду, что подобное представление допустимо и для осциллограмм тока при известном фазовом угле между напряжением и током.

$$\begin{aligned}V_1 &= V_\phi \angle -90^\circ \\V_2 &= V_\phi \angle -90^\circ \\V_{23} &= \sqrt{3} V_\phi \angle 0^\circ \\V_1 &= V_\phi \angle -90^\circ \\V_2 &= V_\phi \angle -90^\circ\end{aligned}\quad (2.17)$$

где V_ϕ – фазное напряжение. На Рисунке 2-10 показана последовательность и вид векторов напряжения в трехфазной цепи переменного тока, подключенной по схеме звезда. Существует две возможности продемонстрировать фазные и линейные напряжения в виде

векторных диаграмм, как показано на Рисунке 2-10. Например, прерывистая линия на рисунке изображает линейные напряжения как вектора, выходящие из начала координат – этот метод также используется в настоящем опыте.

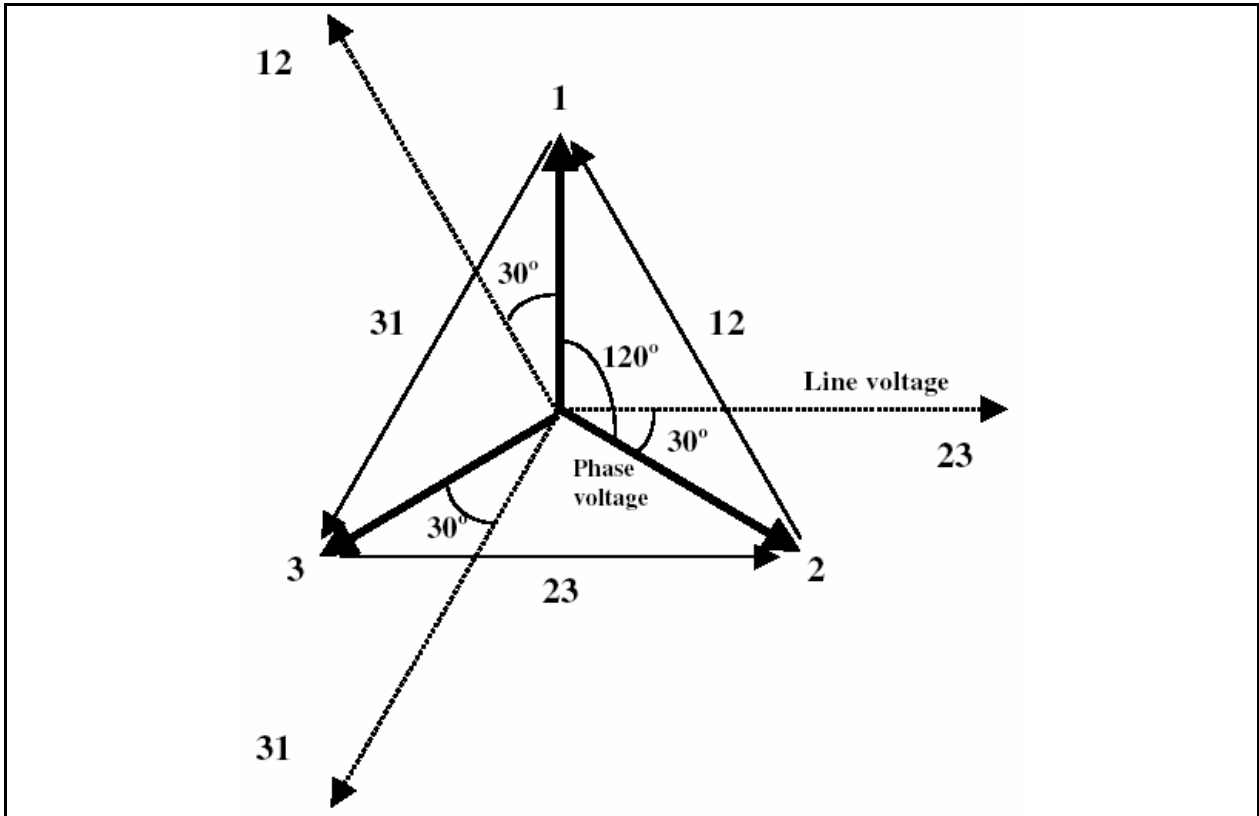
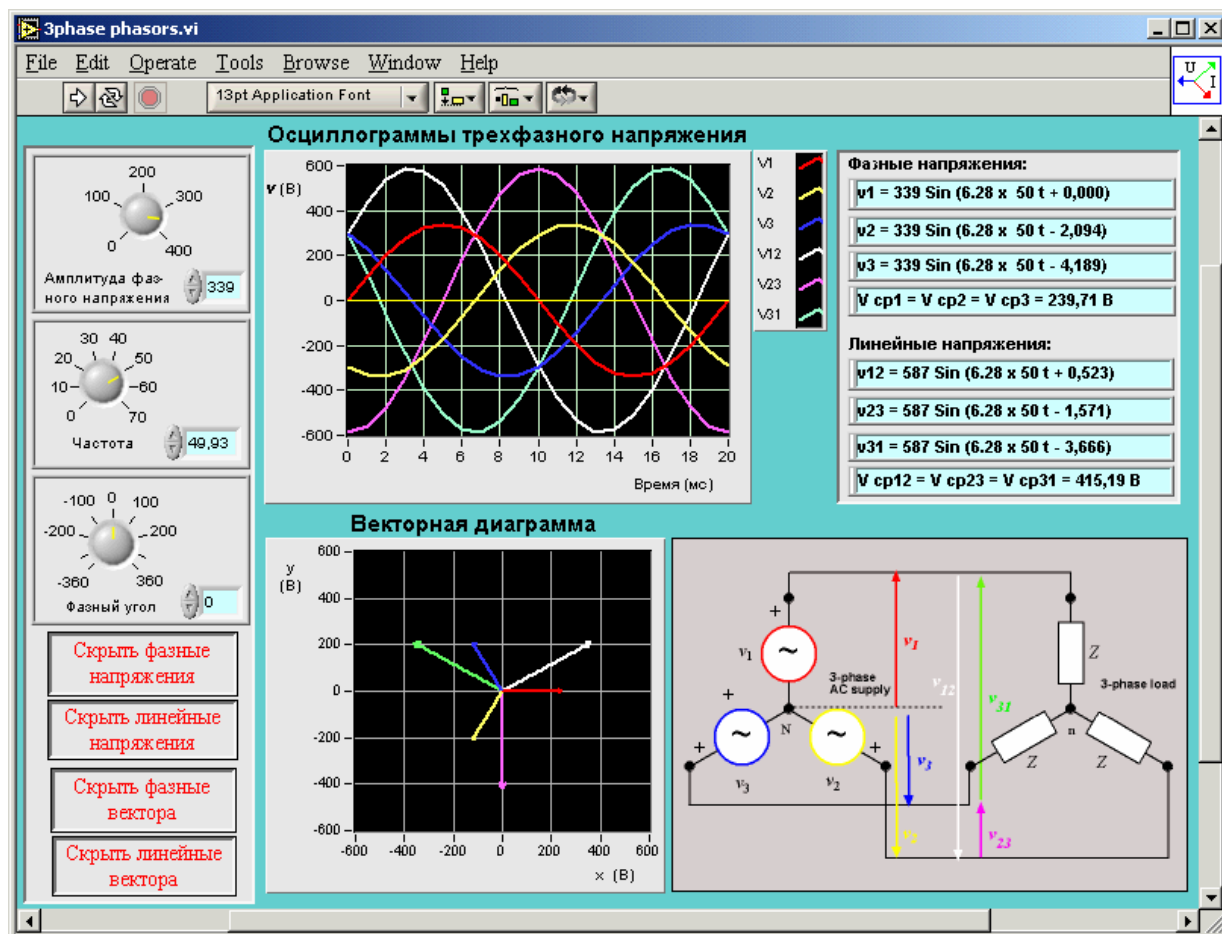


Рисунок 2 - 10. Трехфазная векторная диаграмма.

В виртуальном приборе данного опыта изучаются два типа векторных диаграмм: для отображения фазных напряжений и линейных напряжений, соответственно. Экспериментальным путем можно обнаружить, что если выбрать одну из фаз опорной, то при изменении фазового угла все вектора повернутся на одинаковый угол в том же направлении. Виртуальный прибор позволяет наблюдать также поведение во времени фазных и линейных напряжений.



<p>Эти ручки и цифровые элементы управления предназначены для установки амплитуды фазных напряжений, частоты и фазового угла трехфазного источника переменного тока</p>	<p>Этот график отображает осциллограммы трехфазных линейных и/или фазных напряжений в системе, подключенной по схеме звезда</p>	<p>Эти уравнения описывают трехфазные <i>линейные и фазные напряжения</i>. Численные значения коэффициентов меняются в соответствии со значениями, введенными с элементов управления. Формат уравнений: $v = V_m \sin(\tilde{t} \cdot \tilde{\bullet}) = V_m \sin(\tilde{\bullet} f t \tilde{\bullet})$.</p>
<p>При помощи этих кнопок можно показывать/скрывать напряжения и вектора, соответствующие фазовым и линейным напряжениям.</p>	<p>Этот график отображает вектора трехфазных линейных и/или фазных напряжений в системе, подключенной по схеме звезда</p>	<p>Этот рисунок отображает принципиальную схему исследуемой трехфазной системы.</p>

Рисунок 2- 11. Лицевая панель виртуального прибора «Трехфазная векторная диаграмма» (3phase phasors.vi) и поясняющая таблица.

Учебные задания

- Используйте ручки, выведенные на переднюю панель ВП, для изменения амплитуды напряжения, частоты и фазового угла (угла между плоскостями осциллограмм напряжения и тока). Наблюдайте изменения векторов и осциллограмм напряжения и тока и запротоколируйте свои наблюдения.
- Поверните фазовый угол по часовой стрелке и против часовой стрелки и наблюдайте направление вращения векторов. Изменились ли фазовые углы и почему?
- Считайте с индикаторов значения длины каждого вектора и сравните их с первоначально установленными, а также со значениями, приведенными в формулах временных зависимостей.



Замечание. Для упрощения сравнения вы можете выводить на дисплей фазные и линейные величины одновременно.

Мощность в трехфазных цепях переменного тока

Задачи раздела

По завершении данного эксперимента студенты должны:

- Понимать смысл понятия мощности в отношении трехфазных цепей переменного тока.
- Изучить приемы измерения мощности в трехфазных цепях переменного тока.

Литература

1. Electromechanical Energy Devices and Power Systems, Zia A. Yamaee, L. Juan, and JR. Bala, John-Wiley and Sons, 1994.
2. Theory and Problems of Electric Circuits, Schaum's Outline Series, J, A. Edminister, McGraw-Hill Book Company, 1972.
3. Electrical Machines, Drives, and Power Systems, T. Wildi, Prentice Hall, 1991.
4. Electrical Engineering, Principles and Applications, A.R. Hambley, Prentice-Hall Inc., 1997.

Теоретическое введение

При равенстве токов в сбалансированных импедансах нагрузки трехфазных цепей переменного тока, включенной по схемам звезда или треугольник, мощность в каждой фазе равна одной третьей от полной мощности. По определению, напряжение на импедансе нагрузки и ток через него могут быть использованы для вычисления мощности в одной

из фаз, как описано в Разделе «Определение мощности и компенсация коэффициента мощности в однофазных цепях переменного тока».

Предположим, что угол между напряжением и током равен θ , который равен углу нагрузки. Взяв конфигурацию нагрузки равной приведенной на Рисунке 2-12, мы можем легко найти значения фазной и полной мощностей.

Для подключения по схеме «треугольник», приведенного на Рисунке 2-12а, значения активной фазной и активной полной мощностей равны:

$$P_1 = P_2 = P_3 = P = V_L \cdot I_\phi \cos q \quad (2.18)$$

$$P_{\text{полн}} = 3P = 3 \cdot V_L \cdot I_\phi \cos q \quad (2.19)$$

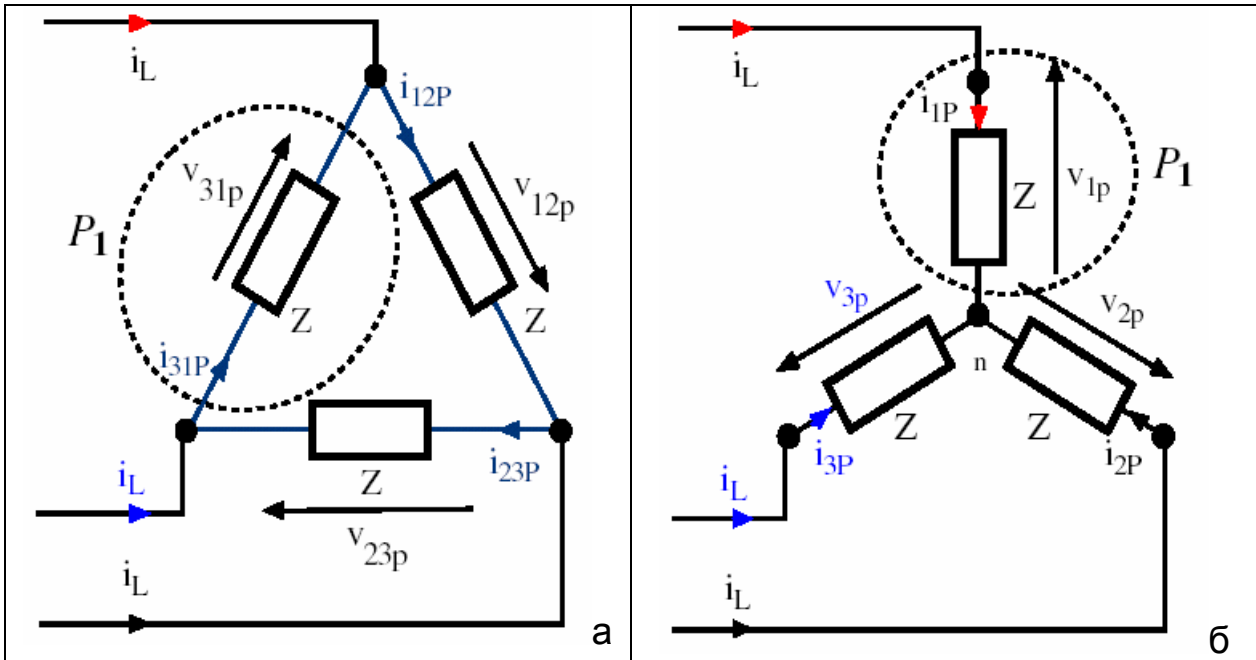


Рисунок 2 – 12. Подключение нагрузки по схеме треугольник (а) и звезда (б).

Поскольку линейный ток $I_L = \sqrt{3}I_\phi$ в сбалансированной нагрузке, включенной по схеме треугольник, то при подстановке этого значения в уравнение (2-19) мы получим следующее значение полной активной мощности:

$$P_{\text{полн}} = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L \cos q \quad (2.20)$$

При подключении по схеме «звезда», показанной на Рисунке 2-12 б, через импедансы текут линейные токи, I_L (равные фазным токам, I_ϕ) а приложенные к ним напряжения равны фазным: $V_\phi (= V_L / \sqrt{3})$.

Таким образом, фазная и полная активные мощности могут быть записаны как:

$$P_1 = P_2 = P_3 = P = V_\phi \cdot I_L \cos q \quad (2.21)$$

$$P_{\text{полн}} = 3P = 3 \cdot V_{\Phi} \cdot I_{\text{л}} \cos q \quad (2.22)$$

Если использовать соотношение между фазным и линейным напряжением ($V_{\Phi} = V_{\text{л}} / \sqrt{3}$), то выражение для полной активной мощности становится идентичным уравнению 2-20. Это означает, что полная мощность в любой сбалансированной трехфазной нагрузке, подключенной по схеме «звезда» или «треугольник», задается уравнением 2-20, $\sqrt{3} \cdot V_{\text{л}} \cdot I_{\text{л}} \cos q$, где θ – угол импеданса нагрузки.

По аналогии получаем, что полная реактивная и полная кажущаяся мощность в трехфазной сбалансированной нагрузке может быть записана как:

$$Q_{\text{полн}} = \sqrt{3} \cdot V_{\text{л}} \cdot I_{\text{л}} \sin q \quad (2.23)$$

$$S_{\text{полн}} = \sqrt{3} \cdot V_{\text{л}} \cdot I_{\text{л}} \quad (2.24)$$

Измерения мощности

Для измерения полной мощности в трехфазной системе электропитания можно использовать один, два или три ваттметра. Ваттметр можно рассматривать как измерительный прибор, объединяющий в себе вольтметр и амперметр одновременно. Показания этого прибора пропорциональны $V \cdot I \cos q$, где θ – угол между напряжением и током. Ваттметр имеет по две входные клеммы для подключения напряжения и тока, с полярностями + и –. Существует три метода измерения мощности с использованием ваттметров, которые будут описаны далее. Эти методы применяются к сбалансированным трехфазным нагрузкам переменного тока. Для их изучения создан виртуальный прибор «**Измерения мощности в трехфазной электросистеме**» (Three phase power measurements.vi).

Метод с двумя ваттметрами

Этот метод применим для трехфазной системы, сбалансированная или несбалансированная нагрузка которой подключена по трехпроводной схеме звезда или треугольник. Для проведения измерения необходимо подключить два ваттметра по схеме, приведенной на Рисунке 2-13.

Для сбалансированной нагрузки, сумма показаний двух ваттметров дает величину полной мощности. Это можно математически доказать для нагрузки, подключенной по схеме звезда:

$$\begin{aligned} P_1 &= V_{12} \cdot I_1 \cos(30^\circ + q) = V_{\text{л}} \cdot I_{\text{л}} \cos(30^\circ + q) \\ P_2 &= V_{32} \cdot I_3 \cos(30^\circ - q) = V_{\text{л}} \cdot I_{\text{л}} \cos(30^\circ - q) \\ P_{\text{полн}} &= P_1 + P_2 = \sqrt{3} \cdot V_{\text{л}} \cdot I_{\text{л}} \cos q \end{aligned} \quad (2.25)$$

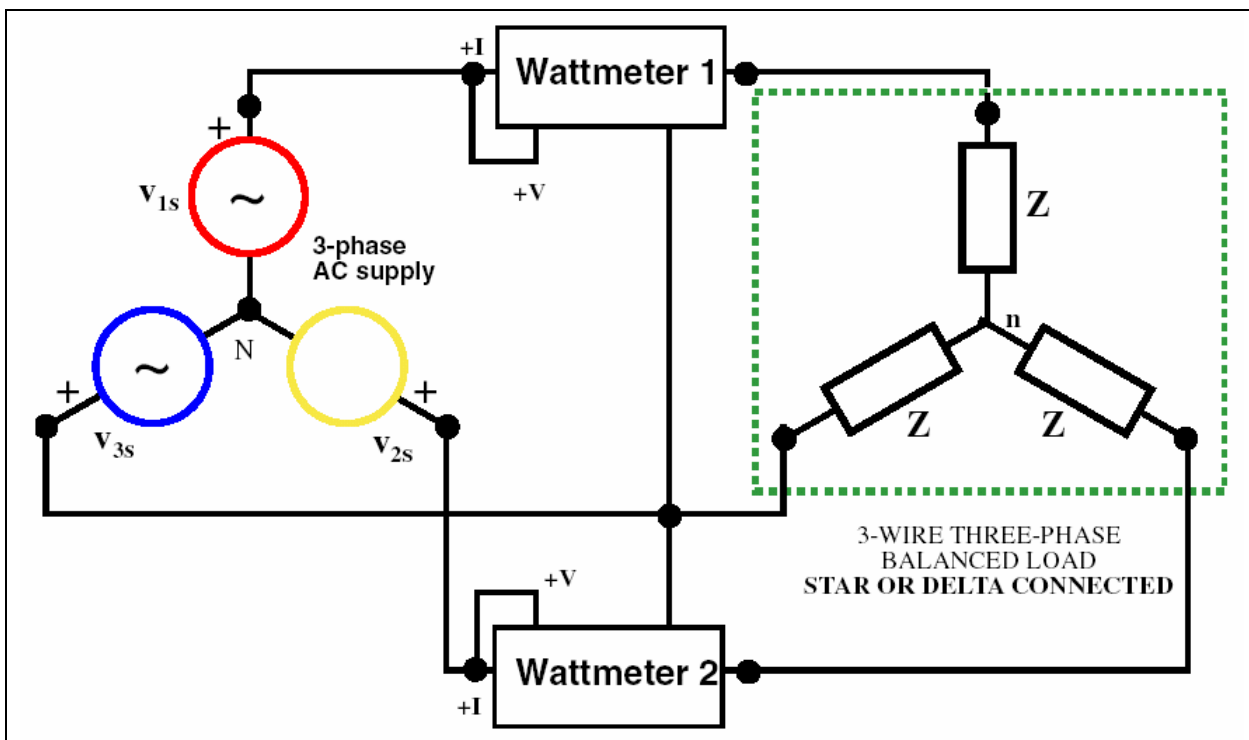


Рисунок 2 – 13. Измерение мощности двумя ваттметрами для нагрузки, подключенной по схеме звезда или треугольник.

