МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ»

Л.Н. РАССУДОВ,
А.А. КОРУНЕЦ,
К.Г. ФЕДОРОВА

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

Учебное пособие
по курсу
«Электрический привод»

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

Текстовое электронное издание

Москва
Издательство МЭИ
2022

УДК 621.34
ББК 31.291
Р244

Утверждено учебным управлением НИУ «МЭИ»
в качестве учебного издания

Подготовлено на кафедре автоматизированного электропривода

Рецензенты: докт. техн. наук, проф. Анучин А.С.
кан. техн. наук, доц. Лукичев Д.В.

Авторы: Л.Н. Рассудов, А.А. Корунец, К.Г. Федорова

Р244 Лабораторный практикум по исследованию электроприводов. Учеб. пособие для вузов / Л.Н. Рассудов, А.А. Корунец, К.Г. Федорова – М.: Издательство МЭИ, 2022. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

ISBN

Изложены базовые сведения, необходимые для подготовки и проведения исследования электроприводов с использованием нагрузочных стендов. Приведен пример заданий лабораторного практикума, включающий исследование электроприводов с машинами постоянного тока независимого возбуждения и с асинхронными машинами, без привязки к конкретным лабораторным стендам. Приведен пример индивидуального задания на виртуальном лабораторном стенде, разработанном на кафедре автоматизированного электропривода НИУ «МЭИ».

Для студентов технических ВУЗов.

УДК 621.34
ББК 31.291

© Издательство НИУ МЭИ, 2022
© Авторы, 2022

ISBN

Предисловие

Задача исследования электропривода часто возникает в практике инженеров соответствующих направлений – как для первичного определения его свойств, так и для подтверждения свойств, заявленных изготовителем. Пособие призвано помочь обучающимся на основе простых примеров виртуозно овладеть базовыми вопросами, относящимися к исследованию электроприводов с использованием нагрузочных стендов.

В первой главе рассматривается назначение, состав электропривода, особенности компетенции специалистов в сфере электропривода в сравнении с другими специальностями. Вторая глава посвящена вопросам исследования электроприводов: зачем их исследовать, какие данные нужно получить, почему для этого удобно использовать нагрузочные стенды, что нужно учитывать при использовании нагрузочных стендов. В третей главе показаны особенности подготовки к исследованию электроприводов, на основании паспортных данные компонентов электропривода. В четвертой главе приведены некоторые важные термины и определения. Пятая глава посвящена возможной программе лабораторных работ по исследованию электроприводов на примере электроприводов с машиной постоянного тока независимого возбуждения, с асинхронной машиной с фазным ротором, а также виртуального общедоступного лабораторного стенда с машиной постоянного тока, разработанного в НИУ «МЭИ». Программа работ составлена таким образом, что может быть выполнена на любых стендах, удовлетворяющих приведенным требованиям. В Приложении А приведен пример оформления отчета по лабораторной работе.

Авторы.

Оглавление

Предисловие ... 3

1 Электропривод. Общие теоретические сведения ... 5

1.1 Что такое электропривод? ... 5

1.2 Состав электропривода ... 6

1.3 Компетенции специалиста в сфере электрического привода ... 7

2 Исследование электроприводов ... 9

2.1 Использование нагрузочных стендов для исследования электроприводов ... 11

2.2 Принципы получения статических характеристик ... 14

2.3 Учет влияния силы трения ... 16

3 Построение естественных характеристик электрического привода по паспортным данным ... 18

3.1 Построение естественных статических характеристик электропривода с асинхронной машиной ... 19

3.2 Построение естественных характеристик с машиной постоянного тока независимого возбуждения ... 23

4 Некоторые термины и определения ... 25

5 Примеры заданий лабораторных работ ... 27

Лабораторная работа № 1.1. Определение момента сил трения и момента инерции стенда исследования электропривода с машиной постоянного тока независимого возбуждения ... 29

Лабораторная работа № 1.2. Исследование электропривода с машиной постоянного тока независимого возбуждения ... 31

Лабораторная работа № 1.3. Переходные процессы электропривода с машиной постоянного тока независимого возбуждения ... 33

Лабораторная работа № 1.4. Переходные процессы электропривода с машиной постоянного тока независимого возбуждения при питании от управляемого источника напряжения ... 35

Лабораторная работа № 2.1. Определение момента сил трения и момента инерции стенда исследования электропривода с асинхронной машиной с фазным ротором ... 37

Лабораторная работа № 2.2. Исследование электропривода с асинхронной машиной с фазным ротором ... 39

Лабораторная работа № 2.3. Исследование электропривода с асинхронной машиной с фазным ротором при питании от преобразователя частоты ... 41

Лабораторная работа № 3. Исследование электропривода с машиной постоянного тока независимого возбуждения на виртуальном стенде ... 43

Приложение А. Примерный образец оформления Отчета ... 45

1 Электропривод. Общие теоретические сведения

1.1 Что такое электропривод?

Электропривод – управляемая система, предназначенная для преобразования электрической энергии в механическую и обратно. Он сопряжён с системой электроснабжения, технологической установкой (рабочей машиной), а также информационной системой верхнего уровня (рис. 1). Назначение электропривода – управляемое электромеханическое преобразование энергии.

Задачей электропривода (ЭП), как правило, является обеспечение механического движения в соответствии с требованиями технологического процесса. В процессе работы электропривод может как потреблять, так и отдавать электрическую энергию в электрическую сеть (переменного или постоянного тока, аккумуляторная батарея, суперконденсатор или др.). Кроме непосредственно осуществления преобразования энергии необходимо управлять этим процессом на основании заданных извне требований и команд, поступающих от панели оператора, по промышленным сетям, интернет вещей, а также данных, собираемых при помощи датчиков с компонентов системы, техпроцесса и электрической сети.

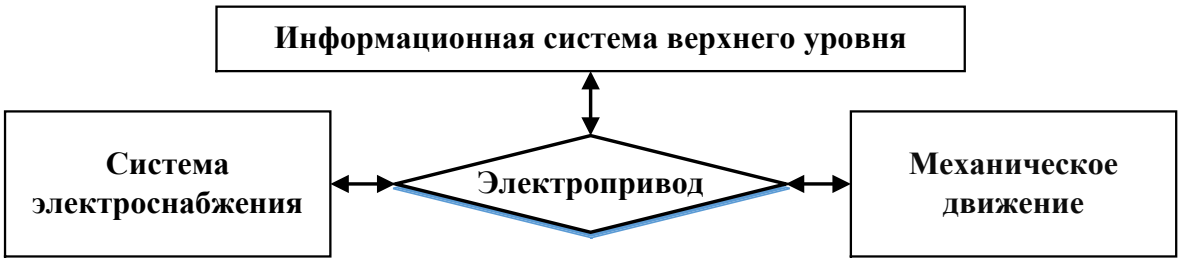


Рис. 1. Управляемое электромеханическое преобразование энергии

1.2 Состав электропривода

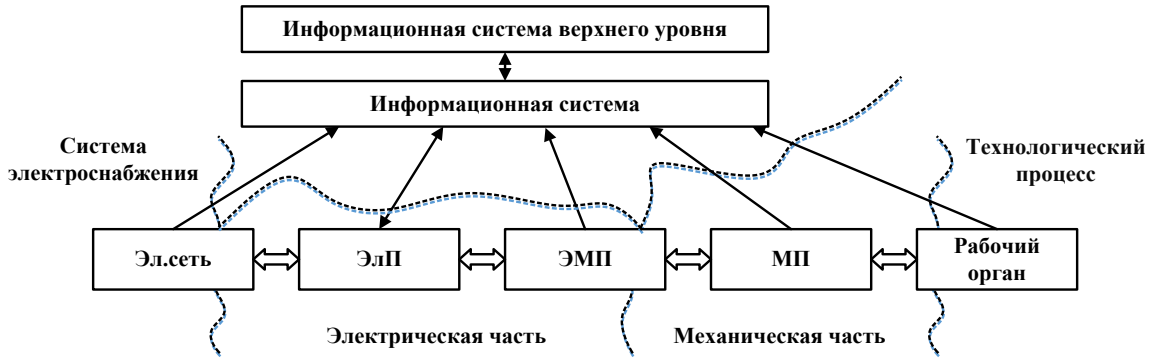


Рис. 2. Общая структура электропривода. АСУ – автоматическая система управления; ЭлП – электрический преобразователь; ЭМП – электромеханический преобразователь; МП - механический преобразователь.

Общая структура электропривода представлена на рис. 2. В нем есть два канала: силовой и информационный. Центральным звеном силового канала электропривода является электромеханический преобразователь (ЭМП) – электрическая машина, связывающая электромеханическую и механическую части электропривода. При её работе в двигательном режиме обеспечивается преобразование электрической энергии в механическую, а в генераторном – наоборот из механической в электрическую. Для согласования электрических параметров ЭМП и сети часто используется электрический преобразователь (ЭлП) – полупроводниковые преобразователи, релейные элементы или др., а для согласования скорости и типа движения рабочего органа может использоваться механический преобразователь (МП) – редуктор, винт-гайка, кривошипно-шатунный механизм и др.

За счет информационной подсистема осуществляется управление процессом преобразования энергии электроприводом. Управление – это поддержание заданного или заданных величин на требуемом уровне. На основании данных о требуемых значениях координат привода (позиции,

скорости, момента, напряжений, токов и др.) и их измеренных (напрямую или косвенно) значений формируется управляющее воздействие. Значительную часть задач управления в сфере электропривода можно свести к определению какое напряжение или ток необходимо выдать ЭлП на контакты ЭМП для обеспечения требуемого режима преобразования энергии.

1.3 Компетенции специалиста в сфере электрического привода

Специалист в сфере электропривода должен обладать компетенцией в широком круге областей: электрические сети, полупроводниковая техника, электрические машины, механика, конденсаторная и кабельная техника, АСУ ТП, измерительная техника, информационные технологии и др. Кроме того необходимо понимать особенности конкретной решаемой технологической задачи. При значительном количестве смежных специальностей и областей, отличие специалиста в сфере электропривода состоит в рассмотрении каждого из узлов как компонента системы. Например, электроприводчик должен определить какими свойствами должна обладать электрическая машина (с учетом специфики как остальных компонентов электропривода, так и технологического процесса) и сформулировать соответствующие требуемые свойства. А специалист в электрических машинах должен в большей степени разбираться в том, как спроектировать и наладить производство машины с требуемыми свойствами. Хотя разграничение задач смежных специалистов провести однозначно нельзя, но при прочих равных электроприводчика интересует свойства компонентов и возможности их интеграции в систему. В отличие от профильных специалистов, в его задачах обычно не стоит самому оптимально спроектировать эти компоненты.

Рис. 3. Сфера интересов специалиста по электроприводу

Создание электропривода можно рассматривать как собирание конструктора – системы из узлов, разработанных узкопрофильными специалистами или в сотрудничестве с ними. Специалист в электроприводе должен обладать квалификацией в широком спектре областей. Квалификацией, достаточной, чтобы уметь в результате общения со всеми профильными специалистами понять специфику и проблемы задачи каждого из них (рис. 3). После этого он должен определить задачи каждого из них – кто и что должен делать, чтобы электрический привод удовлетворил всем требованиям.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение ЭП и приведите примеры реализации.
2. В чем заключается основная функция ЭП?
3. С какими внешними системами взаимодействует ЭП?
4. Какие элементы входят в силовой канал ЭП и какие функции они выполняют?
5. Какие функции выполняет информационная система в ЭП?
6. В чем особенность работы специалиста в области ЭП?

2 Исследование электроприводов

Ключевое при проектировании электропривода – соотнесение его возможностей с тяжелейшими условиями и режимами работы, в которых ему может представиться работать. Определить возможно ли использовать электропривод для решения конкретной технологической задачи невозможно без достоверной информации о его свойствах. Поэтому на разных стадиях проектирования и разработки электрических приводов требуется определить их параметры и характеристики. Пояснить вышесказанное можно на отвлеченном примере, который, впрочем, вполне соответствует рассматриваемому вопросу.

Предположим, перед рестораном стоит задача выбора способа доставки пиццы в любую точку района в течение 30 минут. Возникает идея осуществлять это при помощи велокурьеров. Для выполнения доставки в срок необходимо определить требуемые «свойства» велосипедиста при максимальной загрузке, с учетом возможного ухудшения погоды, необходимости остановок на перекрестках и др., а также рельефа дороги до самых дальних адресов, куда может осуществляться доставка (рис. 4).