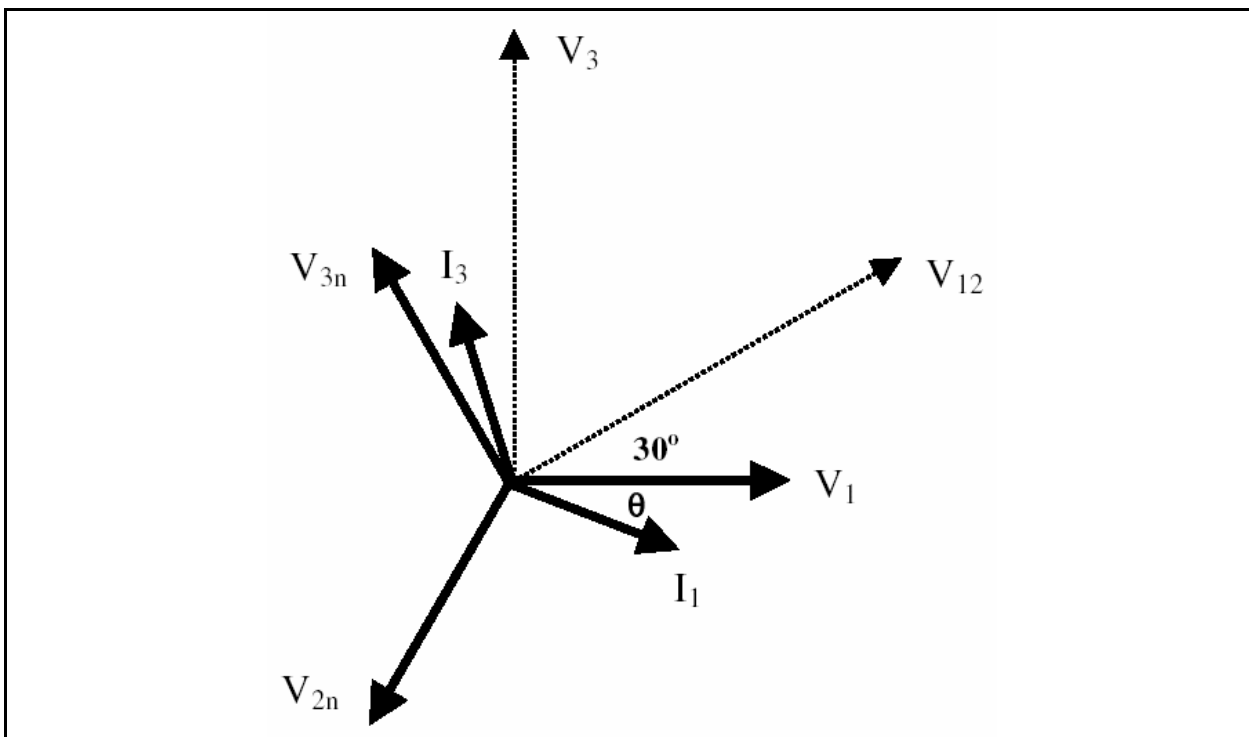


Рисунок 2 – 14. Трехфазные векторные диаграммы напряжения, поясняющие метод с двумя ваттметрами.

В случае появления различия между показаниями ваттметров можно провести его оценку:

$$P_2 - P_1 = V_L \cdot I_L \cos(30^\circ - q) - V_L \cdot I_L \cos(30^\circ + q) = V_L \cdot I_L \sin q \quad (2.26)$$

что составляет $1/\sqrt{3}$ от величины полной трехфазной реактивной мощности. Это означает, что метод двух ваттметров пригоден для определения полной реактивной мощности в трехфазных нагрузках.

Метод с тремя ваттметрами

Этот метод применим для трехфазной системы, сбалансированная или несбалансированная нагрузка которой подключена по четырехпроводной схеме. Ваттметры подключаются по одному на фазу, как показано на Рисунке 2-15. Сумма показаний трех ваттметров равна величине полной мощности в нагрузке.

$$P_{\text{полн}} = P_1 + P_2 + P_3 \quad (2.27)$$

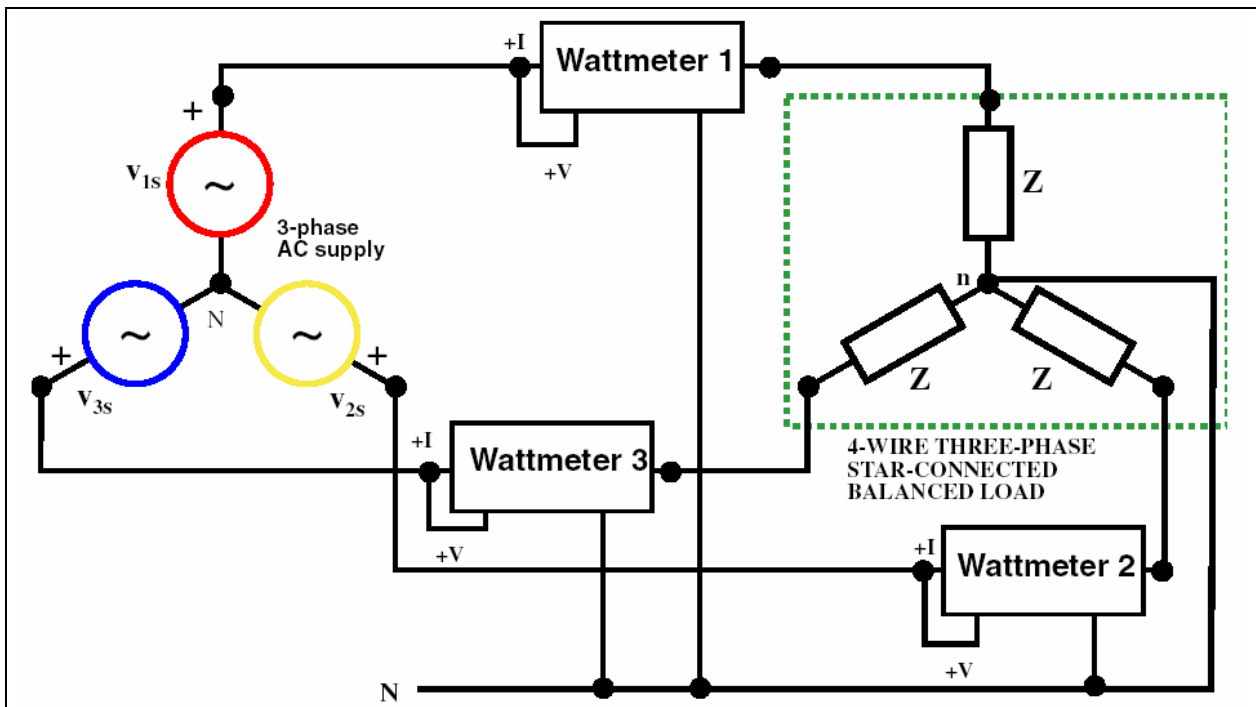


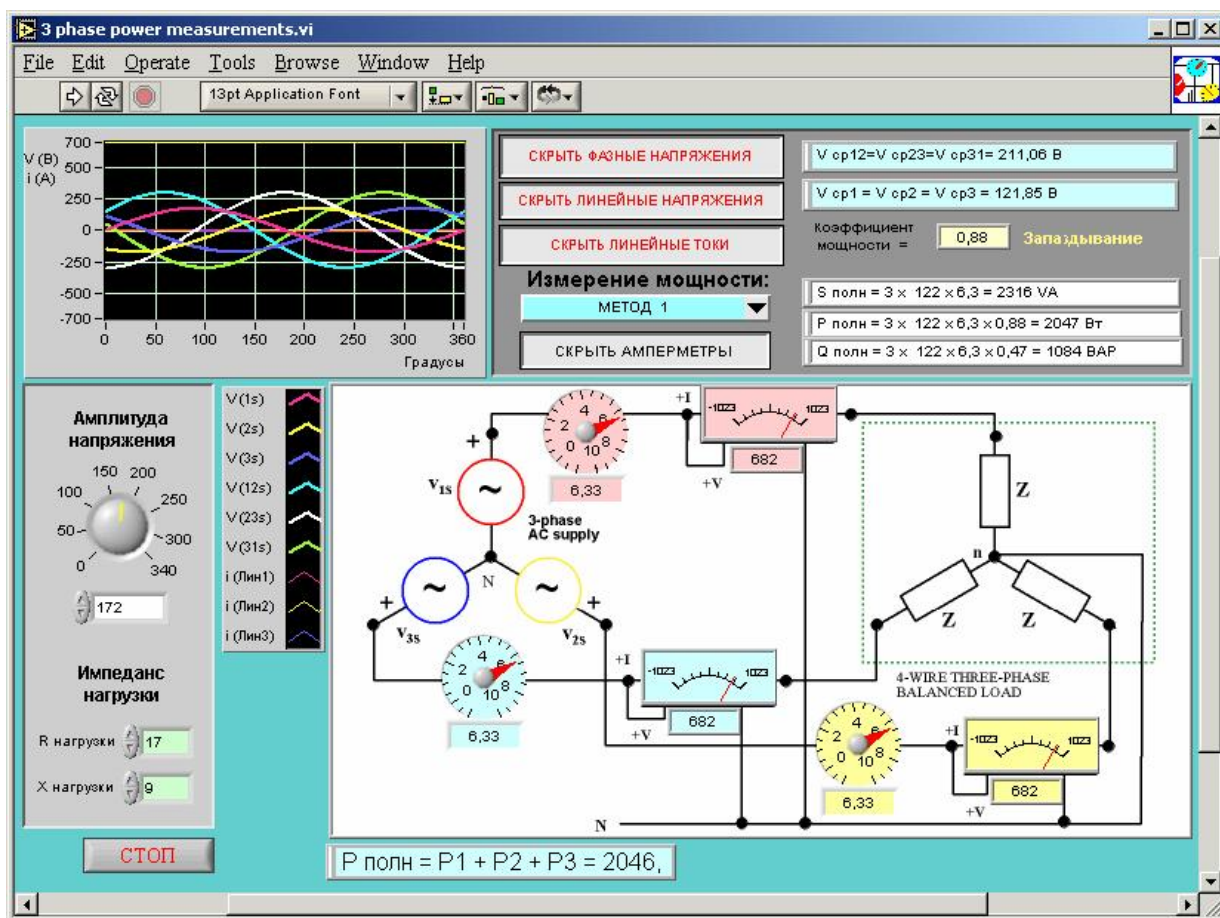
Рисунок 2 – 15. Подключение ваттметров к трехфазной четырехпроводной нагрузке.

Метод с одним ваттметром

Этот метод удобен только для трехфазных сбалансированных четырехпроводных нагрузок. Подключение ваттметра аналогично приведенному на Рисунке 2-15. Полная мощность равна утроенному значению мощности по показаниям одного ваттметра, включенного между одним из фазных проводов и нейтральным проводом.

Лицевая панель виртуального прибора, именуемого «Измерения мощности в трехфазной системе» (Three phase power

measurements.vi), приведена на Рисунке 2-16. Для получения пояснений о назначении элементов управления на передней панели можно обратиться к аналогичным таблицам из предыдущих опытов.



<p>Этот график отображает фазные и линейные напряжения и линейные токи.</p>	<p>Этими кнопками вы можете показать / скрыть трехфазные величины на графике. Вы можете также выбрать метод измерения активной мощности при помощи расположенного здесь выпадающего меню</p>	<p>Среднеквадратические значения фазных и линейных напряжений, полная активная мощность, полная кажущаяся мощность и коэффициент мощности нагрузки приведены в этом окне</p>
<p>Используйте эти элементы управления для установки фазного напряжения и импеданса нагрузки</p>	<p>Этот рисунок отображает схему выбранного метода проведения измерения активной мощности в сбалансированной нагрузке трехфазной цепи переменного тока. Ваттметры и амперметры отображаются на этом рисунке автоматически. Чтобы переключить режим отображения/скрытия этих индикаторов, используйте кнопки, размещенные выше. Учтите, что для стрелочных индикаторов установлен режим автомасштабирования, а также они снабжены цифровыми индикаторами.</p>	
<p>Кнопка СТОП</p>	<p>Здесь отображается значение мощности, измеренное по вышеприведенной схеме.</p>	

Рисунок 2 - 16. Лицевая панель виртуального прибора «Измерения мощности в трехфазной системе» (Three phase power measurements.vi).

Учебные задания

- Убедитесь в том, что вы тщательно изучили и поняли основы физической величины мощности для однофазной цепи переменного тока, изложенные в разделе «*Определение мощности и компенсация коэффициента мощности в однофазных цепях переменного тока*».
- Сбалансированная трехфазная нагрузка подключена по трехпроводной схеме «звезда» к трехфазному источнику питания с линейным напряжением 400 В. Нагрузка представляет собой импеданс $100 + j100$ Ом на каждую фазу. Установите эти параметры и выберите подходящую цепь для определения полной активной и реактивной мощностей, а также кажущейся мощности, используя приведенный виртуальный прибор.
- Рассмотрим четырехпроводную схему подключения нагрузки, данной в предыдущем задании. Используйте три метода измерения мощности для такого случая и подтвердите результаты самостоятельными расчетами.
- Три конденсатора емкостью по 10 мкФ подключены по схеме «звезда» к электрической цепи со среднеквадратическим значением линейного напряжения в 2300 В и частотой 60. Вычислите линейный ток, активную, реактивную и кажущуюся мощность при помощи виртуального прибора.
- Трехфазный нагреватель при подключении к трехфазной сети напряжением 208 В рассеивает мощность 15 кВт. Определите сопротивление его резисторов, если известно, что они включены по схеме «звезда».
- Промышленное предприятие потребляет 600 кВт·А от линии 2.5 кВ при коэффициенте мощности 0.8. Каково эквивалентное значение импеданса фаза - нейтраль электросистемы этого завода?
- Электромотор потребляет ток 25 А от трехфазного источника переменного тока напряжением 600 В и имеет коэффициент мощности 0.82. Найдите активную мощность мотора.

Рекомендации к проведению эксперимента в реальном времени

Этот опыт можно приспособить для измерения мощности трехфазных цепей переменного тока в реальном времени. Естественно, с этой целью потребуются разработать дополнительные виртуальные подпрограммы для ввода/вывода сигналов в реальном времени.

В зависимости от типа цепи (сбалансированная, несбалансированная, трех- или четырехпроводная), число необходимых каналов АЦП может меняться. Приведенная ниже принципиальная схема представляет собой наиболее гибко конфигурируемую электрическую цепь, пригодную для

исследования большинства трехфазных систем переменного тока, независимо от типа нагрузки. Нагрузка в данной схеме включается по схеме «звезда». Необходимо иметь в виду, что если нет возможности подключения к средней точке «звезды» как со стороны источника питания, так и со стороны нагрузки, необходимо создать искусственную среднюю точку (четырёхпроводная схема) с помощью трех одинаковых высокоомных резисторов, подключив их по схеме «звезда» к фазным линиям. Если же нагрузка подключена по схеме «треугольник», мощность в такой трехфазной цепи может быть измерена только методом двух ваттметров.

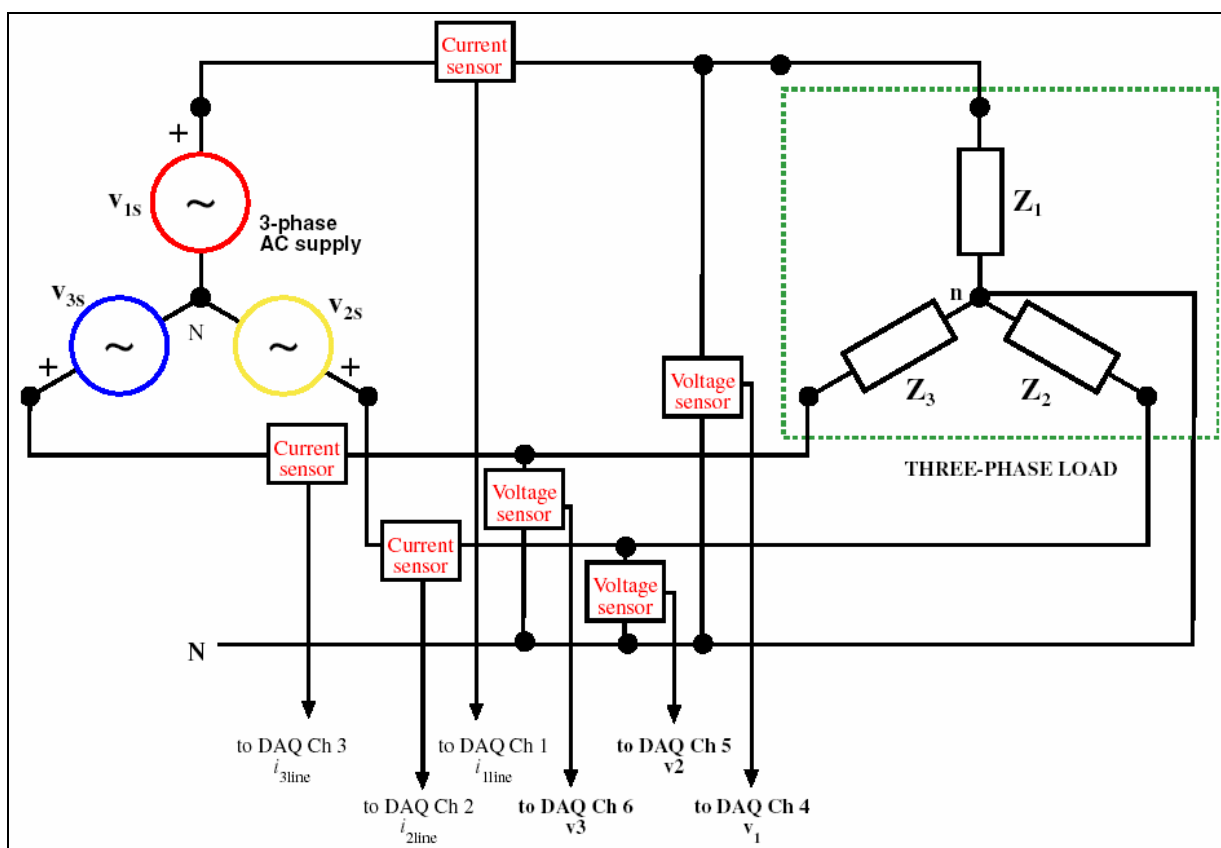


Рисунок 2 – 17. Пример принципиальной электрической схемы для реального измерения мощности в трехфазной энергосистеме.

Как показано выше, только фазные напряжения и только линейные токи можно измерить экспериментально.

Активная, реактивная и кажущаяся мощности вычисляются затем по этим измеренным значениям, при этом необходимо знать фазный угол, например, между напряжением в 1-й фазе и 1-м линейным током.

Описание использованной аппаратуры

Аппаратное обеспечение этой экспериментальной установки содержит следующие основные компоненты:

Компьютер и система ввода-вывода: те же, что и в предыдущем опыте.

Исследуемое устройство:

Три реостата сопротивлением по 50 Ом каждый, рассчитанные на ток 5 А, для формирования трехфазной нагрузки по схеме звезда.

Устройства согласования сигналов:

В данном эксперименте можно выполнять измерения напряжения и тока, используя те же устройства согласования сигнала, что и в предыдущем эксперименте (см. Рисунок 2-3).

Прочие принадлежности:

Источник питания: 3-х фазный, 415 В, 50 Гц

Автотрансформатор: 3-х фазный, входное напряжение 415 В, ток 15А; выходное напряжение 0 - 470В

Лабораторная работа 3.

Опыты с Электрическими Машинами



Определение момента инерции машин вращения

Задачи раздела

По завершении данного эксперимента студенты должны:

- Понимать физику момента инерции вращающегося материального тела
- Изучить методы измерения момента инерции электрических машин вращения

Литература

1. Electrical Machines, Drives, and Power Systems, T.Wildi, Prentice Hall, 1991.
2. Fundamentals of Electrical Drives, G.K Dubey, Narosa Publishing House, New Delhi, 1995.
3. Electrical Feed Drives for Machine Tools, Edited by Hans Gross, Siemens Aktiengesellschaft, John Wiley and Sons Limited, 1983.