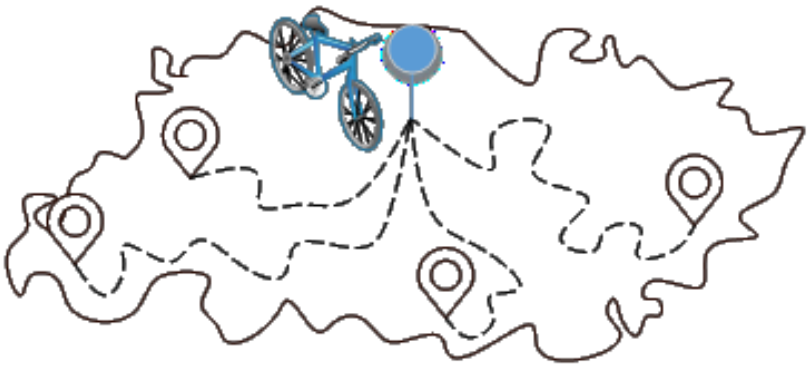


Рис. 4. Выбор способа доставки, как пример выбора ЭП для технологической задачи

Таблица 1 – Условное соответствие параметров велосипедиста и электропривода

Велосипедист	Электропривод
Скорость комфортно поддерживаемая при разных уровнях нагрузки	Механическая характеристика
Нагрузка, выдерживаемая в течение всей смены	Длительный момент
Как сильно он вообще может давить на педали в случае, например, необходимости осуществления кратковременного подъема в гору.	Пиковый момент
Какой расход пищи предполагается при рассматриваемом режиме работы.	Электромеханическая характеристика

В таблице 1 приведены некоторые «параметры» велосипедиста и условное сопоставления со свойствами электропривода. Для того, чтобы понять, может ли конкретный велосипедист осуществить доставку вовремя, необходимо его исследовать, т.е. провести тесты на специальном нагрузочном стенде – велостанке. В том случае, если полученные экспериментально «параметры» конкретного велосипедиста превысят требуемые, то задача технически может быть решена. После необходимо оценить экономическую составляющую предлагаемого решения, в том числе в сравнении с другими (самовывоз, доставка курьерами на электроскутерах, автомобилях, квадрокоптерами, роботами и пр.). Окончательное решение принимается не только на основании технико-экономических показателей, но и с учетом экологических, эстетических и даже социальных и политических факторов.

В данном пособии рассматривается экспериментальное определение (или подтверждение) свойств электропривода. Информация о свойствах

нужна для последующей оценки возможности выполнения требуемой технологической задачи – с учётом наиболее сложного из возможных циклов перемещений и при наихудших возможных условиях окружающей среды.

Как и в рассмотренном выше примере, для исследования электроприводов используются нагрузочные стенды. На них можно определить или проверить свойства оборудования без установки его на объекте.

2.1 Использование нагрузочных стендов для исследования электроприводов

Один из эффективных способов получения информации о свойствах электропривода – использование специализированных нагрузочных стендов, позволяющих имитировать работу электропривода в условиях, приближенных к реальным. Один из наиболее интересных подходов создания таких стендов – использование цифровых двойников. При этом условия работы исследуемого оборудования максимально приближены к реальным за счет создания условий работы на основании информации (базы данных), полученной с реального объекта. Например, для велосипедиста при помощи велотренажера можно создать имитацию условий, соответствующих соревновательной трассе, – за счет изменения нагрузки в соответствии с профилем трассы. Соответствие внешних условий может быть при необходимости создано в климатической камере.

Во многих случаях концепция цифрового двойника избыточна для получения общей первичной информации о свойствах электропривода. Поэтому на практике часто используются более простые с точки зрения информационных технологий нагрузочные стенды (рис. 5). Они позволяют при помощи нагрузочного устройства задавать разные уровни статического

момента нагрузки $M_{нагрузки}$ на исследуемый электрический привод (ИЭП) и определять реакцию ИЭП на эту нагрузку: как зависит поддерживаемая угловая частота ω от развиваемого момента ИЭП $M_{ИЭП}$ (механическая характеристика), какой ток $I_{сети}$ при этой частоте потребляет или отдает электрическая машина (электромеханическая характеристика). Кроме того, проверяются тепловые режимы работы электропривода (подтверждаются длительный и пиковый режимы работы) и др.

Здесь и далее рассматривается одномассовая механическая система. Механические связи в системе жесткие (упругости и люфты отсутствуют).

Для исследования электроприводов вращательного типа, часто используется стенд, в котором установлен нагрузочный электропривод (НЭП) с известными характеристиками. Как правило задача НЭП заключается в формировании задаваемого момента нагрузки. Электропривод, подлежащий исследованию (ИЭП) устанавливается в стенд и вал его электрической машины через муфту подсоединяется к валу электрической машины НЭП. Конструкция из двух электрических машин с соединенными валами часто называется двухмашинным агрегатом или спаркой.

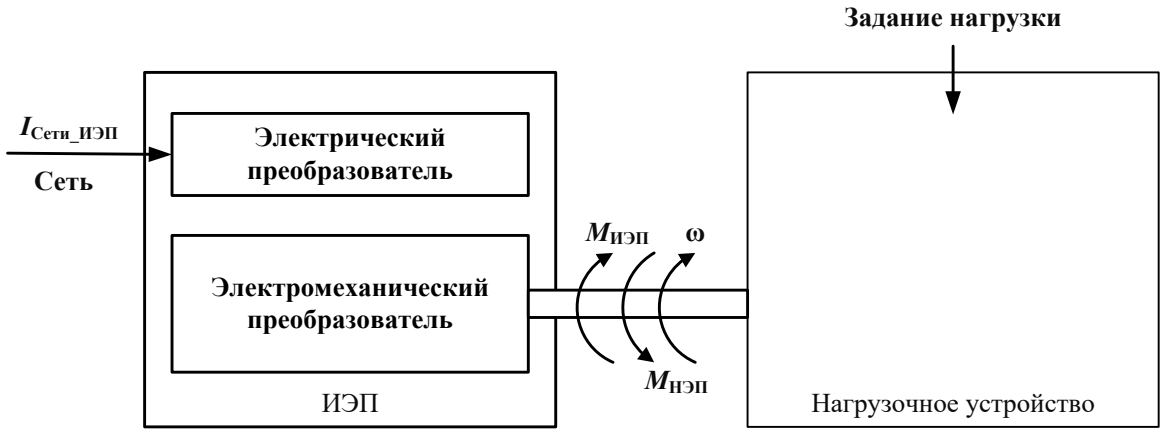


Рис. 5. Использование нагрузочных стендов для исследования ЭП

Предполагается, что параметры НЭП известны, и требуемый момент нагрузки он воспроизводит с достаточной для проводимых исследований точностью. ИЭП же является «черным ящиком», про который известны лишь возможные диапазоны его электромеханических параметров, необходимые для осуществления его корректного и безопасного подключения к установке.

Задачей исследования электропривода в такой системе является определение свойств электропривода при имитации требуемых типов нагрузки при помощи НЭП.

При использовании нагрузочных стендов важно учитывать, что кроме момента $M_{НЭП}$ на вал действует момент сил трения $M_{ТР}$, который включает в себя трение как в ИЭП, так и в НЭП, т.е. всего стенда (рис. 6), и должен учитываться при обработке экспериментальных результатов. В $M_{ТР}$ в зависимости от типа электрической машины может входить трение в подшипниках, скользящих контактах, вентиляторная нагрузка или др.

Кроме того, при необходимости исследования динамических режимов необходима информация о суммарном моменте инерции системы J_{Σ}, который состоит из момента инерции ИЭП, НЭП, а также моментов инерции муфт, датчиков и других элементов, которые находятся на валу.

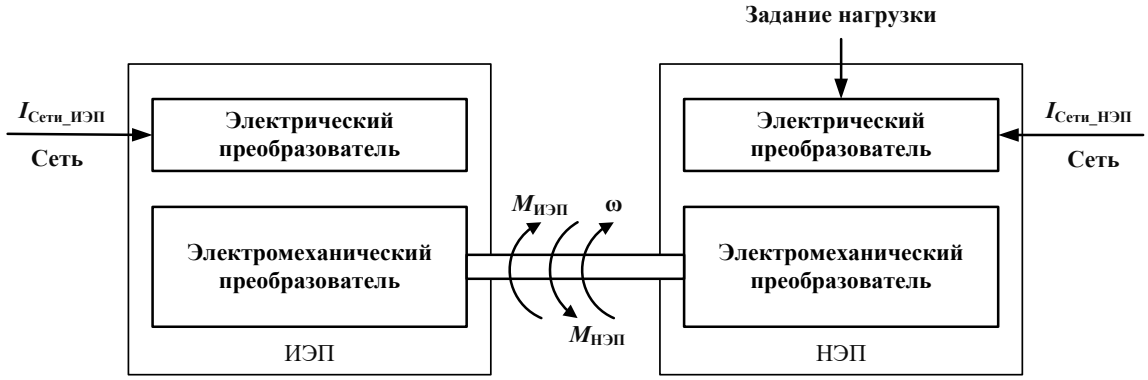


Рис. 6. Использование спарки для исследования свойств ЭП

Поэтому перед началом исследования непосредственно ИЭП, необходимо оценить свойства, присущие самому стенду. Этому посвящены примеры заданий на лабораторные работы 1.1 и 2.1. В частности – идентифицировать его суммарную инерционность J_{Σ} и трение $M_{ТР}$, которое зависит от скорости вращения вала. В некоторых случаях нельзя пренебречь и изменением свойств смазки при изменении температуры или в ходе работы. Пример отчета о выполнении лабораторной работы по определению суммарного момента инерции J_{Σ} и трения $M_{ТР}$ стенда приведен в Приложении А.

2.2 Принципы получения статических характеристик

Для получения механических характеристик исследуемого объекта задается требуемый момент НЭП $M_{НЭП}$. При положительном $M_{НЭП}$ НЭП препятствует вращению системы в выбранном положительном направлении, при отрицательном – способствует (рис 6).

Замечание: *положительное направление момента исследуемого объекта и моментов нагрузок выбираются встречными. В этом случае выражение II закона Ньютона для системы вращательного движения*

$$M_{ИЭП}-M_{нагрузки}=J_{\Sigma}d\omega/dt, \quad (1)$$

где J_{Σ} *– суммарный момент инерции электромеханического преобразователя и нагрузочного устройства*, ω *– угловая частота вращения вала,* t *– время,* d *– оператор дифференцирования. В статическом режиме (при установившейся скорости* $\omega=const$*) переписывается в виде*

$$M_{ИЭП}=M_{нагрузки}, \quad (2)$$

Равенство и разнонаправленность моментов в установившихся режимах позволяет удобно производить графический анализ механических характеристик ИЭП.

Режим работы ИЭП электропривода при $M_{НЭП}$=0 называется режимом «неидеального» холостого хода. При идеальном холостом ходе $M_{ИЭП}$=0.

Получение механических характеристик сводится к измерению установившейся скорости вращения системы в зависимости от заданного $M_{НЭП}$. Для получения электромеханических характеристик необходимо дополнительно измерять значение тока, потребляемого ИЭП из сети. Рис. 7 качественно иллюстрирует этот процесс.

Перед проведением исследований необходимо заранее определить ожидаемые свойства ИЭП и диапазон изменения нагрузки. Например, некоторые электроприводы могут быть не предназначены для работы с отрицательной или даже нулевой нагрузкой, в некоторых случаях могут возникнуть проблемы с устойчивостью системы. Всё это может привести, в некоторых случаях, к неконтролируемому разгону. И хотя в лабораториях, как правило, защита от таких явлений присутствует, в реальной жизни ее может не быть...