Теоретическое введение и задания

Любое вращающееся тело обладает кинетической энергией. Кинетическая энергия зависит от момента инерции J , который может быть вычислен, если известна точная масса тела и его геометрические размеры. Однако вычисление момента инерции электрических машин вращения является сложной задачей, поскольку вращающееся тело (ротор) имеет геометрически сложную форму и в собранной машине доступ к нему отсутствует. Кроме того, ротор реального электромотора всегда механически соединен с другими массивными вращающимися деталями.

В каждой электрической машине вращения изменение скорости зависит от разбаланса вращающего момента системы на заданном промежутке времени и от инерции системы. Тем не менее, для решения большинства задач управления моторами момент инерции вращающейся части должен быть точно известен, чтобы иметь расширенные возможности управлять системой и анализировать ее поведение.

Для электрического мотора, вращающий момент в котором электромагнитной природы, механическое уравнение состояния в полярной системе координат записывается как:

$$J \frac{dw}{dt} = T_{ЭМ} - T_{ПOT} - T_{МН} \quad (3.1)$$

где J – момент инерции, ω – мгновенная угловая скорость, $T_{ЭМ}$ – электромагнитный вращающий момент, $T_{МН}$ – механический момент нагрузки и $T_{ПOT}$ – момент, необходимый для преодоления механических потерь в системе.

Как можно заметить из Уравнения 3-1, прямой расчет инерции системы требует знания определенного набора параметров.

Экспериментальное определение момента инерции известно как тест на торможение – он сложен в проведении и требует довольно много времени. По этой причине все чаще используются измерительные методы с использованием компьютера.

В нашем опыте предполагается, что независимо возбуждаемый электромотор постоянного тока приводит в движение механическую нагрузку, момент инерции его движущейся части определяется тестом на торможение. При его проведении силовая обмотка вращающегося электродвигателя отключается от источника питания, а измерительная плата аналогового ввода/вывода считывает мгновенные значения скорости вала мотора. При отключении питания вращающий момент мотора исчезает ($T_{ЭМ}$ становится равным нулю), система начинает затормаживаться – в этом случае Уравнение 3-1 может быть упрощено до:

$$Jw \frac{dw}{dt} = -P_{ПOT} \quad (3.2)$$

Из этого уравнения следует, что, построив зависимость скорости вала двигателя от времени при торможении, и зная мощность потерь $P_{ПOT}$ (в Ваттах) исследуемой электрической машины, мы можем вычислить ее момент инерции J .

Виртуальный прибор данного опыта, «Тест на торможение» (**Retardation Test.vi**), приведенный в этом разделе, представляет метод, используемый при исследовании момента инерции любого вращающегося материального тела, когда измеряется скорость вращения, а полная мощность потерь (преимущественно, потери на трение и сопротивление воздуха) известна.

На Рисунке 3-1 приведены две лицевые панели, предусмотренные в этом опыте. При проведении опыта следуйте мигающим индикаторам на панелях для выполнения предусмотренной последовательности вычислений в данном ВП. Первый график показывает расчетную кривую скорости торможения, обычно наблюдаемую в электрических машинах. Следующие графики отображают характеристики, построенные на основе данных из предыдущей кривой. Виртуальный прибор «**Вычисление**

Инерции J» (Calculated Inertia J.vi) осуществляет чтение из файла, содержащего набор данных о потерях в машинах (в данном опыте - электромоторе постоянного тока) и вычисляет момент инерции вращающегося тела.

Следует учитывать, что, поскольку в вычислениях присутствует производная, неточность ее начальных условий может привести к большой ошибке в значении $d\omega/dt$. Следовательно, начальные значения параметров, получаемых в результате вычислений, учитывать не следует. Для этого на второй лицевой панели нужно установить переключатель под надписью «Удалить данные:» в положение «ДА», и ввести в числовом поле количество точек, исключаемых из рассмотрения.

Последовательность проведения данного опыта коротко можно описать так:

- При вращении электрической машины с постоянной (установившейся) скоростью, выключите ее главным переключателем и одновременно запустите процесс измерения мгновенных скоростей вала, n , в оборотах в минуту (об/мин) до момента полной остановки машины. Длительность времени до полной остановки зависит от размеров и массы вращающегося тела и практически составляет единицы минут.
- После сбора данных в виде зависимости числа оборотов от времени можно вычислить угловую скорость как:

$$w = \frac{2\pi n}{60} \quad (3.3)$$

- Провести оценку значения производной $d\omega/dt$ для измеренной скорости и интервала времени. Учитывайте, что $d\omega/dt$, по сути, представляет собой тангенс угла наклона кривой, составленной из различных пар точек угловая скорость/время, и точность такой оценки сильно зависит от частоты выборок значений, особенно на начальном и конечном участках скорости. В нашем опыте точность может быть улучшена за счет аппроксимации экспериментальных данных.
- Завершающей стадией опыта является вычисление момента инерции J с использованием Уравнения 3-2, решение которого требует задания мощности потерь $P_{пот}$,

$$J = \left| P_{пот} / w \frac{dw}{dt} \right| \quad (3.4)$$

- Следует учесть, что значения $P_{пот}$ могут сильно отличаться в зависимости от условий проведения теста на торможение. Файлы данных, включенные в виртуальный прибор данного опыта, содержат три набора измеренных величин, полученных для обычного щеточного электромотора постоянного тока при различных токах обмотки. Эти величины будут абсолютно непригодны для анализа других типов электрических машин вращения.

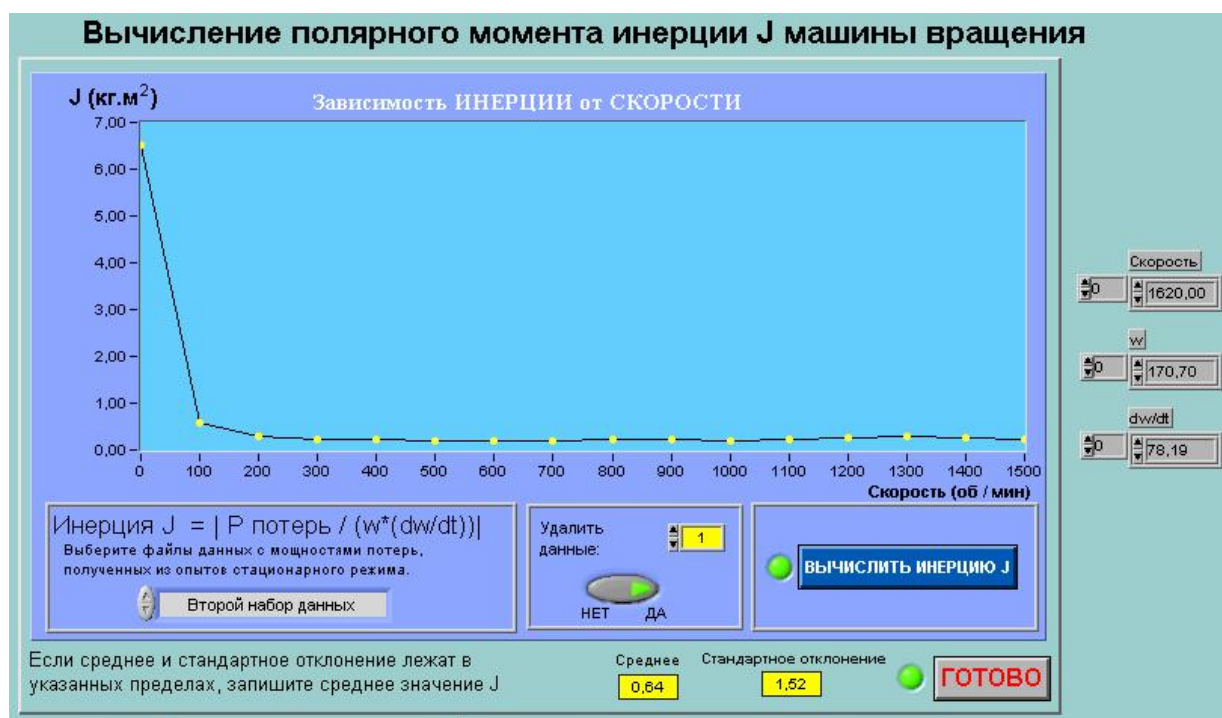
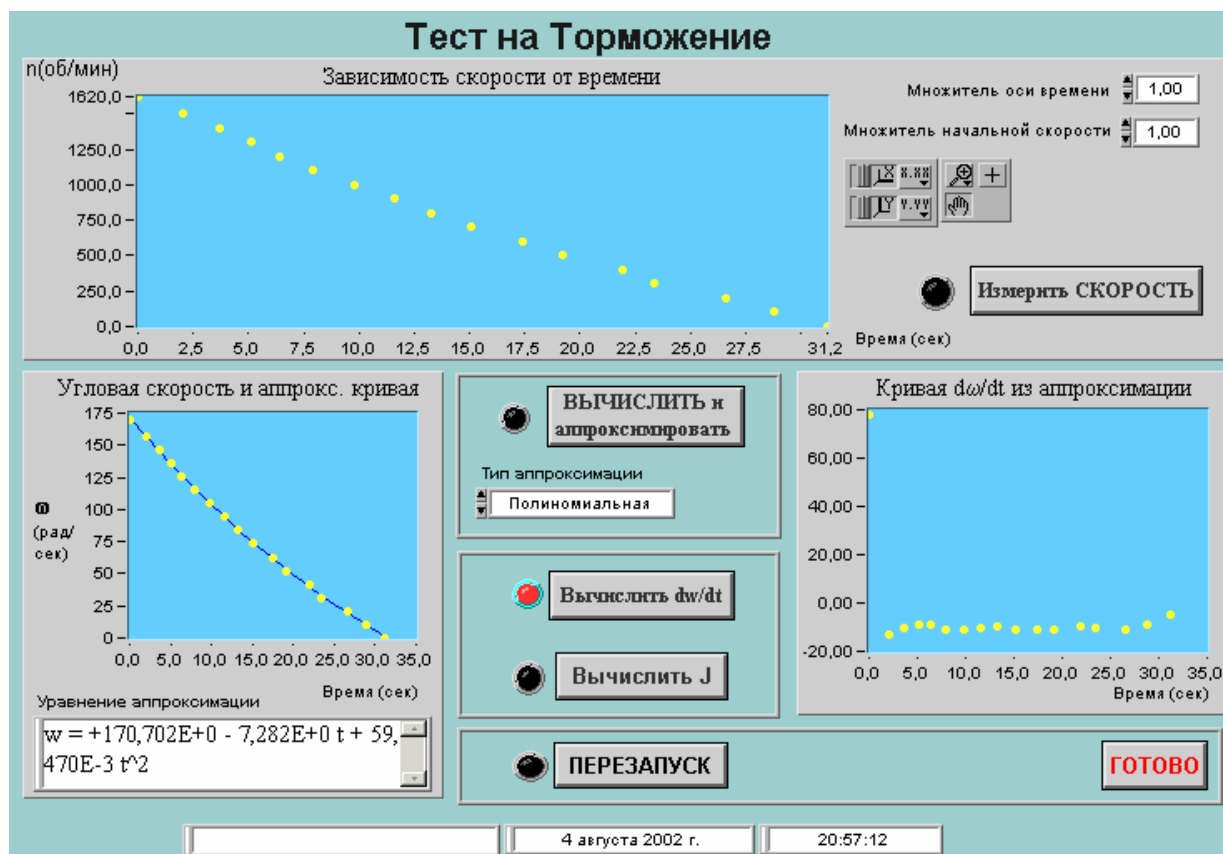


Рисунок 3 - 1. Лицевые панели виртуальных приборов «Тест на торможение» (Retardation Test.vi) и «Вычисление инерции J» (Calculated Inertia J.vi).

Тест на Торможение

После нажатия кнопки «Измерить Скорость» начинается моделирование торможения, и зависимость скорости вращения вала от времени отображается на этом графике.		Коэффициенты шкалы времени и начальной скорости вращения для моделирования задаются в этих полях ввода.
Данный график отображает аппроксимированную характеристику угловая скорость/время.	Эти элементы управления могут быть использованы для задания метода аппроксимации кривой торможения, приведенной слева. Используйте эту кнопку для старта процедуры аппроксимации.	Если кнопка «Вычислить $d\omega/dt$ » нажата, этот график отображает аппроксимированные значения $d\omega/dt$.
Здесь приводится аппроксимированное уравнение.	Дополнительные кнопки управления предназначены для вычисления $d\omega/dt$ и J , а также для повторного запуска теста.	

Вычисление полярного момента инерции J машины вращения

При нажатии кнопки «Вычислить J » открывается эта лицевая панель. График отображает значения момента инерции, вычисленные поточно на основе данных о $P_{\text{пот}}$, считанных из текстового файла данных.		
Выберите набор данных со значениями $P_{\text{пот}}$, которые будут использованы при вычислении J . Три таких набора содержатся в файле, включенном в данный опыт. Данные были получены в результате дополнительных экспериментов на указанных электрических машинах.	Используйте эти элементы управления, чтобы исключить из анализа ошибочные данные.	Используйте эту кнопку для запуска вычисления момента инерции.

Рисунок 3 - 2. Поясняющая таблица к лицевым панелям виртуальных приборов, приведенным на Рисунке 3-1.

Описание использованной аппаратуры

Компьютер и система ввода-вывода: те же, что и в предыдущих случаях

Исследуемые устройства:

В настоящем опыте исследуется инерция электрической машины вращения. В приведенную систему включены три электромотора средней мощности, работающие на одном валу. Характеристики моторов приведены в таблице, следующей далее:

Таблица 3-1. Характеристики электрических машин, использованных для целей настоящей Лабораторной работы.

Мотор постоянного тока	Асинхронный двигатель с контактными кольцами	Синхронный двигатель
5.5 кВт	5.5 кВт	8 кВт
1250/1500 об/мин	1410 об/мин	1500 об/мин
220 В	415 В: три фазы, соединение «звезда»	415 В
27.6 А	11 А	10.5 А
поле параллельной обмотки	$\cos \varphi : 0.85$	
210 В	50 Гц	50 Гц
0.647 А	Ротор: 170 В, «звезда», 22 А	

Устройства согласования сигналов:

В данном эксперименте скорость электродвигателя в реальном времени измеряется при помощи тахогенератора постоянного тока, пристыкованного к общему валу исследуемых электродвигателей.

Индукционный (Асинхронный) Мотор

Задачи раздела

По завершении данного эксперимента студенты должны:

- Понимать методику определения параметров эквивалентной цепи для трехфазного индукционного электромотора.
- Изучить поведение мотора и его характеристик для установившегося режима с синусоидальным возбуждением, включая зависимость «вращающий момент/скорость» для различных частот и напряжений источника питания.

Литература

1. Electrical Machines, Drives, and Power Systems, T.Wildi, Prentice Hall, 1991.
2. N. Ertugrul, Electric Power Applications Lecture Notes, Department of Electrical and Electronic Engineering, University of Adelaide, 1997.
3. Electrical Machines and Drive Systems, C.B. Gray, Longman Scientific and Technical, Co-publisher John Wiley & Sons, 1989.

Теоретическое введение

Цель настоящего эксперимента заключается в определении параметров эквивалентной цепи трехфазного асинхронного электродвигателя, а также в проведении его анализа на основе различных входных параметров и характеристик электродвигателя.

Ввиду хорошей развитости теоретической базы в отношении электродвигателей такого типа и ограниченного объема настоящего Руководства, мы не будем приводить здесь подробных теоретических выкладок. Предполагается, что соответствующие знания уже были получены студентами из лекционных занятий и изучения учебных пособий к данному курсу.

Большая часть экспериментальной работы не нуждается в комментариях. Основные лицевые панели виртуального прибора данного опыта приведены на Рисунках 3-3 и 3-9. Пожалуйста, учитывайте, что данный виртуальный прибор содержит большое число подприборов, каждый из которых включает теоретическую часть в виде подпрограммы, кратко поясняющей изучаемое явление.

Для правильного усвоения материала необходимо следовать тому порядку выполнения заданий (подприборов), который структурно предусмотрен в виртуальном приборе.

Кроме того, как отмечалось ранее, для наиболее полного понимания ряда подразделов данной лабораторной работы вам может потребоваться дополнительный учебный материал.

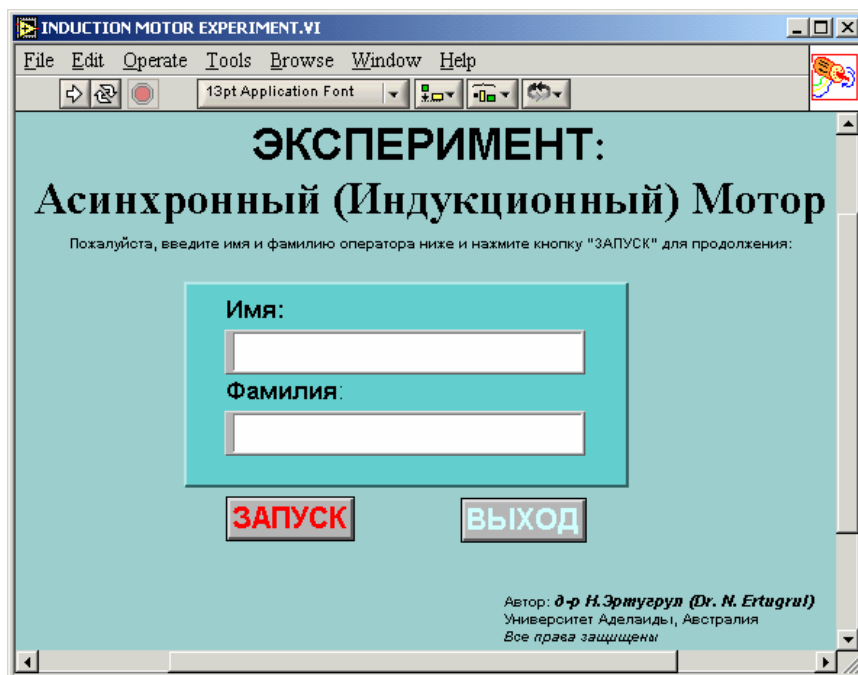


Рисунок 3 - 3. Первая лицевая панель виртуального прибора «Эксперимент с Индукционным мотором» (Induction Motor Experiment.vi)

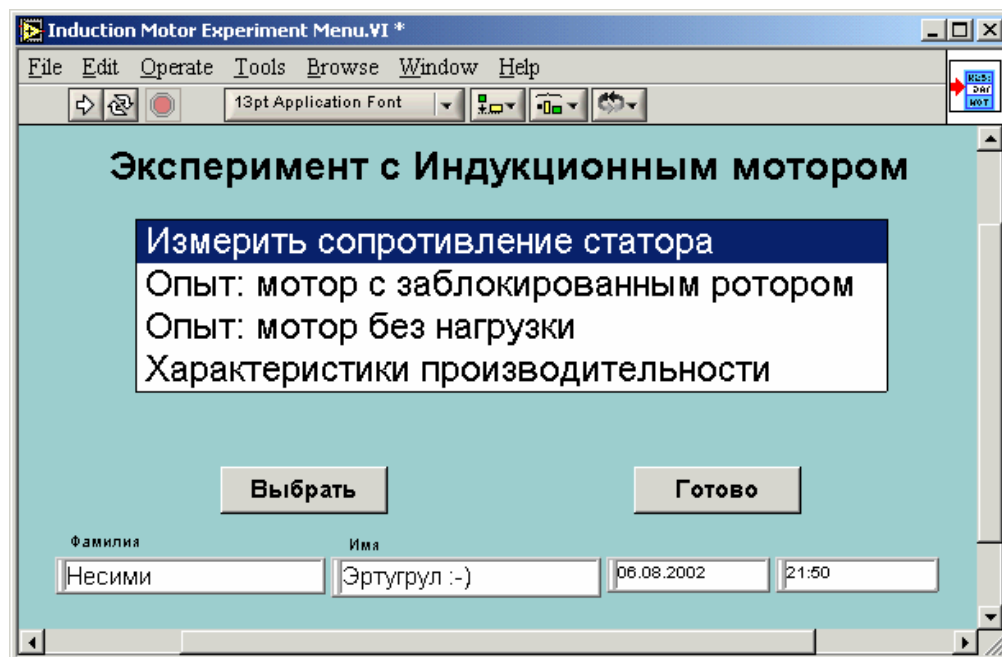


Рисунок 3 - 4. Лицевая панель, демонстрирующая главные разделы эксперимента.

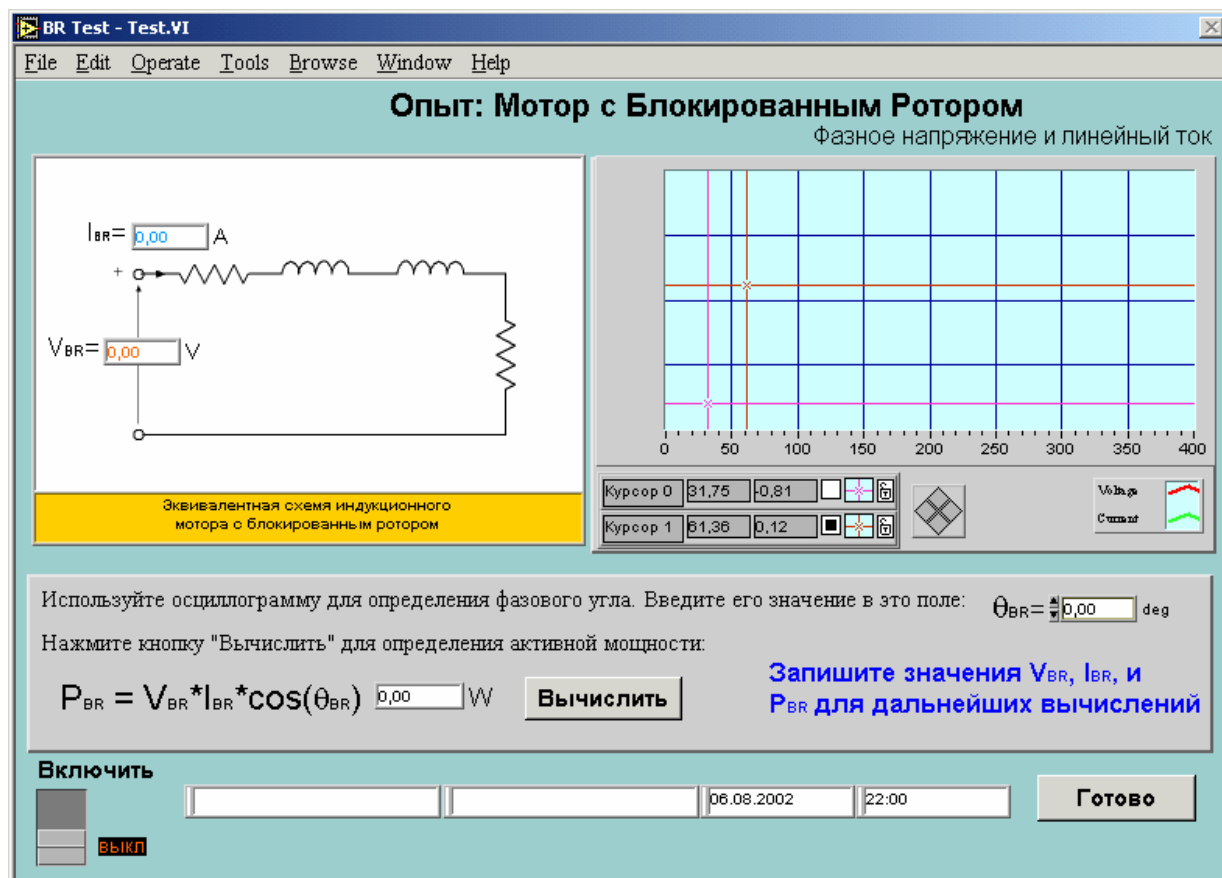


Рисунок 3 - 5. Лицевая панель «Опыт: мотор при заблокированном роторе» (Blocked Rotor Test.vi)

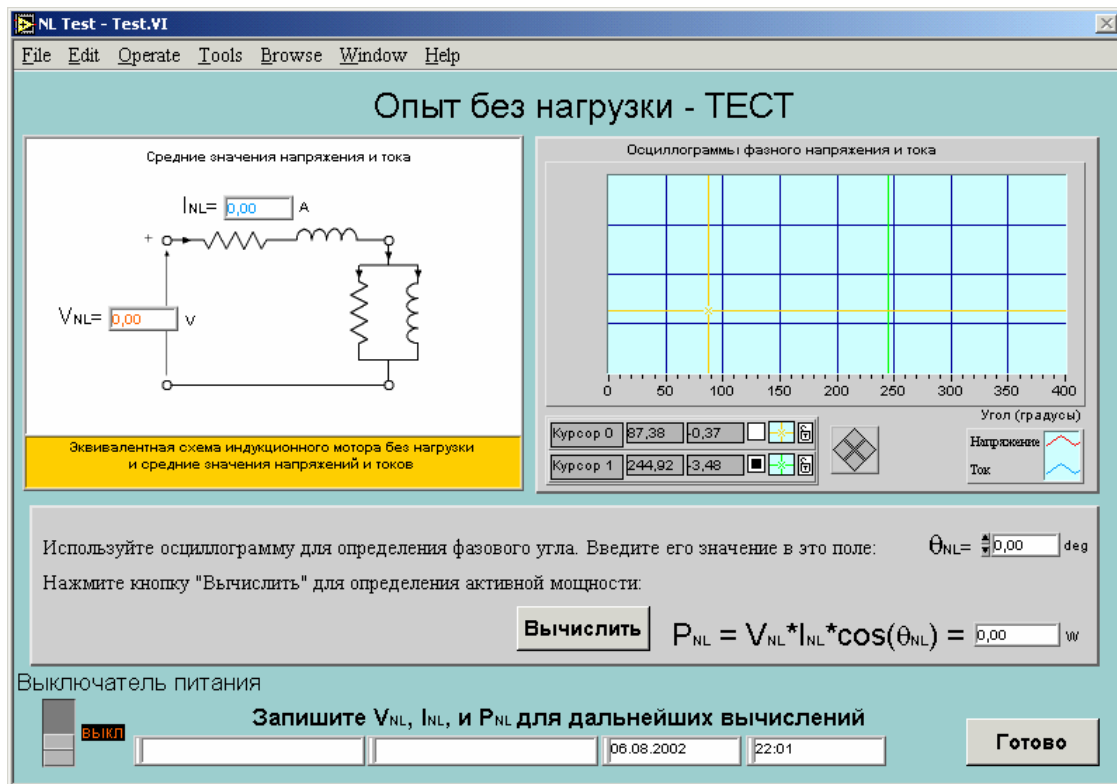


Рисунок 3 - 6. Лицевая панель ВП «Опыт: мотор без нагрузки» (No-Load Test.vi)

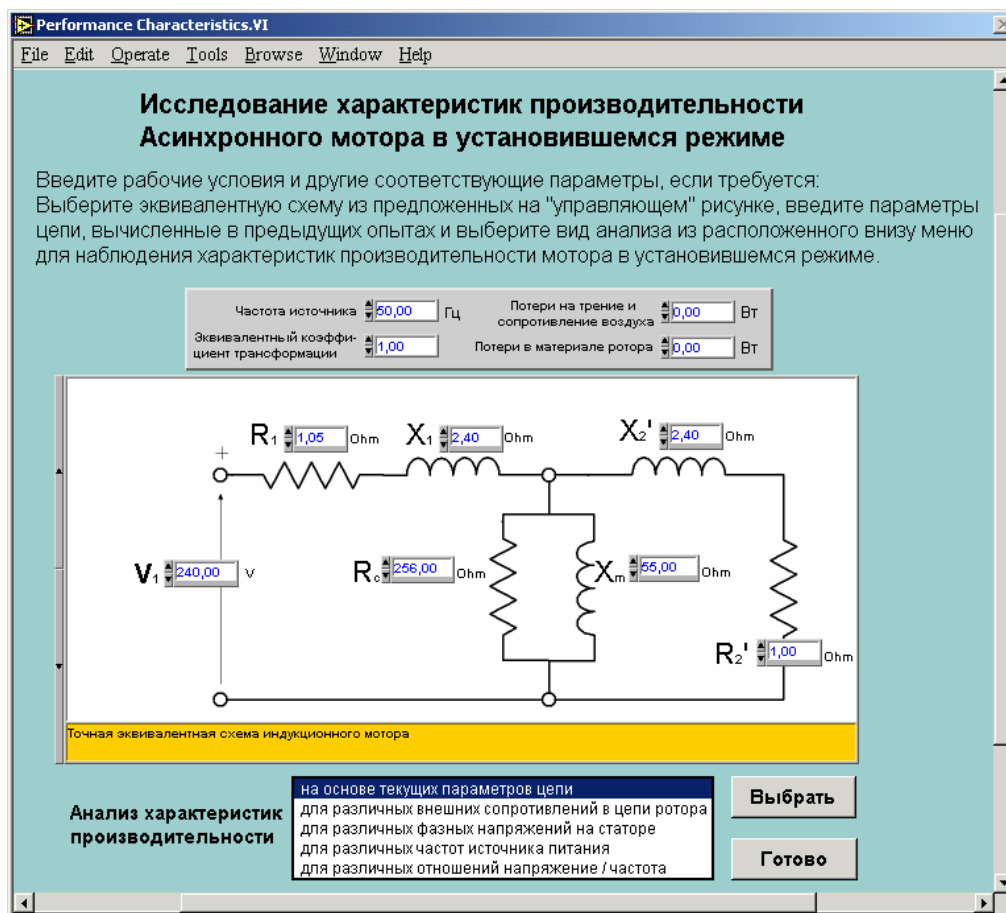


Рисунок 3 - 7. Лицевая панель, отображающая основные варианты раздела «Характеристики производительности в установившемся режиме».

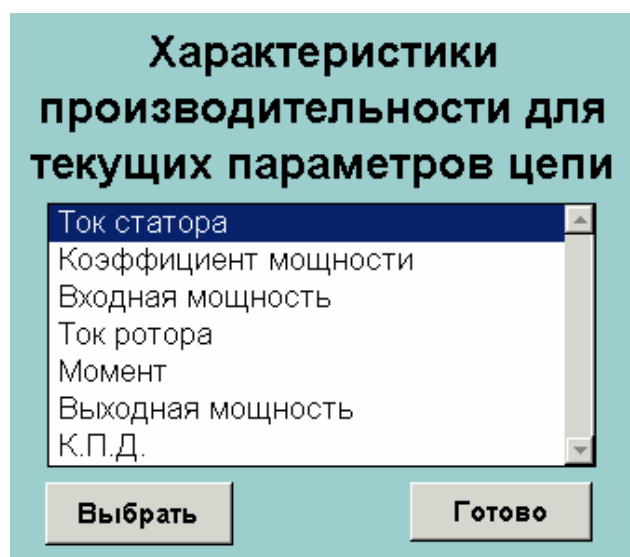


Рисунок 3 - 8. Лицевая панель подсекций основных вариантов исследования производительности

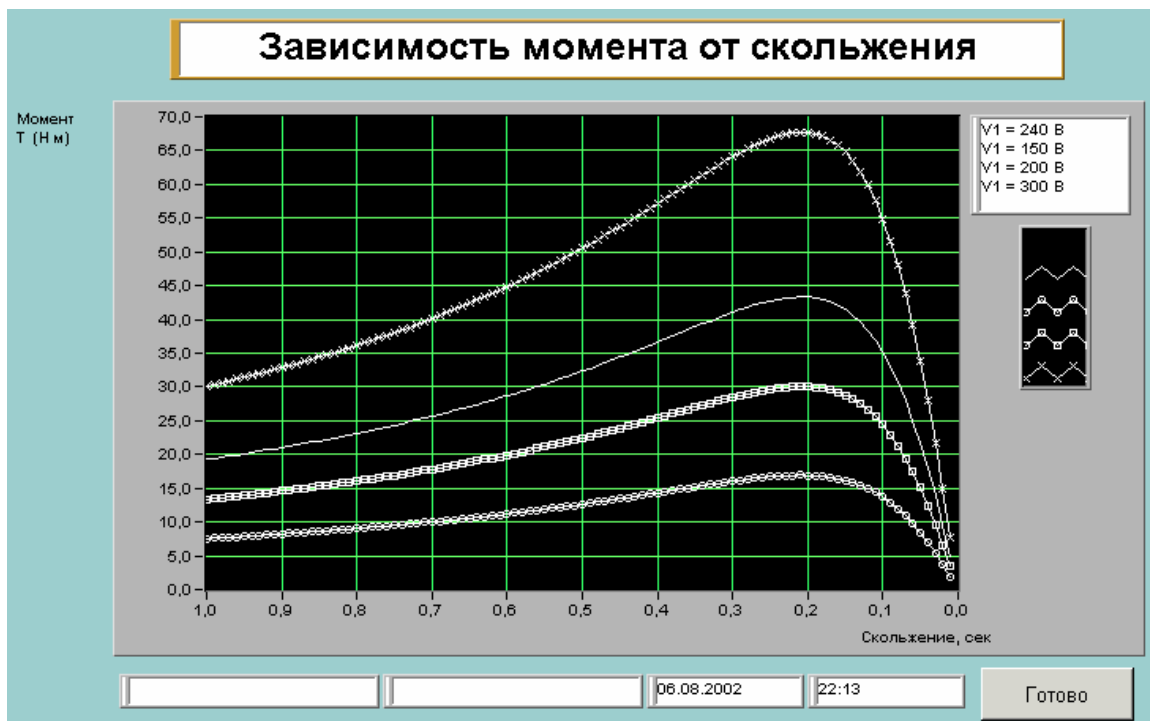


Рисунок 3 - 9. Пример лицевой панели, выбранной из меню, приведенного на Рисунке 3-8.

Описание использованной аппаратуры

Компьютер и система ввода-вывода: те же, что и в предыдущих случаях

Исследуемые устройства:

Этот опыт проводится на асинхронном электромоторе с фазным ротором (или, что то же самое, с контактными кольцами), параметры которого приведены в Таблице 3-1.

Устройства согласования сигналов:

В данном опыте измерения напряжения и тока проводились с использованием того же устройства согласования сигналов, что и в предыдущем случае, см. Рисунок 2-4.

Дополнительное оборудование:

Источник питания: трехфазный, 415В, 50 Гц

Подключение

Для проведения опыта в реальном времени диаграмма, приведенная на Рисунке 1, должна быть включена в основной виртуальный прибор и каналы ввода следует сконфигурировать следующим образом:

Канал 1 подключается к «Напряжение Фазы 1» (“Phase 1 voltage”) а **Канал 2** – к «Ток в Линии 1» (Line 1 current).

Испытания при заторможенном роторе и без нагрузки проводятся на лабораторном индукционном электромоторе с фазным ротором, внешнее сопротивление роторной цепи которого установлено равным нулю, а напряжение в Фазе 1 и ток в Линии 1 измеряются в реальном времени. Активная мощность, приходящаяся на фазу, вычисляется по среднеквадратическим значениям тока и напряжения, а фазный угол определяется по их осциллограммам. Электрические цепи для экспериментов в реальном времени собраны по схемам, приведенным на Рисунке 3-10. В эксперименте с заторможенным ротором приложенное напряжение снижается путем включения сопротивлений последовательно со статорной обмоткой, как показано на Рисунке 3-10а. Рисунок 3-10б иллюстрирует подключение двигателя для испытания без нагрузки.

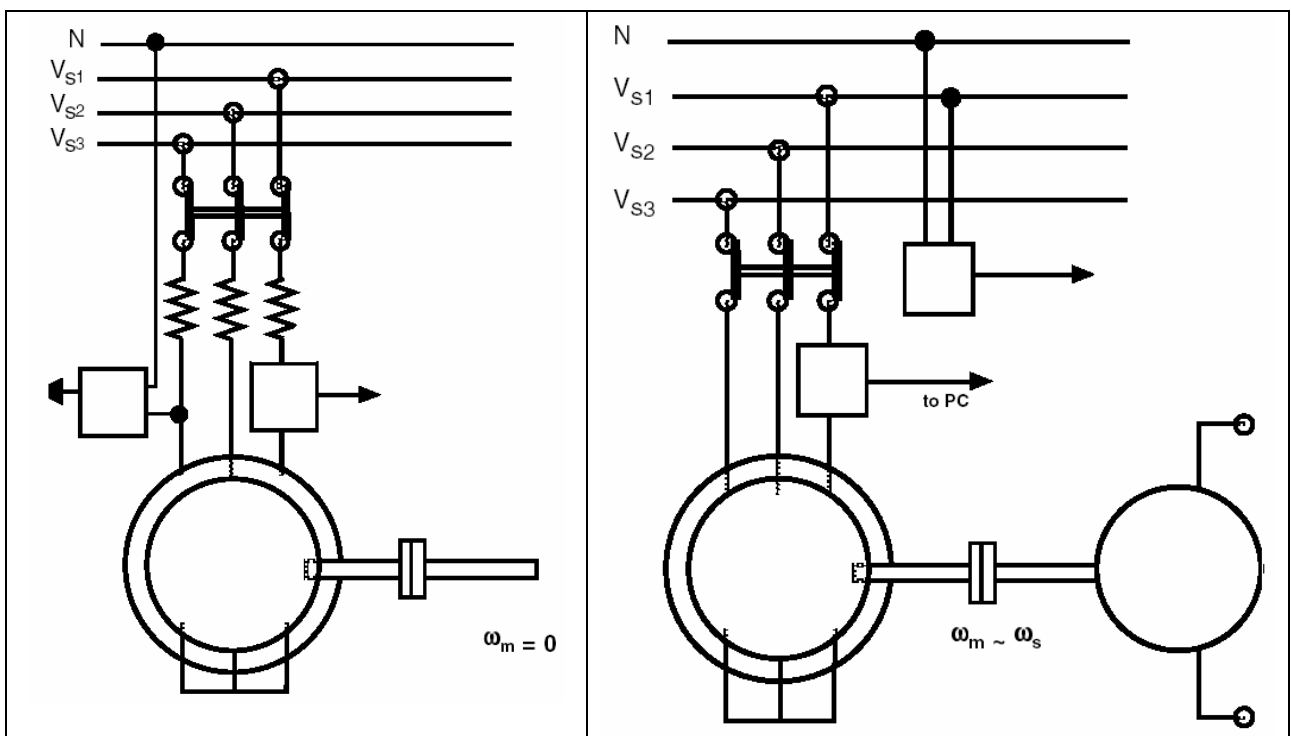


Рисунок 3 - 10. Электрические цепи для экспериментов в реальном времени.

Синхронизация синхронного генератора

Задачи раздела

По завершении данного эксперимента студенты должны:

- Изучить требования, необходимые для осуществления «синхронизации» трехфазного синхронного генератора.

- Уметь продемонстрировать принцип «синхронизации» в реальном эксперименте с использованием осциллограмм и трехфазных векторных диаграмм напряжения, а также других численных величин – частот, фазовых углов.

Литература

Дальнейшее изучение предмета потребует более глубокого понимания процессов «синхронизации» в синхронных машинах.

T.Wildi, Electrical Machines, Drives, and Power Systems, pp. Prentice Hall, 1991.

Теоретическое введение

Синхронные генераторы обычно включаются параллельно. Число параллельных генераторов в электрической энергосистеме может достигать сотен. Основной причиной такой организации является стремление создать энергосистему с бесперебойным функционированием, а также снизить расходы по ее созданию и эксплуатации. Например, при суточном изменении энергопотребления в большой системе можно организовать подключение и отключение ряда генераторов, поддерживая тем самым неизменный энергетический ресурс.

Синхронный генератор может быть включен в энергетическую сеть неограниченной мощности с одинаковой частотой и напряжением, если реализовать его привод с синхронной скоростью и током возбуждения, которые обеспечивают его выходное напряжение, равное напряжению в сети. Более того, если частота одного из генераторов в сети не точно соответствует частоте сети, фазовое соотношение между его выходным напряжением и напряжением в сети будет осциллировать с частотой, равной разности этих частот. В реальных системах разности напряжений могут появляться и по ряду иных причин. Поэтому при включении генератора в энергетическую сеть следует выполнить несколько условий, именуемых **условиями синхронизации**, которые перечислены ниже:

1. Последовательность фаз генератора должна **в точности соответствовать** последовательности фаз в сети:

Фаза 1 генератора должно быть подключена к *Фазе 1* в сети
Фаза 2 генератора должно быть подключена к *Фазе 2* в сети
Фаза 3 генератора должно быть подключена к *Фазе 3* в сети

Это условие зависит от первоначального электрического соединения фаз в генераторе. Если наличествуют данные о такой разводке, то для выполнения данного условия достаточно провести правильное подсоединение к сети. В противном случае может понадобиться специальный прибор для определения фазовой последовательности, либо обычный трехфазный индукционный мотор. Если фазная

последовательность соблюдена, мотор и генератор будут вращаться в одну сторону при подключении мотора «со стороны энергосети».