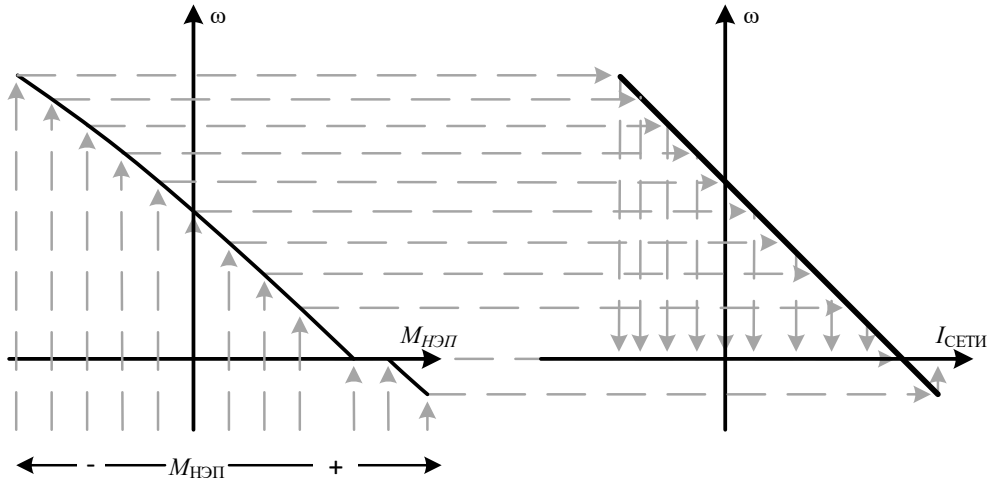


Рис. 7. Экспериментальное определение механических и электромеханических характеристик за счет задания постоянного $M_{НЭП}$ и измерения соответствующих величин – скорости ω, поддерживаемой ИЭП и потребляемого им тока $I_{сети}$

2.3 Учет влияния силы трения

Статические механические характеристики $\omega(M_{НЭП})$ (рис. 7), рассмотренные выше, не являются характеристиками ИЭП $\omega(M_{ИЭП})$, ведь

$$M_{ИЭП} = M_{НЭП} + M_{ТР}. \quad (3)$$

Типичная зависимость $M_{ТР}$ от ω представлена на рис. 8. Показано, что для получения $\omega(M_{ИЭП})$ к значению $M_{НЭП}$ прибавляется соответствующее этой скорости вращения значение $M_{ТР}$. Полученные характеристики ИЭП оказались в данном случае прямыми линиями. Здесь это сделано намеренно – лишь для наглядности. При анализе результатов рис. 8 можно сделать следующие выводы:

- для достижения скорости идеального холостого хода необходимо компенсировать $M_{ТР}$ соответствующим отрицательным $M_{НЭП}$. Часто в этом режиме $|I_{сети}|$ минимален;

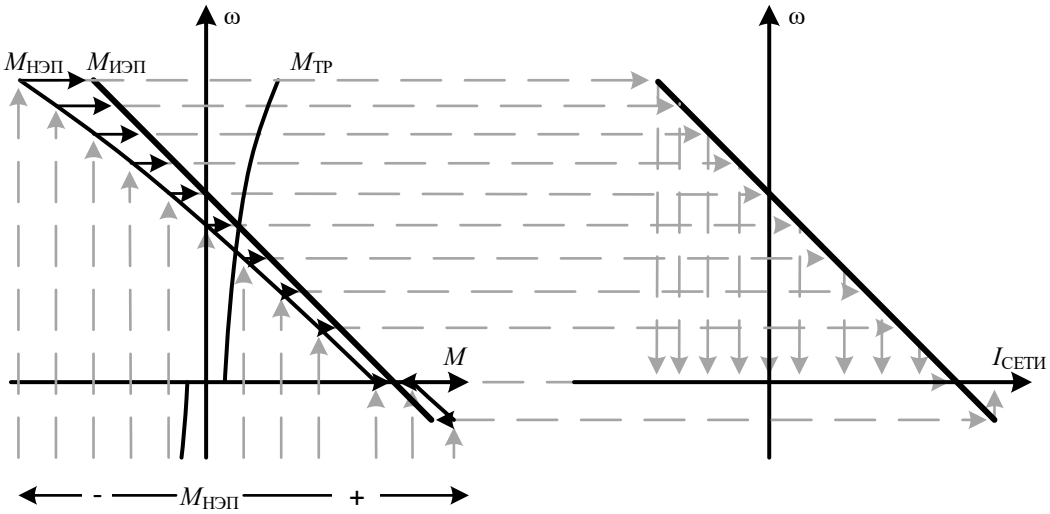


Рис. 8. Учет влияния силы трения при экспериментальном определении механических $\omega(M_{ИЭП})$ и электромеханических характеристик $\omega(I_{СЕТИ})$ за счет задания постоянного $M_{НЭП}$ и измерения соответствующих величин – скорости ω, поддерживаемой ИЭП и потребляемого им тока $I_{сети}$

- при нулевой скорости вращение начинается в том случае, если $|M_{ИЭП}-M_{НЭП}|$ превышает значение момент трения трогания;
- для получения механической характеристики ИЭП необходимо произвести предварительную идентификацию механической характеристики силы трения испытательного стенда. Пример приведен в Приложении А.

Контрольные вопросы

1. Для чего необходимо проводить исследования ЭП?
2. Укажите основные свойства, представляющие наибольший интерес при исследовании ЭП?
3. В чем специфика создания испытательных стендов на базе цифровых двойников?
4. Укажите состав и принцип действия нагрузочных стендов, которые чаще всего встречаются на практике.
5. Что такое НЭП и в чем его основная функция?
6. Что является основной задачей исследования ЭП при использовании нагрузочных стендов?
7. Запишите в общем виде II закон Ньютона для вращательного движения.
8. С какой целью для нагрузочного стенда необходимо оценить такие параметры, как момент трения и суммарный момент инерции?
9. Зачем необходимо заранее определить ожидаемые свойства исследуемого ЭП? Как это можно сделать?
10. Запишите II закон Ньютона для нагрузочного стенда.
11. Укажите условия для получения статических характеристик исследуемого ЭП.

3 Построение естественных характеристик электрического привода по паспортным данным

Задача исследования ЭП часто возникает на практике при необходимости либо первичного определения его свойств, либо подтверждения заявленных его производителем свойств. При подготовке к выполнению экспериментов по определению механических и электромеханических характеристик с использованием нагрузочного стенда необходимо, во-первых, корректно подобрать нагрузочные и измерительные средства, т.е. собрать нагрузочный стенд, позволяющий получить характеристики ЭП в рассматриваемом диапазоне нагрузок. Во-вторых, по мере выполнения эксперимента необходимо оперативно оценивать соответствие получаемых данных ожидаемому поведению объекта исследования. В этом случае некоторые возможные проблемы могут быть обнаружены уже прямо во время проведения экспериментов и не потребуют дополнительных выездов на объект, как это могло бы быть при анализе результатов «постфактум».