2. Частота генератора должна быть **в точности равна** частоте сети. В сбалансированной трехфазной системе это условие проверяется измерением частоты напряжения в Фазе 1, например, как со стороны генератора, так и со стороны сети.
3. Напряжения фаз генератора должны быть равны напряжениям соответствующих фаз сети:
Напряжение *Фазы 1* генератора должно быть равно напряжению *Фазы 1* сети
Напряжение *Фазы 2* генератора - напряжению *Фазы 2* сети
Напряжение *Фазы 3* генератора - напряжению *Фазы 3* сети
4. Напряжения генератора должны быть **синфазны** с соответствующими напряжениями в сети:
Напряжение *Фазы 1* генератора - в фазе с *Фазой 1* сети
Напряжение *Фазы 2* генератора - в фазе с *Фазой 2* сети
Напряжение *Фазы 3* генератора - в фазе с *Фазой 3* сети

Лицевая панель прибора. Последовательность выполнения работы.

Для проведения этого опыта нужно собрать электрическую схему, изображенную на Рисунке 3-11. Должны быть измерены шесть параметров – по три фазные напряжения в сети и на генераторе. Следует учитывать, что в практических системах величины напряжений - порядка сотен вольт. Предварительно убедитесь, что в вашей экспериментальной установке обеспечено ослабление напряжения и его изоляция до уровня («датчики напряжения» на схеме), приемлемого для непосредственной регистрации при помощи платы аналогового ввода, что обычно составляет ± 10 В, а также осуществлено правильное подключение (сопоставление физических подключений виртуальным каналам можно изменить на блок-схеме виртуального прибора).

Каналы 1, 2 и 3 сопоставляются **“Фазным напряжениям в сети 1, 2 и 3”**, соответственно

Каналы 4, 5 и 6 сопоставляются **“Фазным напряжениям генератора 1, 2 и 3”**, соответственно

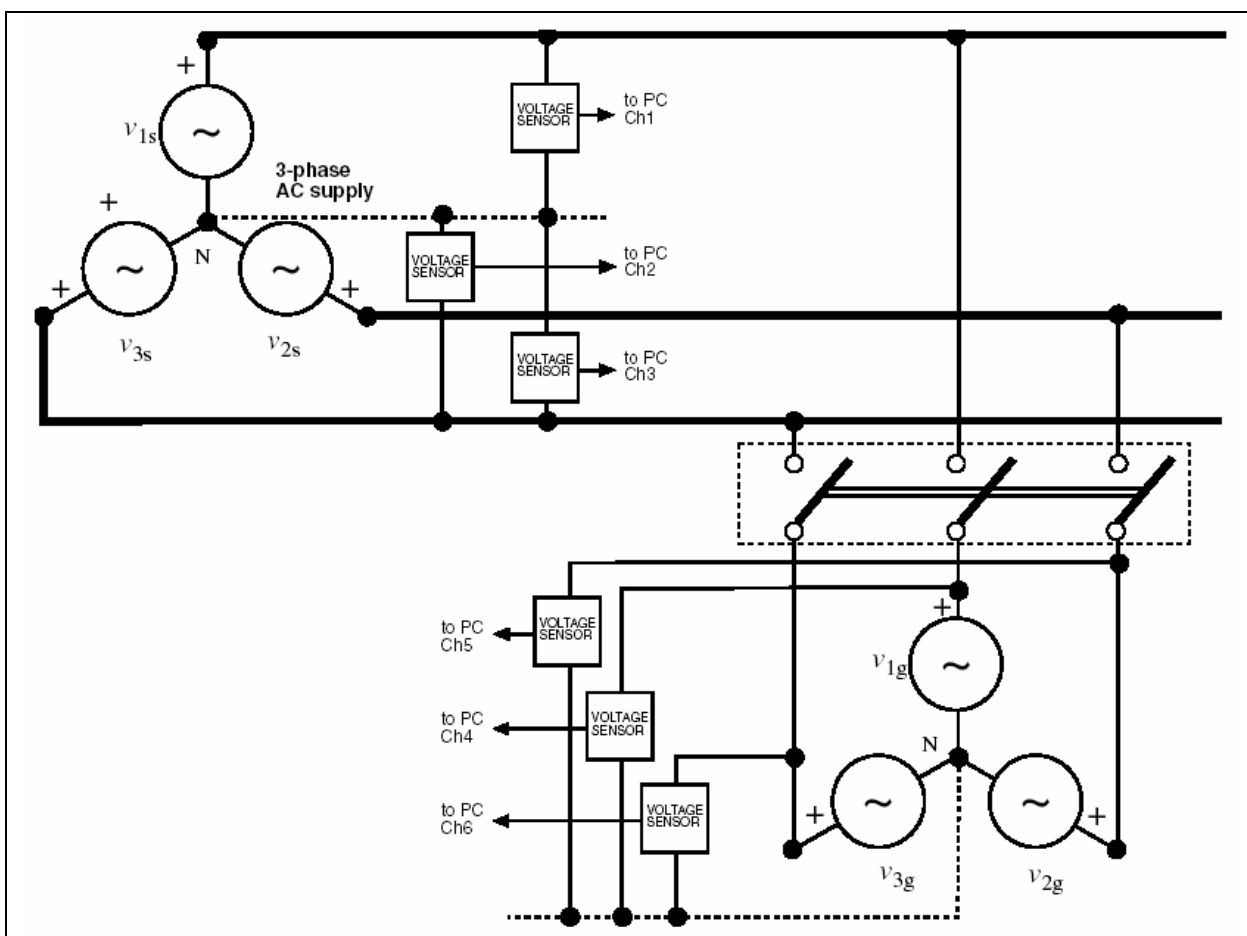


Рисунок 3 - 11. Принципиальная электрическая схема опыта реального времени по осуществлению синхронизации генератора.

Лицевая панель виртуального прибора данного опыта приведена на Рисунке 3-12.

Действия, предпринимаемые для осуществления синхронизации, следующие:

- Сначала убедитесь, что нормально разомкнутый силовой переключатель подсоединен между клеммами электрической машины и сети (система с «бесконечной мощностью») и «датчики напряжения» подключены к измерительным каналам, как указано выше.
- Запустите стартовый двигатель (например, мотор постоянного тока или индукционный двигатель) и установите скорость его вращения такой, чтобы получившаяся частота генератора стала близка к частоте энергетической сети.
- Установите возбуждение генератора таким, чтобы его напряжение сравнялось с напряжением в сети.

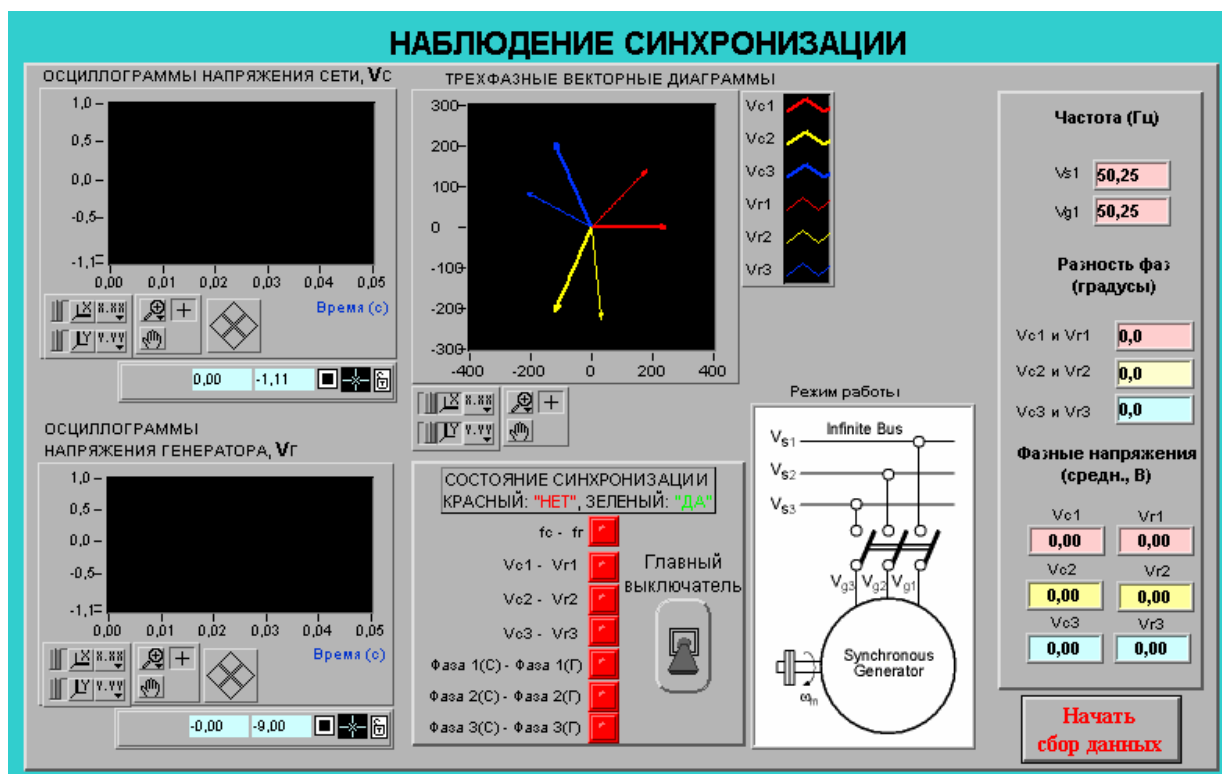
- Наблюдайте фазовый угол между фазными напряжениями генератора и сети, используя график векторных диаграмм (на практике для этой цели даже существует специальный прибор – **синхроскоп**). Этот график содержит два набора векторов трехфазных напряжений – на генераторе и в сети, которые могут иметь любые направления в диапазоне углов от 0° до 360° . И хотя градусы не отображены на графике, нулевая разность фаз в каждой из векторных пар (имеется в виду вектор напряжения в *Фазе 1* генератора и *Фазы 1* сети) может быть наблюдаена визуально как расстояние между векторами одинакового цвета. Во время процесса синхронизации трехфазные вектора медленно вращаются, отражая тем самым факт наличия фазового угла между напряжениями генератора и энергосети. Если частота генератора слегка выше или ниже частоты сети, направление вращения векторов различно (по- или против часовой стрелки).
- В «момент наступления синхронизации», когда все четыре перечисленных выше условия выполнены, загорается зеленый светодиод на передней панели, а также обновляется картинка графика и положение переключателя, сигнализируя о подходящем моменте для осуществления переключения генератора в сеть.

ПРЕДЛОЖЕНИЯ: Ввиду возможных ошибок при подключении, неточных коэффициентов масштабирования, неподходящих (или неисправных) устройствах согласования сигналов, виртуальный прибор «Синхронизация» (Synchronization.vi) может дать ошибочный «момент наступления синхронизации».

Поэтому предлагается первоначально запустить «Наблюдатель за Синхронизацией» (Synchronization Observer) в системе с разомкнутой цепью силового подключения. Для более точного опыта понадобится добавить в установку дополнительную цепь для автоматического управления силовым переключателем – наиболее просто это можно сделать, подсоединив выходной терминал переключателя к цифровой ТТЛ линии управления с платы ввода/вывода. Естественно, для коммутации силовоточной цепи под высоким напряжением при помощи цифрового выхода необходима соответствующая схема согласования, например, оптопара, управляющая мощным контактным реле.

Для исследования синхронизации:

- Включите синхронную машину
- Запустите виртуальный прибор «Наблюдение синхронизации» (Synchronisation.vi)
- Нажмите кнопку «НАЧАТЬ СБОР ДАННЫХ»
- Как только вы достигли условий синхронизации, вы можете завершить сбор данных и записать (распечатать) данные с передней панели для последующего анализа.



<p>Этот график отображает напряжения трехфазного источника питания (система с «бесконечной мощностью») в реальном времени. Показания напряжения постоянно обновляются.</p>	<p>Вектора напряжений генератора и сети приведены на этом графике. Используйте подписи к графику для идентификации векторов.</p>	<p>Здесь приведены численные значения частот напряжений генератора и сети, фазовые углы, средне-квадратические значения напряжений генератора и сети, рассчитанные и отображенные для дополнительного сведения.</p>	
<p>Этот график отображает напряжения трехфазного генератора в реальном времени. Показания напряжения обновляются синхронно с данными для энергосети (верхний график).</p>	<p>Текущее состояние каждого из условий синхронизации отображается здесь в виде светодиодных индикаторов. В момент наступления синхронизации все светодиоды становятся ЗЕЛеныМИ, при этом перебрасывается силовой переключатель.</p>	<p>Эта анимированная картинка показывает режимы работы: разомкнутая цепь / замкнутая цепь.</p>	<p>Кнопка пуска/останова эксперимента</p>

Рисунок 3 – 12. Лицевая панель опыта по синхронизации и поясняющая таблица.

Описание использованной аппаратуры

Компьютер и система ввода-вывода: те же, что и в предыдущих случаях

Исследуемые устройства:

Этот опыт проводится на синхронном электромоторе, параметры которого приведены в Таблице 3-1.

Устройства согласования сигналов:

В данном опыте измерения напряжения и тока проводились с использованием того же устройства согласования сигналов, что и в предыдущем случае, см. Рисунок 2-4.

Дополнительное оборудование:

Источник питания: трехфазный, 415В, 50 Гц

Лабораторная работа 4.

Динамическое моделирование электромоторов



Динамическое поведение электромоторов является темой, сложной для изучения без применения компьютерных средств или лабораторных экспериментальных систем, снабженных соответствующим измерительным оборудованием.

В этом разделе представлено три инструмента моделирования, предназначенных для исследования трех наиболее распространенных типов электрических моторов: трехфазного асинхронного, трехфазного безщеточного синхронного с постоянным магнитом и мотора постоянного тока с независимым пошаговым возбуждением.

Эти инструменты моделирования могут выдавать результат для любых заданных параметров.

Тем не менее, разумные результаты моделирования будут обеспечены только при введении корректных входных данных. Естественно также, что правильная интерпретация результатов и глубокое понимание методики достигается лишь при хорошем уровне теоретической подготовки студента в соответствующем разделе.

Моделирование индукционного (асинхронного) электромотора

Задачи раздела

По завершении данного эксперимента студенты должны:

- Понимать динамическое поведение трехфазного индукционного электромотора в холостом режиме и под нагрузкой.
- Экспериментально пронаблюдать разгон мотора.

Литература

Уравнения, описывающие мотор в $d-q$ системе отсчета, а также методика проведения преобразований инверсии была взята из указанной ниже книги.

P.C. Krause, Analysis of Electrical Machinery, McGraw-Hill, 1987.

Теоретическое введение

В этом разделе приведен виртуальный прибор «**Моделирование индукционного электромотора**» (**Induction motor simulation.vi**), который предназначен для исследования динамики работы трехфазного асинхронного электромотора. Предполагается, что электромотор запитывается от трехфазного синусоидального источника напряжения и его разгон начинается из неподвижного состояния.

В данном ВП электромотор описывается пятью нелинейными дифференциальными уравнениями в d - q системе отсчета, а моделирование осуществляется в неподвижной системе отсчета, связанной с самим мотором, как изложено в справочном издании, указанном выше.

В нашей модели потоки выбраны как параметрические пространственные переменные. Далее запишем нелинейные дифференциальные уравнения:

$$\frac{d\Psi_{qs}}{dt} = w_b \left[v_{qs} - \frac{R_s X'_{rr}}{D} \Psi_{qs} - \frac{w}{w_b} \Psi_{ds} + \frac{R_s X_m}{D} \Psi_{qr} \right] \quad (4.1)$$

$$\frac{d\Psi_{ds}}{dt} = w_b \left[v_{ds} - \frac{R_s X'_{rr}}{D} \Psi_{ds} + \frac{w}{w_b} \Psi_{qs} + \frac{R_s X_m}{D} \Psi_{dr} \right] \quad (4.2)$$

$$\frac{d\Psi_{qr}}{dt} = w_b \left[v_{qr} + \frac{R'_r X_m}{D} \Psi_{qs} - \frac{w - w_r}{w_b} \Psi_{dr} - \frac{R'_r X_{ss}}{D} \Psi_{qr} \right] \quad (4.3)$$

$$\frac{d\Psi_{dr}}{dt} = w_b \left[v_{dr} + \frac{R'_r X_m}{D} \Psi_{ds} + \frac{w - w_r}{w_b} \Psi_{qr} - \frac{R'_r X_{ss}}{D} \Psi_{dr} \right] \quad (4.4)$$

$$\frac{dw_r}{dt} = \frac{p(T_{\text{ЭМ}} - T_{\text{НАГ}})}{2J} \quad (4.5)$$

здесь $D = X_{ss} X'_{rr} - X_m^2$, p - число полюсов двигателя, J - момент инерции, ω_b - скорость вращения (радиан/сек), индексы d и q относятся к осям d и q соответственно, а индексы s и r указывают на статорные и роторные значения. Электромагнитный вращающий момент, обеспечиваемый электромотором, может быть найден как

$$T_{\text{ЭМ}} = \frac{3}{2} \frac{p X_m (\Psi_{qs} \Psi_{dr} - \Psi_{qr} \Psi_{ds})}{2 D w_b} \quad (4.6)$$

Приведенные выше дифференциальные уравнения решаются численным методом Рунге-Кутты, который реализован в виде стандартного виртуального инструмента LabVIEW. Метод Рунге-Кутты не требует специальных начальных условий, шаг итераций можно легко изменить, метод также не требователен к объему оперативной памяти. Основная формула, используемая в методе Рунге-Кутты, по сути, осуществляет

выборку средневзвешенных значений функции в различных точках интервала $t_n \leq t \leq t_{n+1}$ и задана следующим образом:

$$y_{n+1} = y_n + (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) / 6 \quad (4.7)$$

Где коэффициенты:

$$\begin{aligned} k_1 &= \Delta t \cdot f(x_n, y_n) \\ k_2 &= \Delta t \cdot f(x_n + \Delta t/2, y_n + k_1/2) \\ k_3 &= \Delta t \cdot f(x_n + \Delta t/2, y_n + k_2/2) \\ k_4 &= \Delta t \cdot f(x_n + \Delta t, y_n + k_3) \end{aligned}$$

Здесь $\Delta t = t_{n+1} - t_n$ – шаг по времени, $f(x_n, y_n) = dy_n / dx_n$.

Моделирование также осуществляет инверсное преобразование для построения системы отсчета **abc**, соответствующей реальным параметрам двигателя, что позволяет провести простое сравнение.

Преобразование в систему отсчета **abc** производится следующим способом:

$$f_{abc} = (K^{-1})^* f_{qdos} \quad (4.8)$$

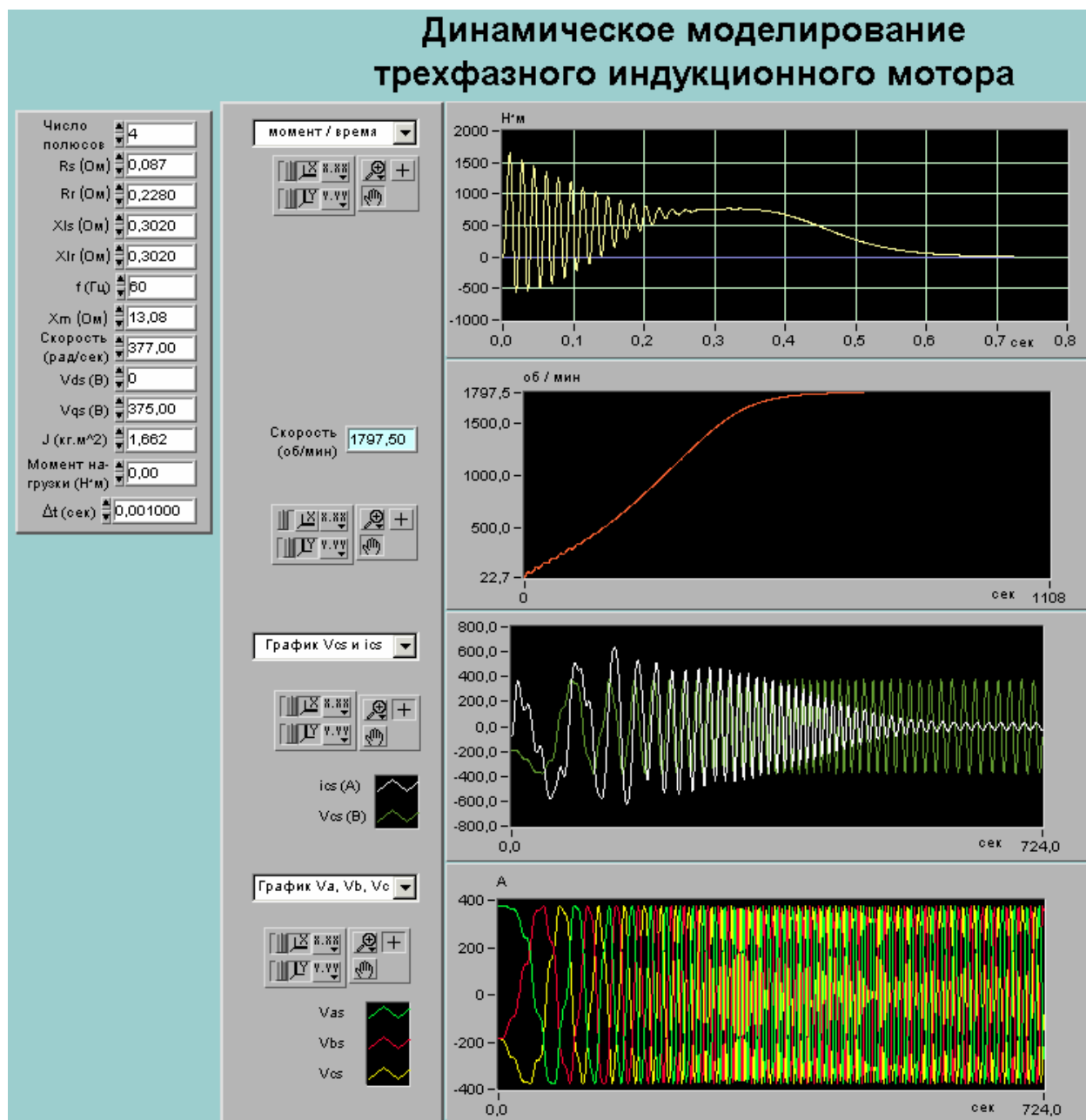
где $f_{abc} = [f_{as} f_{bs} f_{cs}]^T$ и $f_{qdos} = [f_{qs} f_{ds} f_{os}]^T$.

Здесь f может представлять собой напряжение, ток или потокосцепление в электродвигателе.

$$K^{-1} = \begin{pmatrix} \cos q & \sin q & 1 \\ \cos(q - 2p/3) & \sin(q - 2p/3) & 1 \\ \cos(q + 2p/3) & \sin(q + 2p/3) & 1 \end{pmatrix} \quad (4.9)$$

В вышеприведенной формуле, $q = \int w \cdot dt$ - используется для статорных преобразований, а $q = \int (w - w_r) \cdot dt$ - для роторных.

Передняя панель виртуального прибора приведена на Рисунке 4-1. Перед запуском процедуры моделирования, пользователь (студент) должен ввести параметры электродвигателя и нагрузки и установить шаг времени с лицевой панели ВП. После запуска приложения графики на передней панели будут отображать получаемые значения. Естественно, достоверность результатов определяется корректностью исходных значений параметров мотора.



Введите параметры мотора и нагрузки здесь.	Используйте всплывающие элементы управления для отображения смоделированных параметров мотора на графике справа.	Графики зависимостей электромагнитного вращающего момента от скорости вращения и от времени приведены здесь.
		Мгновенные значения характеристики скорость/время приведены на этом графике.
		Здесь показаны прямая и квадратурная оси мгновенных токов мотора.
		Этот график иллюстрирует осциллограммы токов мотора в системе отсчета abc (после обратного преобразования).

Рисунок 4 – 1. Лицевая панель ВП «Моделирование индукционного электромотора» (Induction motor simulation.vi) и поясняющая таблица.

Задания к работе

- Можно начать моделирование с использованием параметров электромотора, заданных по умолчанию. Дополнительные параметры можно также взять из рекомендованной книги или любого учебного пособия по разделу «Электрические машины». Более того, параметры электромотора могут быть определены экспериментально, как, например, в Лабораторной работе 3.
- Запустите моделирование и наблюдайте за изменениями электромагнитного вращающего момента, скорости и линейных токов.
- Измените полный момент инерции и момент нагрузки (один из параметров в каждом опыте) и наблюдайте изменения характеристики скорость-время.
- Измените эквивалентное сопротивление ротора электродвигателя и проследите изменения характеристики вращающий момент/скорость.
- Электромагнитный вращающий момент может быть отображен двумя разными графиками: в зависимости от скорости и от скольжения. Выполните моделирование до установления стационарной скорости и проведите сравнительный анализ этих зависимостей.
- Можете ли вы отметить изменение величины скольжения в случае увеличения нагрузки (или эквивалентного сопротивления ротора или момента инерции)?

Практические параметры электромотора

Приведенные для предыдущих опытов параметры эквивалентной схемы асинхронного электромотора (имеющего спецификацию, данную в Таблице 3-1) и полный момент инерции вращающейся системы могут быть использованы для динамического моделирования в этом разделе. Эти параметры сведены в справочную Таблицу 4-1.

Таблица 4-1. Параметры мотора, использованные для моделирования.

$R_1 = 1.3 \text{ Ома}$	$R_C = 161.3 \text{ Ома}$
$X_1 = 2.6 \text{ Ома}$	$X_m = 53.6 \text{ Ома}$
$R'_2 = 1.4 \text{ Ома}$	$J = 0.39 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$
$X'_2 = 2.6 \text{ Ома}$	

Динамическое моделирование безщеточных электромоторов переменного тока с постоянным магнитом

Задачи раздела

По завершении данного эксперимента студенты должны:

- Понимать принципы работы безщеточных электродвигателей с постоянным магнитом, как в переходном, так и в установившемся режимах работы.
- Пронаблюдать поведение электромотора в сборе с замкнутой петлей управляющей системы.

Литература

1. Ertugrul N. and Chong E., “Modelling and Simulation of an Axial Field Brushless Permanent Magnet Motor Drive”, European Power Electrical Conference, Trondheim, Norway, 1997.N.
2. Ertugrul N., “Position Estimation and Performance Prediction for Permanent-Magnet Motor Drives”, Ph.D. Thesis, University of Newcastle upon Tyne, UK, 1993.
3. Analysis of Electrical Machinery, P.C. Krause, McGraw-Hill, 1987.

Теоретическое введение

Последние достижения в области создания материалов для постоянных магнитов, мощных управляющих устройств и микроэлектронных технологий внесли большой вклад в развитие новых энергетически эффективных электромоторов, таких как безщеточных синхронных двигателей с постоянным магнитом. Среди прочих электрических двигателей эти моторы обладают наиболее высоким К.П.Д., большим коэффициентом мощности, большей выходной мощностью на единицу массы и объема и лучшей динамикой.

Электромоторы этого типа могут быть подразделены на две наиболее общие группы. Двигатели первой группы обладают трапециидальной формой Э.Д.С. и именуются безщеточными трапециидальными моторами с постоянным магнитом, или, проще, безщеточными моторами постоянного тока (БМПТ). Двигатели второй группы характеризуются синусоидальной формой Э.Д.С. и именуются безщеточными синусоидальными моторами с постоянным магнитом, или безщеточными синхронными моторами с постоянным магнитом (БСМПП).

Для обеспечения постоянного, без пульсаций, электромагнитного вращающего момента, оба типа электродвигателей требуют

соответственно прямоугольной или синусоидальной формы токов обмоток. И, напротив, при возбуждении этих электродвигателей токами другой формы мы получим пульсации (рывки) вращающего момента.

Для изучения данного типа моторов приведен весьма гибкий и легко настраиваемый прибор компьютерного моделирования. Он может быть использован при изучении поведения электродвигателя и при анализе полной системы электропривода, включающей электродвигателя инвертор и управляющее устройство (контроллер) без применения аппаратного эксперимента. Более того, моделирование позволяет имитировать экстремальные режимы его работы, что в случае аппаратного эксперимента привело бы к повреждению двигателя. При моделировании, динамический и установившийся режимы работы трехфазного электродвигателя переменного тока с постоянным магнитом можно имитировать в широком диапазоне условий работы, таких как наличие и отсутствие токового контроля, с возбуждением током синусоидальной или прямоугольной формы, а также с синусоидальными или трапециидальными оциллограммами Э.Д.С.

Для получения общей динамической модели электродвигателя использовалось трехфазное АВС аналитическое приближение, с решением системы соответствующих дифференциальных уравнений. На Рисунке 4-2 изображена блок-схема полного электродвигателя.

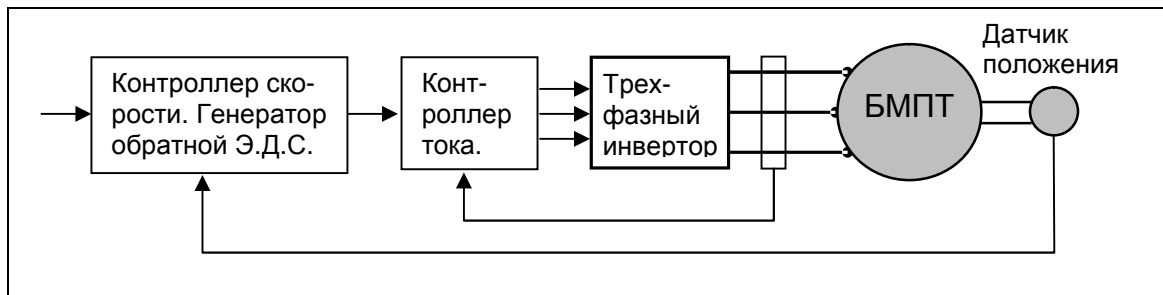


Рисунок 4 - 2. Блок-схема электропривода с безщеточным мотором постоянного тока

Уравнения для напряжений в электродвигателе можно записать в матричной форме как:

$$\begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} L & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 \\ 0 & 0 & L \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{pmatrix} \quad (4.10)$$

Здесь v_1 , v_2 и v_3 - фазные напряжения в двигателе; R – сопротивление обмотки; i_1 , i_2 и i_3 – линейные токи; L – эквивалентная индуктивность обмотки; e_1 , e_2 , и e_3 – обратные Э.Д.С.

Электромагнитный вращающий момент, $T_{ЭМ}$ и механическое уравнение электромотора можно записать таким образом:

$$T_{ЭМ} = (e_1 i_1 + e_2 i_2 + e_3 i_3) / \omega_r \quad (4.11)$$

$$T_{ЭМ} - T_{НАГ} = J \frac{d\omega_r}{dt} \quad (4.12)$$

Где ω_r – угловая скорость; $T_{НАГ}$ – нагружающий момент; J – момент инерции.

Полагая, что три фазные обмотки статора симметрично расположены под «электрическим» углом 120° друг к другу, уравнения для обратной Э.Д.С. в БСМПП можно записать так:

$$\begin{pmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} E \sin q_e \\ E \sin(q_e - 2p/3) \\ E \sin(q_e - 4p/3) \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

Для БМПП обратная Э.Д.С. в одной фазе выражается в кусочно-линейной форме как:

$$e = \begin{cases} 6Eq_e/p & 0 < q_e \leq p/6 \\ E & p/6 < q_e \leq 5p/6 \\ -6E(q_e - p)/p & 5p/6 < q_e \leq 7p/6 \\ -E & 7p/6 < q_e \leq 11p/6 \\ 6E(q_e - 2p)/p & 11p/6 < q_e \leq 2p \end{cases} \quad (4.14)$$

где E есть максимальное значение обратной Э.Д.С. и θ_e – «электрическое» положение ротора. Эти величины могут быть выражены в следующей форме

$$E = k_e \omega_r \quad (4.15)$$

$$q_e = pq_r = p \int \omega_r dt \quad (4.16)$$

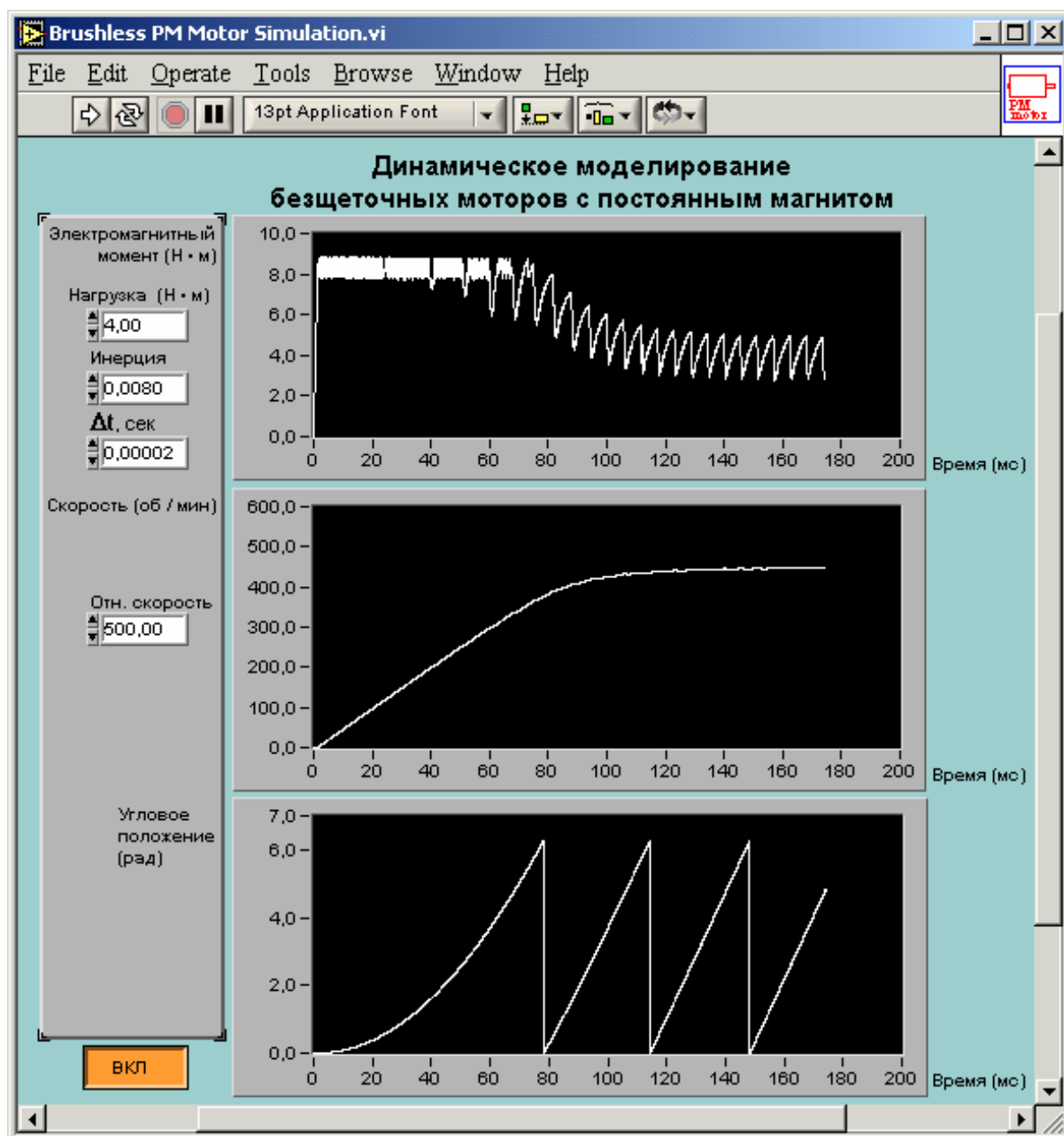
Здесь k_e – постоянная Э.Д.С., θ_r – механическое положение ротора, p – номер пары полюсов.

Оба типа электромоторов, БМПП и БСМПП, получают питание от трехфазных цепей – выпрямителей и инверторов. Прибор моделирования электромотора, сопровождающий курс, включает расчет состояний инвертора по оценочным параметрам, приведенным далее в таблице.

Таблица 4-2. Итоговые уравнения для определения напряжений в точке соединения обмоток и фазных напряжений

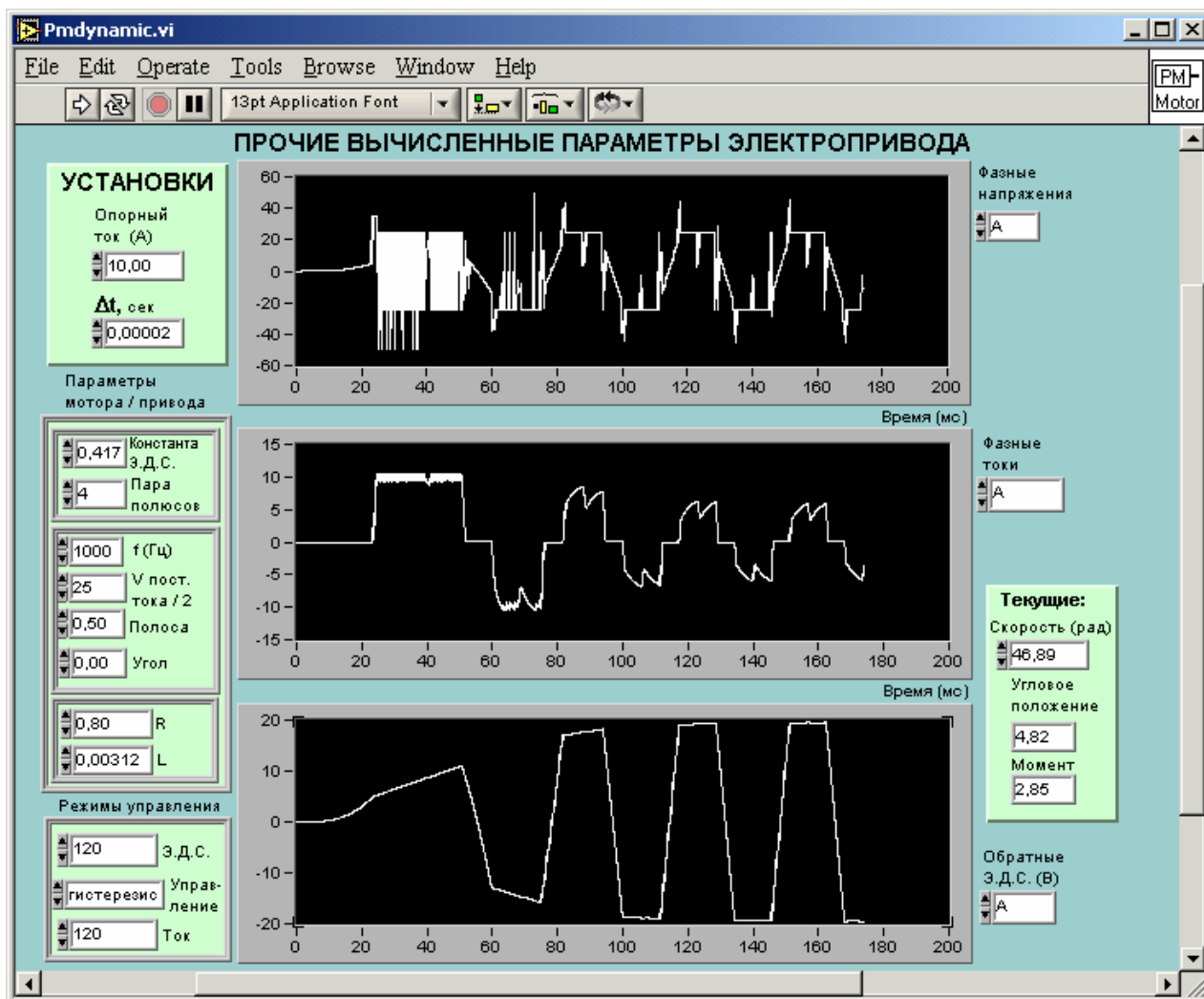
Трапециидальная обратная Э.Д.С.	Синусоидальная обратная Э.Д.С.
$e_1 + e_2 + e_3 \neq 0$ (кроме моментов пересечения нулевого уровня)	$e_1 + e_2 + e_3 = 0$
$v_a, v_b, v_c = \pm V_{\text{пост. тока}} / 2$	
$v_s = K[(v_a + v_b + v_c) - (e_1 + e_2 + e_3)]$	
Если $i_1 = 0$, $K = 1/2$, тогда $v_1 = e_1$, $v_2 = v_b - v_s$, $v_3 = v_c - v_s$	
Если $i_2 = 0$, $K = 1/2$, тогда $v_1 = v_a - v_s$, $v_2 = e_2$, $v_3 = v_c - v_s$	
Если $i_3 = 0$, $K = 1/2$, тогда $v_1 = v_a - v_s$, $v_2 = v_b - v_s$, $v_3 = e_3$	
Если $i_1, i_2, i_3 \neq 0$, $K = 1/3$, тогда $v_1 = v_a - v_s$, $v_2 = v_b - v_s$, $v_3 = v_c - v_s$	

Виртуальный прибор, разработанный для данного опыта, именуется «**Моделирование безщеточного мотора с постоянным магнитом**» (**Brushless PM motor simulation.vi**). Вид лицевых панелей при моделировании изображен на Рисунках 4-3 и 4-5, приведенных ниже. Лицевых панелей у этого ВП две, потому что в данном опыте много расчетов и большое число индикаторов выходных параметров электродвигателей. Дополнительно, небольшие управляющие окошки предусмотрены для отображения нескольких параметров на одном графике для удобства сравнения, например, линейных токов трех фаз и фазных напряжений.