Обе указанные задачи решаются при заблаговременной подготовке к выполнению исследований, определению методов и средств определения свойств объекта. Исследование ЭП не будет эффективным и безопасным без наличия информации об ожидаемых результатах. Эта информация может быть получена на основании технического описания компонентов ЭП.

Как правило производитель оборудования предоставляет сведения о номинальном режиме работы электропривода. Для продолжительного режима это работа на естественной характеристике при длительном моменте нагрузки. Как правило, эту точку всегда можно определить на основании паспортных данных. И ее экспериментальное подтверждение является

необходимым условием соответствия свойств оборудования заявленным или предполагаемым. Несоответствие этой и других точек характеристики служат диагностической информацией для локализации проблем при сборке, подключении и наладке электропривода или/и при проектировании и производстве его компонентов. На основании паспортных данных часто можно определить точку идеального холостого хода, а также некоторые другие характерные точки, соответствующие предельным значениям координат электропривода.

Для первичного исследования электропривода часто бывает достаточно проверить соответствие его поведения при нагрузке в диапазоне от холостого хода до номинальной, для чего достаточно построить его механические и электромеханические характеристики по двум точкам. Далее показано, как это можно сделать на основании паспортных данных для электропривода с асинхронной машины с фазным ротором и для электропривода с машиной постоянного тока независимого возбуждения.

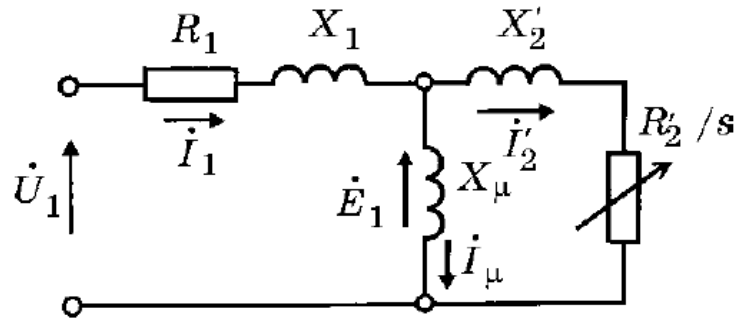
3.1 Построение естественных статических характеристик электропривода с асинхронной машиной

Наибольшее затруднение при исследовании ЭП зачастую вызывает построение ожидаемых характеристик электроприводов на базе асинхронных электрических машин. Дело в том, что математическое описание с учетом нелинейностей, обусловленных конструкцией ЭМП, довольно затруднено. В связи с чем производители часто дают данные о режимах работы в нескольких характерных точках. В соответствии с рассмотренным выше, часто можно ограничиться рассмотрением двух точек – холостого хода и номинальной.

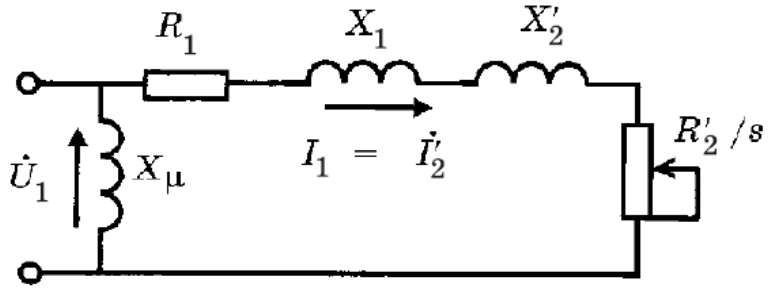
На основании известных параметров Т-образной и Г-образной схем замещения (рис. 9, а и 9, б, соответственно) и известных значениях активных и реактивных сопротивлений асинхронной машины с фазным ротором (таблица 2) можно построить естественные механические и электромеханические характеристики (рис. 10). *Вопросы построения характеристик трудоемки и в настоящем пособии не затрагиваются.* Видно, что характеристики, полученные по двум разным схемам замещения, существенно отличаются в рассматриваемом диапазоне нагрузок – особенно электромеханическая характеристика.

Таблица 2 – Паспортные данные асинхронной машины с фазным ротором типа MTF-011-6.

Номинальная мощность при ПВ 40%, $P_н$	1,4 кВт
Номинальное напряжение статора, $U_{1н}$	380/220 В
Номинальная частота вращения, $n_н$	885 об/мин
Номинальный коэффициент мощности, $\cos\varphi_н$	0,65
Номинальный коэффициент полезного действия, $\eta_н$	61,5%
Номинальный ток фазы статора, $I_{1н}$	5,3 А
Ток холостого хода, $I_{1хх}$	4,9А
Номинальный ток фазы ротора, $I_{2н}$	9,1 А
Коэффициент трансформации, $K_{тр}$	3
Активное сопротивление обмотки статора, R_1	5,78 Ом
Индуктивное сопротивление рассеяния статора, X_1	3,6 Ом
Активное сопротивление обмотки ротора, R_2	0,77 Ом
Индуктивное сопротивление рассеяния ротора, X_2	0,566 Ом
Момент инерции, J	0,057 кг·м^2



а)



б)

Рис. 9. Схемы замещения асинхронной электрической машины:
а – Т-образная, б – Г-образная