В этих полях можно ввести значения момента нагрузки, момента инерции и задать шаг по времени для расчета по методу Рунге-Кутты.	Здесь приведена зависимость полного электромагнитного вращающего момента от времени
Здесь можно ввести требуемую (относительную) скорость (в об/мин)	Этот график отображает зависимость скорости от времени
Используйте эту кнопку для завершения моделирования	На этом графике отображается зависимость мгновенного «электрического» положения ротора (в радианах)

Рисунок 4 – 3. Лицевая панель ВП «Моделирование индукционного электромотора» (Induction motor simulation.vi) и поясняющая таблица.



Введите здесь амплитуду опорного тока	На этом графике приводится зависимость фазного(ых) напряжения(ий) от времени. Выберите фазу или фазы при помощи элемента управления, расположенного справа.	
Здесь можно ввести параметры мотора и привода	На этом графике приводится зависимость фазного(ых) напряжения(ий) от времени. Выберите фазу или фазы при помощи элемента управления, расположенного справа.	Здесь отображаются: текущая скорость (в рад/сек), положение ротора и момент
Здесь можно установить тип мотора и параметры управляющего тока	На этом графике приводится осциллограмма(ы) обратной Э.Д.С. в заданной фазе. Выберите фазу или фазы при помощи элемента управления, расположенного справа.	

Рисунок 4 – 4. Вторая лицевая панель ВП «Моделирование индукционного электромотора» и поясняющая таблица.

Задания к работе

- Можно начать моделирование с использованием параметров электромотора, заданных по умолчанию. Дополнительные параметры можно также взять из любой соответствующей книги или учебного пособия, а также из технических каталогов фирм, производящих электродвигатели. Введение параметров мотора и управляющего устройства осуществляется со второй передней панели ВП.
- Запустите моделирование и наблюдайте за изменениями электромагнитного вращающего момента, скорости и положения ротора. Определите время ускорения мотора.
- Измените полный момент инерции и/или момент нагрузки и наблюдайте изменения характеристики скорость-время.
- Для всех вышеприведенных условий работы электродвигателя, наблюдайте фазные напряжения, линейные токи и осциллограммы обратных Э.Д.С. в нем, переключаясь между двумя передними панелями ВП.
- Исследуйте переходное поведение обоих типов моторов (БМПТ и БСМПП) для разных установок устройства управления током: гистерезисного и управлением током с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ), которые могут быть выбраны со второй передней панели ВП.

Практические параметры мотора

Этот опыт проводится для безщеточного мотора с постоянным магнитом. Таблица 4-3 содержит набор параметров электромотора, которые были экспериментально измерены для реального мотора и могут быть использованы для моделирования.

Таблица 4-3. Практические параметры мотора, предназначенные для проведения моделирования

Постоянная вращающего момента	0.31 Н·м / А
Константа обратной Э.Д.С., k_e	0.417 В·сек / рад
Момент инерции, J	0.0008 кг·м ²
Число полюсов	8
Сопротивление обмотки, R	0.8 Ом
Эквивалентная индуктивность обмотки, L	3.12 мГн

Моделирование электродвигателя постоянного тока

Задачи раздела

По завершении этого эксперимента студенты должны:

- понимать принципы действия электродвигателя постоянного тока в установившемся и переходном режимах работы.
- наблюдать поведение мотора постоянного тока, возбуждаемого электронным понижающим преобразователем постоянного тока.

Литература

1. Electrical Machines and Drive Systems, C.B. Gray, Longman Scientific and Technical, Co publisher John Wiley & Sons, 1989.
2. Electric Motors and Their Controls, An Introduction, T. Kenjo, Oxford Science Publications, Oxford University Press, 1991.

Теоретическое введение

В промышленных электроприводах, использующих двигатели постоянного тока, обычно присутствуют такие динамические режимы, как разгон, торможение и изменения нагрузки. Для понимания и предсказания поведения электроприводов постоянного тока (включающих двигатель и силовое управляющее устройство) в этих переходных условиях следует либо экспериментально исследовать реальный электродвигатель, либо провести его компьютерное моделирование путем численного решения соответствующих динамических уравнений.

Следует учитывать, что эксперимент с реальным электромотором сложен и дорог. Более того, в реальной системе нельзя исследовать режимы потенциальной неисправности / отказа, которые часто встречаются практически. Одним из решений проблемы является построение модели электродвигателя и проведение моделирования с использованием LabVIEW. Если прибор моделирования грамотно построен, получаемая с его помощью информация может хорошо соответствовать поведению реального мотора в различных, в том числе и переходных, режимах работы. Более того, результаты моделирования могут помочь пользователю (студенту) в выборе необходимого типа двигателя, класса и модели его устройства управления и для настройки защитных устройств.

Виртуальный прибор, именуемый «**Моделирование мотора постоянного тока**» (**DC motor simulation.vi**), осуществляет моделирование мотора постоянного тока с возбуждением постоянным магнитом (т.е. при протекании постоянного тока через обмотку). Мотор запитывается от понижающего преобразователя постоянного тока, как показано на рисунке, изображенном на лицевой панели прибора.

Для моделирования использованы следующие уравнения: выражение для напряжения в питающей цепи, динамическое уравнение для механической системы *двигатель-нагрузка* и выражения для определения электромагнитного вращающего момента:

$$v_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + e_a \quad (4.17)$$

$$T_a = J \frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m + T_{НАГ} \quad (4.18)$$

$$T_{ЭМ} = k_e i_a \quad (4.19)$$

В приведенных выше формулах v_a – напряжение источника питания, i_a – ток в обмотке, R_a – сопротивление цепи якоря, L_a – индуктивность катушки якоря, J – момент инерции всей системы (мотор и нагрузка), обратная Э.Д.С. равна $e_a = k_e \omega_m$ (где k_e известна как константа обратной Э.Д.С. или константа вращающего момента), ω_m – угловая скорость системы, $T_{ЭМ}$ – электромагнитный вращающий момент, обеспечиваемый мотором, $T_{НАГ}$ – нагружающий момент и B – показатель затухания (более строго – коэффициент демпфирующей силы), которым обычно можно пренебречь.

Имейте в виду, что приведенные выше уравнения для напряжений и нагрузок справедливы для любых типов моторов постоянного тока. В данной работе рассматривается мотор постоянного тока, возбуждаемый постоянным магнитом, и описывающие его переменные состояния i_a и ω_m вычисляются из системы обыкновенных линейных дифференциальных уравнений при помощи метода Рунге-Кутты, встроенного в LabVIEW.

Преобразователь постоянного тока (DC-DC) был применен в данном эксперименте для формирования широтно-импульсно модулированной формы напряжения в обмотке мотора, работающего без обратной связи. Коэффициент заполнения импульсов с ШИМ (величину, обратную скважности) можно менять при помощи элементов управления, расположенных на лицевой панели. Внешний вид лицевой панели виртуального прибора приведен далее.

Следует отметить, что мотор, предназначенный для изучения в данном опыте, является системой с разомкнутым контуром. Это означает, что обратной связи ни по скорости, ни по току в системе не предусмотрено. Тем не менее, организовать обратную связь несложно, как это было показано в предыдущем опыте с инструментом моделирования БМПТ.

Сигнал с ШИМ, генерируемый данным ВП (см. Рисунок 4-5), управляет переключением транзистора. Пользователь может менять как частоту, так и коэффициент заполнения импульсов управляющих сигналов с лицевой

панели. Лицевая панель данного виртуального прибора приведена на Рисунке 4-6.

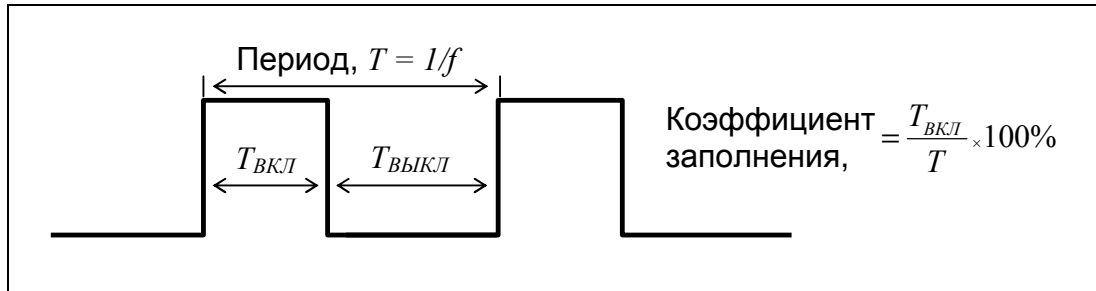


Рисунок 4 - 5. Управляющий сигнал с частотной модуляцией (ЧМ) или широтно-импульсной модуляцией (ШИМ)

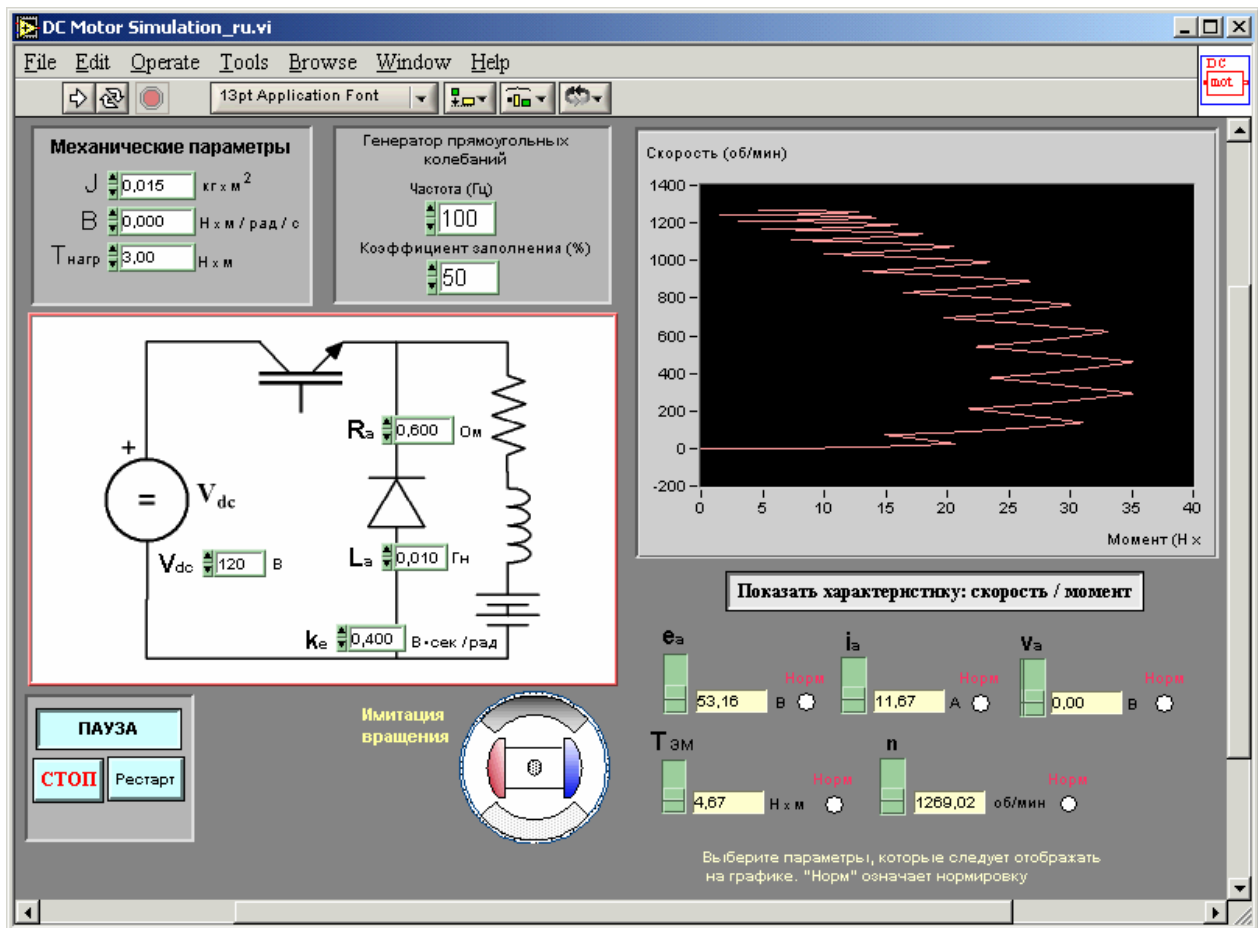
Учебные задания

- Исследуйте поведение электромотора при разгоне из неподвижного состояния, как в холостом режиме, так и под механической нагрузкой. Подтвердите наблюдением тот факт, что мотор стартует только при превышении его вращающего момента над нагружающим моментом, а также то, что скорость разгона зависит от инерции системы.
- Когда мотор стартует, начальные значения тока и обратной Э.Д.С. равны нулю. Из-за наличия индуктивности в цепи ток экспоненциально возрастает и спадает в пределах управляющего импульса, формируемого переключателем (транзистором). Измените коэффициент заполнения импульсов и частоту их следования и получите непрерывный и пульсирующий режимы протекания тока в электродвигателе.
- Исследуйте, как ток мотора, вращающий момент и скорость вращения меняются при описанных выше режимах управления.
- Можете пронаблюдать реверсирование вращения двигателя при смене полярности источника питания.
- Параметры мотора и всей системы можно менять в любой момент времени выполнения моделирования. Изменяйте только один тип параметра за раз и наблюдайте расчетные изменения других параметров.
- Для проведения теста на торможение просто установите напряжение источника питания в нуль и коэффициент заполнения – в 0%.
- Стартовое поведение мотора постоянного тока при питании от источника с постоянным напряжением можно исследовать, если держать управляющий транзистор открытым все время (установив

коэффициент заполнения равным 100%). Повторите этот опыт, снизив коэффициент заполнения, и наблюдайте максимальное значение тока, а также время разгона до установившегося значения скорости.

Дополнительная литература

1. N. Ertugrul, *New Era in Engineering Experiments: An Integrated Interactive Teaching/ Learning Approach and Real Time Visualizations*, International Journal of Engineering Education, Vol.14, No.5, pp. 344-355, 1998.
2. N. Ertugrul, A. P. Parker, and M. J. Gibbard, Interactive Computer-Based Electrical Machines and Drives Tests in the Undergraduate Laboratory at The University of Adelaide, EPE'97, 7th European Conference on Power Electronics and Application, Trondheim, Norway, 8-10 September 1997.
3. N. Ertugrul, *Towards Virtual Laboratories: A Survey of LabView-Based Teaching/Learning Tools and Future Trends*, The Special Issue on Applications of LabVIEW in Engineering Education, International Journal of Engineering Education, No. 16, Vol.2, 2000.



Здесь вводятся параметры механической части.	Здесь вводятся частота и коэффициент заполнения управляющих импульсов.	Этот график отображает данные, получающиеся с использованием параметров, заданных приведенными ниже элементами управления.
На этом рисунке приведена полная схема исследуемой цепи. Используйте элементы управления для установки параметров источника питания и мотора постоянного тока.		
Здесь расположены управляющие кнопки Пауза, Старт / Стоп, Рестарт.	Этот анимированный рисунок показывает вращение мотора. Скорость анимации пропорциональна скорости вращения.	Используйте эти переключатели для включения/выключения отображения или изменения базовых значений ряда величин, уточняющихся при моделировании.

Рисунок 4 – 6. Лицевая панель ВП «Моделирование мотора постоянного тока» (DC motor simulation.vi) и поясняющая таблица.

Приложение А.

Оборудование Лаборатории и описание аппаратуры



Очевидно, что реализация данного пособия потребует внесения изменений в имеющийся лабораторный практикум, поскольку предлагаемые программные и аппаратные средства автоматизации позволяют выполнить многие традиционные задания гораздо лучше и проще. На первый взгляд может показаться, что начальная стоимость системы слишком высока, однако она с лихвой окупается за счет резкого снижения расходов по ее эксплуатации, модернизации и расширению. Более того, многие из имеющихся приборов и установок можно легко интегрировать в нашу автоматизированную систему, что дополнительно снижает расходы. Таким образом, главным становится не вопрос, автоматизировать ли лабораторную экспериментальную систему, а вопрос - какие аппаратные и программные средства выбрать для автоматизации? Критериями выбора, несомненно, являются долговременная надежность, доступный интерфейс, простота интеграции с экспериментальным оборудованием и совместимость с другими средствами разработки.

Виртуальные приборы, представленные в данном курсе, были разработаны с использованием среды LabVIEW 5.0* и используются в Лаборатории электрических машин и двигателей Университета Аделаиды (Австралия). В следующих далее параграфах кратко излагается наш Проект лабораторной автоматизации, а также обсуждаются некоторые детали, относящиеся к аппаратной реализации Проекта и которые могут служить инструкцией для самостоятельной разработки подобных практикумов.

С технической точки зрения, для лабораторных приложений большинство инженерных проблем связано с измерением ряда физических величин, таких как температура, скорость, координата, напряжение, ток, давление, сила, момент и т.д. Компьютер, снабженный соответствующей интерфейсной платой и программным обеспечением, дает возможность как просто визуализировать данные, так и проводить довольно сложную их обработку, использующую вычислительные ресурсы компьютера. Эти эксперименты могут быть доступны удаленным пользователям для получения данных и даже для управления через локальную сеть или Интернет при использовании специального инструментария, также встроенного в LabVIEW. В зависимости от конечной задачи, экспериментальная система может содержать большое разнообразие

* Виртуальные приборы при переводе сохранены в формате LabVIEW 6.1 (*прим. перев.*)

средств ввода и вывода, поэтому при выборе конкретных модулей и устройств для создания установки необходимо четко представлять себе желаемый результат.

Фотография лаборатории приведена на Рисунке А-1, на котором представлено ее оборудование и организация рабочего пространства, включающего 8 .. 10 рабочих мест. В ходе нашего Проекта, мы получили в свое распоряжение старую лабораторию с распределительными щитами, аналоговыми измерительными приборами и электрическими машинами, и затем оснастили ее персональными компьютерами, добавили системы согласования сигналов и самостоятельно разработали виртуальные приборы.