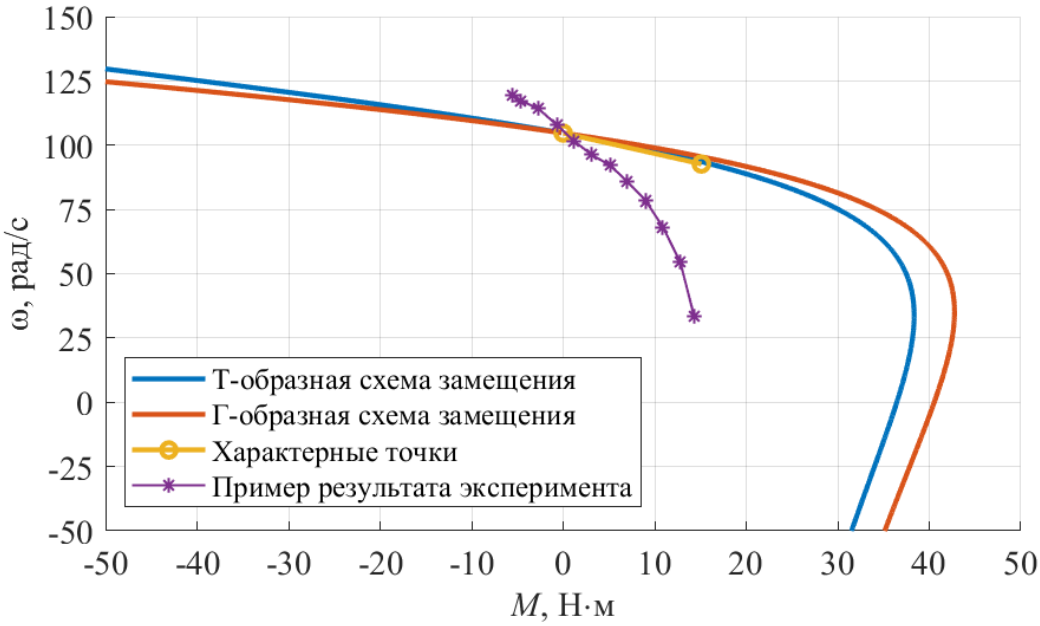
При этом производитель приводит конкретные значения координат в номинальной точке и точке холостого хода. Для первой точки это $\omega_н$, $I_{1н}$, $M_н$, а для второй – $\omega_{хх}$, $I_{1хх}$, $M_{хх}$=0, где

$$\omega_н = \frac{\pi}{30} n_н;\ M_н = \frac{P_н}{\omega_н};\ M_{хх} = 0;\ \omega_{хх} = \frac{\pi}{30} n_{хх},\text{, а } n_{хх} = \frac{60 f_1}{p},$$

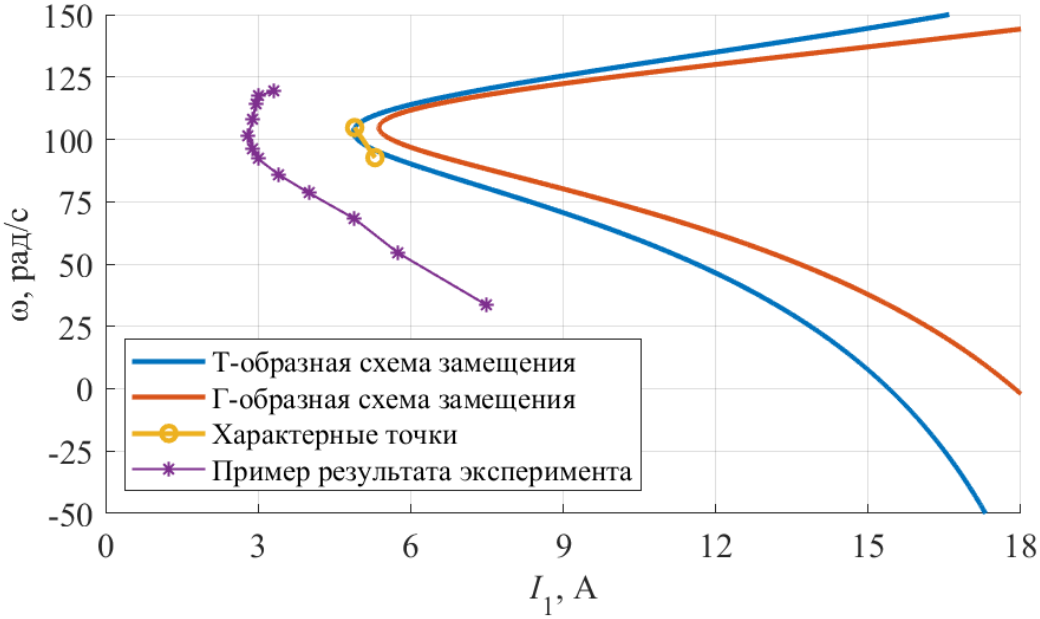
f_1 – частота напряжения статора, p – число пар полюсов. Как правило p является максимальным целым числом, при котором $n_{хх} > n_н$.

Если сопоставить характеристики, полученные по схемам замещения и две характерные точки, можно сделать о том, что точность построения по Т-образной схеме выше, что соответствует теоретическим представлениям. Однако гораздо быстрее и точнее можно построить характеристики именно по характерным точкам. И даже используя только их, уже можно сделать выводы о том, что если характеристики, основанные на экспериментальных

данных, получились как на рис. 10, то что-то не так. Задача исследователя ЭП при использовании нагрузочного стенда состоит в том, чтобы определить, есть ли проблема, и в чем именно она может заключаться.



а)



б)

Рис. 10. Естественные характеристики ЭП с машиной MTF-011-6:
а – механические, б – электромеханические

3.2 Построение естественных характеристик с машиной постоянного тока независимого возбуждения

Как и для электропривода с асинхронной машиной, для оценки свойств электропривода с машиной постоянного тока независимого возбуждения можно ограничиться двумя характерными точками.

В первую очередь для номинального режима работы необходимо определить коэффициент пропорциональности между электромагнитным моментом и током якоря, используя паспортные данные:

$$k\Phi_{\text{ном}} = \frac{U_{\text{я.н}} - I_{\text{я.н}} * (r_{\text{яо}} + r_{\text{дп}})}{\omega_{\text{ном}}}, \quad (4)$$

где $\omega_{\text{ном}} = \frac{\pi}{30} n_{\text{н}}$.

Замечание: $k\Phi_{\text{ном}}$ *рассчитывается из уравнения электромеханической характеристики для номинальной точки, т.к. именно для нее производитель дает наиболее подробную информацию в техническом описании. Например, представленную в таблице 3.* $k\Phi$ *зависит в первую очередь от тока*

Таблица 3 – Паспортные данные машины постоянного тока типа ПБСТ-32.