Рисунок А - 1. Внешний вид Лаборатории электрических машин и двигателей

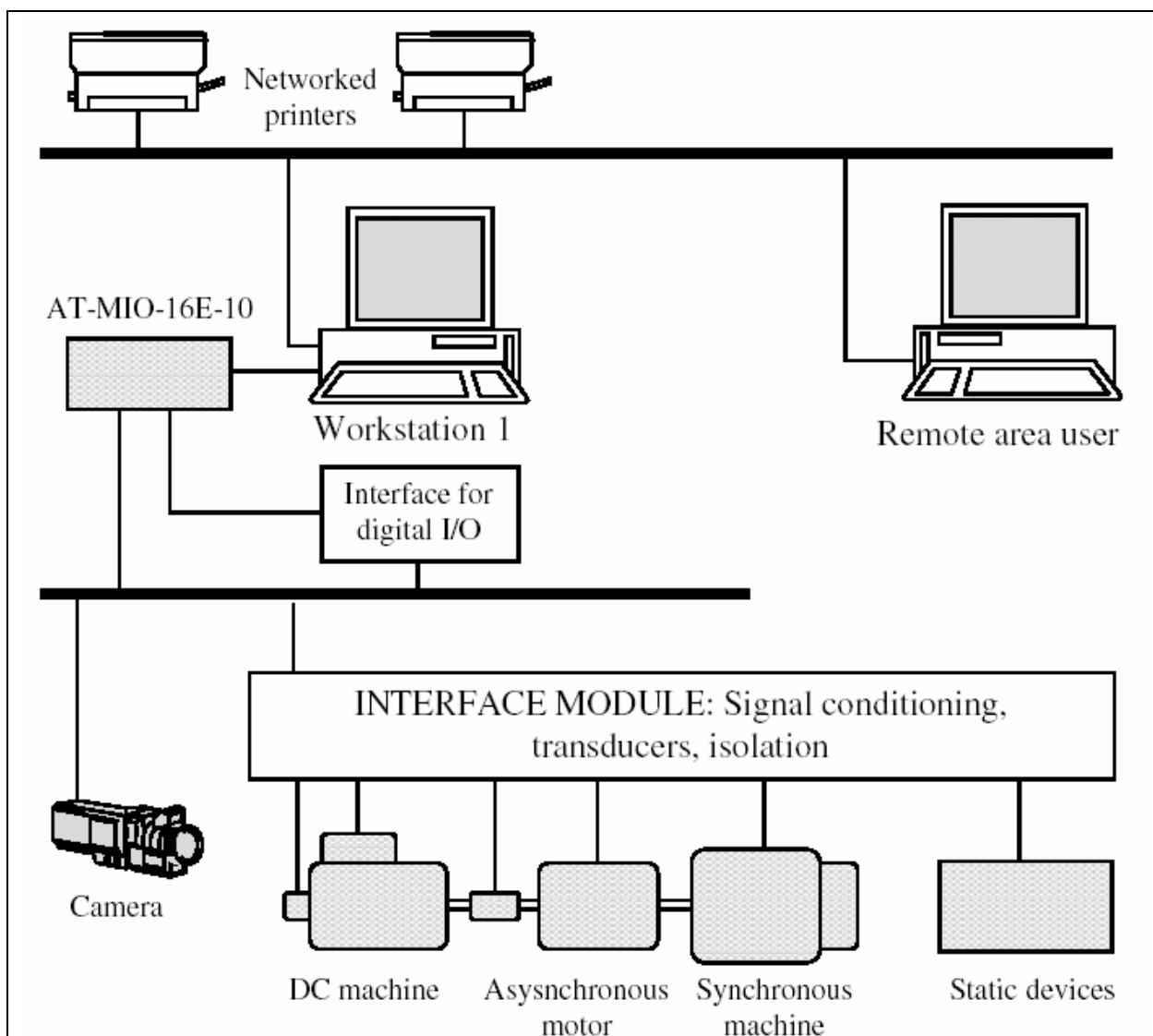


Рисунок А - 2. Блок-схема автоматизированной лабораторной установки

Блок-схема автоматизированной лабораторной установки для проведения экспериментальных исследований в реальном времени приведена на Рисунке А-2. Лабораторное оборудование включает: сеть из 10 персональных компьютеров на базе процессора Pentium, работающих под управлением операционной системы Windows NT со средой графического программирования LabVIEW 5.0 FDS, 2 сетевых лазерных принтера, 10 оригинальных датчиков вращающего момента электрических машин (предел измерения - до 50 Н·м), 120 оригинальных датчиков тока (пределы 50А и 100 А, от постоянного тока до 100 кГц), 120 оригинальных изолирующих усилителей напряжения (до 1000 В среднеквадратического напряжения, частотой до 50 кГц), 10 скамей и распределительных щитов, 10 статических стартовых цепей и переходников для асинхронных двигателей с контактными кольцами, электропровода.

Каждое рабочее место в лаборатории оборудовано одинаковыми электрическими машинами вращения средней мощности, механически соединенными на общий ведущий вал: мотор постоянного тока, асинхронный двигатель с контактными кольцами и синхронный двигатель. Характеристики этих моторов приведены в Таблице А-1. Измерения скорости вала проводятся с помощью тахогенератора переменного тока, также подключенного к общему валу.

Неподвижные исследуемые устройства смонтированы на скамьях, к которым подведена электрическая проводка, там же расположены оригинальные датчики напряжения и тока. Набор вспомогательной аппаратуры может сильно меняться по потребности и включать, например, схемы аварийного обесточивания. В частности, в нашей лаборатории применяется видеокамера *Logitech* для визуальной поддержки задач удаленного эксперимента.

Таблица А-1. Характеристики электрических машин, использованных в лаборатории

Мотор постоянного тока	Асинхронный двигатель с контактными кольцами	Синхронный двигатель
5.5 кВт	5.5 кВт	8 кВт
1250/1500 об/мин	1410 об/мин	1500 об/мин
220 В	415 В: три фазы, соединение «звезда»	415 В
27.6 А	11 А	10.5 А
поле параллельной обмотки	$\cos \varphi : 0.85$	
210 В	50 Гц	50 Гц
0.647 А	Ротор: 170 В, «звезда», 22 А	

Проведение каждого лабораторного эксперимента приводит к необходимости измерения сигналов в определенных каналах. В нашей системе максимальное количество одновременно измеряемых в реальном времени параметров равно восьми. Используя 8 каналов, можно провести весьма сложный эксперимент, в котором будут измеряться три фазных напряжения, три линейных тока, скорость вращения и вращающий момент.

На каждой рабочей станции установлена многофункциональная плата аналогового и цифрового ввода/вывода AT-MIO-16E-10 компании National Instruments. Плата включает:

- 8 дифференциальных аналоговых входа (АЦП) с 12-разрядным разрешением, скорость ввода 100 кГц,
- 2 аналоговых выхода (ЦАП) с 12-разрядным разрешением и
- 8 цифровых линий ввода/вывода ТТЛ.

Прим. перев. Рекомендуемая автором плата АТ-МЮ-16Е-10, работающая на шине ISA, в настоящее время является устаревшей. Хорошей альтернативой является современная PCI-плата National Instruments PCI-6024Е, к тому же, более дешевая и обладающая лучшими техническими характеристиками.

Как упоминалось ранее, каждая рабочая станция оборудована набором датчиков, которые используются для измерения высоких напряжений и токов при довольно высоких частотах переключения. Для этих систем весьма актуальными являются также задачи подавления шумов и обеспечения электробезопасности операторов. Поэтому оборудование рабочих станций специально разработано для достижения полной изоляции. Во-первых, высокое напряжения ослабляется при помощи делителей, выходное напряжение которых пропускается через изолирующие усилители. Каждый такой усилитель питается от отдельного преобразователя постоянного тока. Для обеспечения дополнительной безопасности группы из трех изолирующих усилителей снабжены отдельными «плавающими» источниками питания. Преобразователи напряжения имеют также специальную защиту от потенциально возможного в подобных цепях дугового разряда.

При создании буферной цепи, а также с целью наиболее полного использования динамического диапазона АЦП плат, мы включили в установку дополнительные усилители для увеличения амплитуды сигнала с датчиков Холла и изолирующих усилителей. Для экранирования от различного рода помех сигналы передавались по коаксиальным кабелям, снабженным на концах разъёмными соединениями типа «байонет» (англ.- BNC, рос. аналог – СР50 – *прим. перев.*). Все используемые в лаборатории датчики – оригинальные, изготовленные нами самостоятельно. Принципиальные схемы датчиков (напряжения, тока и вращающего момента) и фотографии их внешнего вида приведены на Рисунке А-3.

Следует отметить, что самостоятельное изготовление датчиков резко удешевило установку. По нашим подсчетам, затраты на изготовление составили всего лишь около 10% от общей стоимости их промышленных эквивалентов.

24 этих датчика (12 токовых и 12 - напряжения) размещены в коробке, укрепленной на распределительном щите, и подключены к нему. Главный распределительный щит и коробка с датчиками показаны на Рисунке А-4.

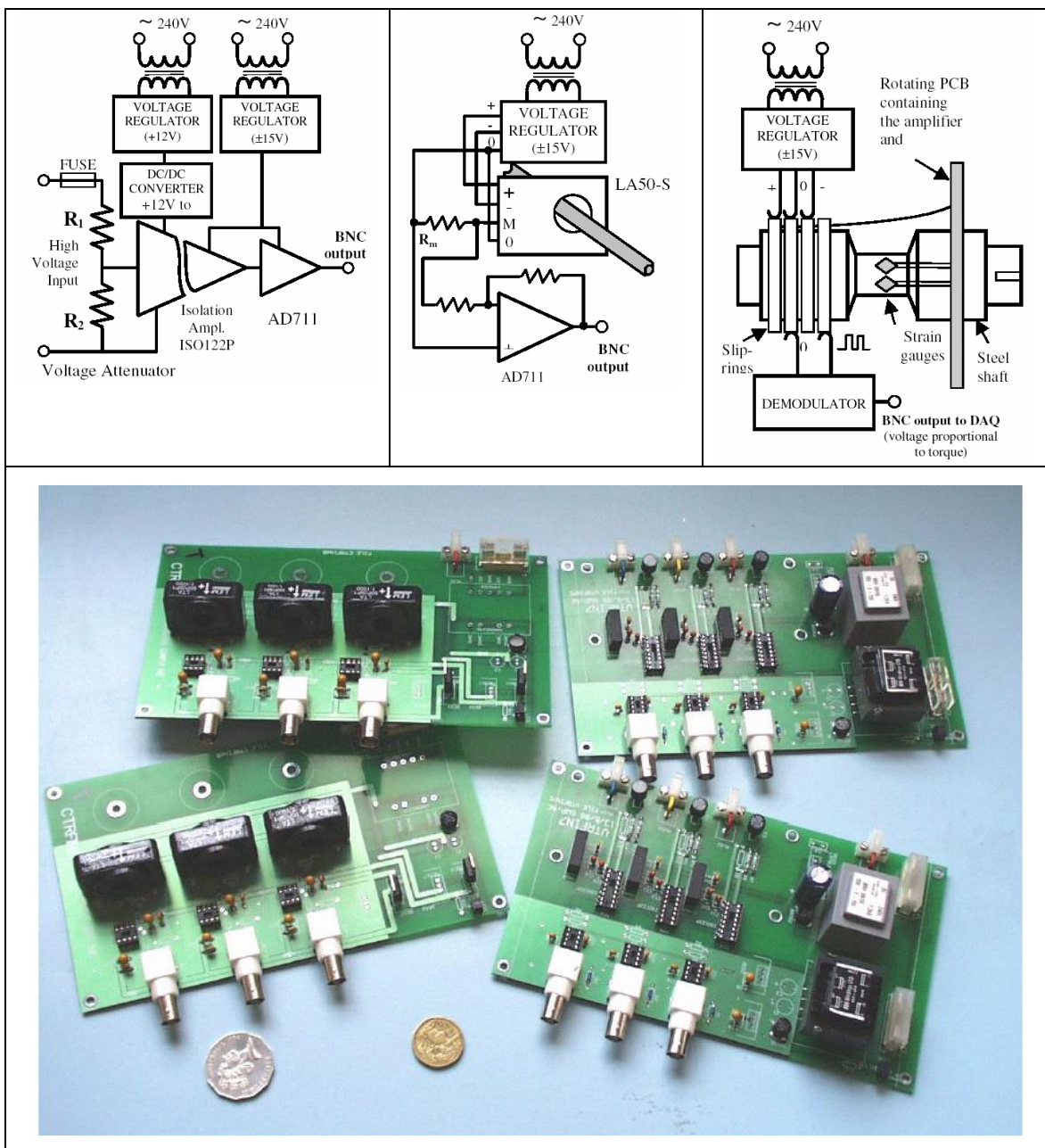


Рисунок А - 3. Принципиальные схемы самодельных лабораторных датчиков и фотографии внешнего вида (показаны датчики напряжения и тока, по 3 датчика на каждой плате).

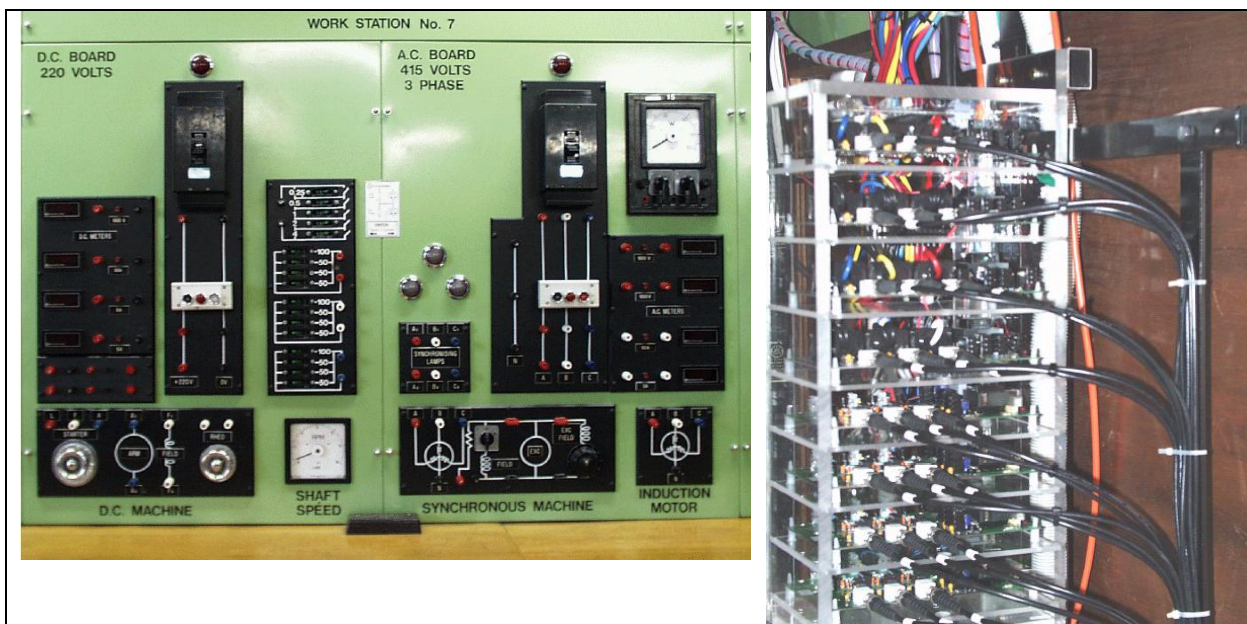


Рисунок А - 4. Главный распределительный щит и коробка с датчиками.

Каждой машине сопоставлена распределительная панель с набором измерителей постоянного и переменного тока, аналоговым индикатором скорости и аналоговым ваттметром. В новой автоматизированной системе эти приборы являются индикаторами и выступают как дополнительное средство проверки результатов, полученных с помощью LabVIEW. Силовые электронные преобразователи, однофазные трансформаторы и другие электромеханические устройства размещены отдельно на тестовой скамье, соединенной с распределительным щитом каждой из установок.

Четыре основных этапа модификации установок были проведены в нашей лаборатории. *Во-первых*, разработано подключение интерфейса тахогенератора переменного тока (Рисунок А-5а); *во-вторых*, распределительные щиты были доработаны, чтобы вместить дополнительные разъемы для подключения сигналов с датчиков, силовые переключатели и разъемы для подключения персональных компьютеров (Рисунок А-5б); *в-третьих*, изготовлены новые соединительные коробки для простого и удобного подсоединения сигнальных кабелей к линиям аналогового ввода/вывода многофункциональной платы и, *в-четвертых*, организованы рабочие места с персональными компьютерами (Рисунки А-5в и А-5г).

Как отмечалось ранее, датчики подключены к главному распределительному щиту постоянно и их выходные сигналы снимаются с «байонетных» разъемов на коробке, показанной на Рисунке А-5г. Пользователь (студент) может подключить любой измеряемый сигнал к аналоговым входам платы через коаксиальный кабель, как видно на рисунке.

В Таблице А-2 приведены данные всех вспомогательных устройств, используемых в лаборатории.

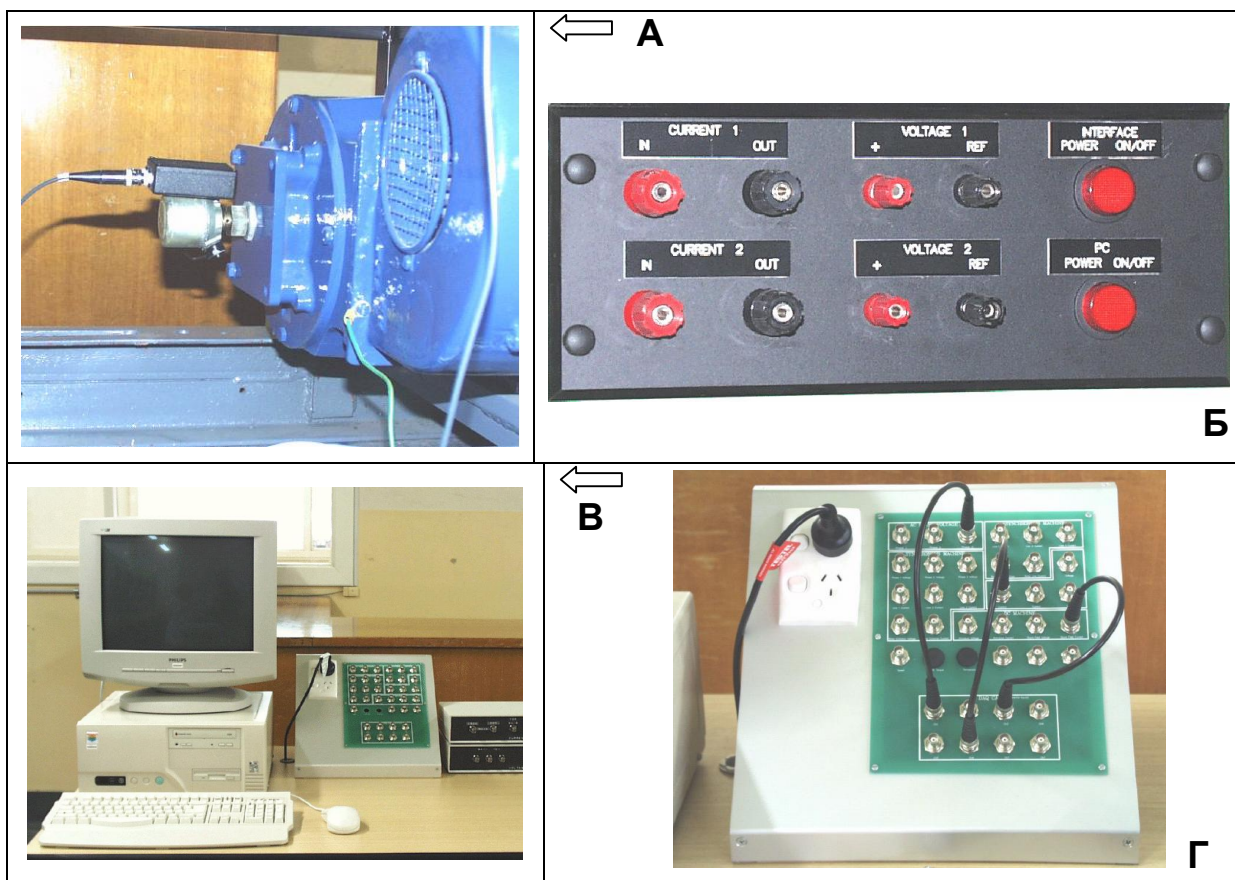


Рисунок А - 5. Основные этапы модификации лаборатории.

Таблица А-2. Технические данные на вспомогательные устройства, используемые в лаборатории

Устройство	Характеристики
Трехфазный источник питания:	415 В, 50 Гц, 50А
Источник питания постоянного тока:	200 В, 40 А
Однофазные автотрансформаторы (как источники изменяемого напряжения)	240 В, 8А, 50 Гц
Трехфазные автотрансформаторы:	вход 415 В , 15А; выход 0-470 В
Персональные компьютеры	Pentium-166 или выше, 32 Мб ОЗУ, >1 Гб на жестком диске
Многофункциональная плата аналогового и цифрового ввода/вывода АТ-МІО-16Е-10 компании <i>National Instruments</i> :	8 дифференциальных аналоговых входа (АЦП) с 12-разрядным разрешением, скорость ввода 100 кГц, 2 аналоговых выхода (ЦАП) с 12-разрядным разрешением и 8 цифровых линий ввода/вывода ТТЛ.
Реостаты	50 Ом, 5 А
Конденсаторы	4 мкФ, 1000 В
4 комплекта переносных специальных электрических машин, каждый из которых содержит: трехфазный безщеточный мотор с постоянным магнитом, мотор постоянного тока, шаговый двигатель, трехфазный асинхронный мотор.	Питание от источника напряжения 24 В, 5А; управление через Analog Devices DSP (ADMC401).
Контроллер мотора постоянного тока	Siemens, Simoreg, 260 (150) В, 22 А
Контроллер мотора переменного тока	ABB, SAMIGS, 3 фазы, 380/415 В, 15А, 0-120 Гц
Магнитопереключаемый привод электромотора	Qulton, 380/415 В, 50/60 Гц, 4 кВт, 9А