Номинальная мощность при ПВ 40%, $P_{\text{н}}$	0,8 кВт
Номинальное напряжение обмотки якоря, $U_{\text{ян}}$	110 В
Номинальное напряжение обмотки возбуждения, $U_{\text{ян}}$	110 В
Номинальная частота вращения, $n_{\text{н}}$	1000 об/мин
Номинальный коэффициент полезного действия, $\eta_{\text{н}}$	75%
Номинальный ток якоря, $I_{\text{ян}}$	9 А
Номинальный ток обмотки возбуждения, $I_{\text{ов.н}}$	0,55 А
Максимальный ток якоря, $I_{\text{яmax}}$	36 А
Активное сопротивление якорной обмотки, $r_{\text{яо}}$	0,6 Ом
Активное сопротивление дополнительных полюсов, $r_{\text{дп}}$	0,44 Ом

возбуждения, а во вторую – от явлений нелинейности, в частности реакции якоря.

Угловую частоту вращения идеального холостого хода можно найти по следующей формуле:

$$\omega_{\text{хх}} = \frac{U_{\text{я.н}}}{k\Phi_{\text{ном}}}. \quad (5)$$

При этой скорости ток якоря и электромагнитный момент равны нулю.

При сопоставлении экспериментально полученных характеристик с характеристиками, полученными по двум характерным точкам, можно определить, есть ли проблема, и в чем именно она может заключаться. Задача исследования электропривода состоит не в самом получении характеристик, а в анализе их на соответствие теоретическим представлениям.

Контрольные вопросы

1. Зачем при исследовании ЭП необходимо заранее строить теоретические статические характеристики?
2. Какие точки на статических характеристиках можно определить по паспортным данным электрической машины?
3. Что называют естественными электромеханическими и механическими характеристиками электрической машины?
4. Какую часть статических характеристик можно получить опытным путем и почему?
5. Как определить точку холостого хода для различных типов двигателей?
6. Какими способами может осуществляться регулирование параметров ЭП?

4 Некоторые термины и определения

Электрический привод[1] – Электромеханическая система, состоящая в общем случае из взаимодействующих преобразователей электроэнергии, электромеханических и механических преобразователей, управляющих и информационных устройств и устройств сопряжения с внешними электрическими, механическими, управляющими и информационными системами, предназначенная для приведения в движение исполнительных органов рабочей машины и управления этим движением в целях осуществления технологического процесса.

Механическая характеристика[1] – зависимость, связывающая скорость и момент или силу элемента приведения электропривода.

Электромеханическая характеристика[1] – зависимость, связывающая скорость электродвигателя электропривода и ток якоря.

Различают естественные и искусственные характеристики.

Естественная характеристика[1] – характеристика, соответствующая номинальным параметрам питающего электродвигатель напряжения, основной схеме его включения и отсутствию добавочных электротехнических элементов в цепях электродвигателя.

Искусственная характеристика электродвигателя[1] – характеристика электродвигателя, получаемая при изменении параметров питающего напряжения, при изменении схемы его включения или включения в его цепи добавочных электротехнических элементов.

Регулируемый электропривод[1] – электропривод, обеспечивающий управляемое изменение координат движения исполнительного органа рабочей машины.

Основная функция электропривода[2] – управление его координатами, например, скоростью.

Регулирование скорости электропривода[1] – изменение механических характеристик электрической машины с целью обеспечения требуемой скорости движения.

Длительный момент[1] (сила) – параметр, характеризующий уровень нагрузки, который электропривод может выдерживать в течение длительного времени (без перегрева).

Пиковый момент[1] (сила) – параметр, отражающий уровень нагрузки электропривод может выдержать кратковременно без необратимых изменений или перегрева отдельных компонентов)

Скорость холостого хода электропривода[1] – скорость элемента приведения электропривода при моменте или силе, равным нулю.

[1] – ГОСТ Р 50369-92 Электроприводы. Термины и определения.
[2] – Ильинский Н.Ф. Основы электропривода: Учебное пособие для вузов. – 2–е изд., перераб. и доп. – М. Издательство МЭИ, 2007. – 224 с.

5 Примеры заданий лабораторных работ

В этой главе приведены примеры лабораторных работ по исследованию электроприводов на примере электроприводов с машиной постоянного тока независимого возбуждения (работы 1.1-1.4), с асинхронной машиной с фазным ротором (работы 2.1-2.3), а также виртуального электропривода с машиной постоянного тока (работа 3).

Предлагаемая программа лабораторных работ для унификации не привязана к конкретным стендам. Предполагается, что в каждой образовательной организации могут быть созданы лабораторные стенды соответствующие рассмотренной концепции исследования ЭП. **Обязательное требование** – возможность задания постоянного момента нагрузки на ИЭП при помощи нагрузочного устройства, а также возможность измерения токов и напряжений электрической машины ИЭП. При этом стенды могут быть построены на разном оборудовании, и на них может быть технически возможно полное или частичное выполнение предлагаемой программы работ. В табл. 4 приведены требования для обеспечения возможности выполнения конкретных работ.

Таблица 4. Дополнительные требования к стендам исследования ЭП.

№ ЛР	**Исследование электроприводов с машиной постоянного тока независимого возбуждения**
1.1	Возможность задания нагрузки на уровне силы трения с разрешением порядка 10%. Допустимая частота вращения 1500 об/мин и выше.
1.2	Возможность собрать схему пуска в одну ступень по принципу времени, схему для работы в режиме динамического торможения. Минимальное возможное значение уставки реле времени (выведение пускового сопротивления) при пуске вхолостую не должна превышать

	10 сек. Возможность подключения машины к управляемому источнику напряжения, обеспечивающему плавный пуск. Возможность изменения тока обмотки возбуждения.
1.3	Возможность собрать схему пуска в одну ступень по принципу времени с последующей возможностью запуска динамического торможения в одну ступень по принципу времени. Минимальное возможное значение уставки реле времени (выведение пускового сопротивления) при пуске вхолостую не должна превышать 10 сек. При динамическом торможении с установившейся скорости вращение должно прекращаться менее, чем за 10 секунд.
1.4	Возможность подключения машины к управляемому источнику напряжения, обеспечивающему плавный пуск
	Исследование электроприводов с асинхронной машиной с фазным ротором
2.1	Возможность задания нагрузки на уровне силы трения с разрешением порядка 10%. Допустимая частота вращения 1500 об/мин и выше.
2.2	Возможность подключения дополнительного сопротивления в обмотку ротора, возможность питания статорной обмотки постоянным напряжением или током.
2.3	Возможность подключения машины к преобразователю частоты.
	Виртуальный стенд
3	При использовании веб-версии: ПК с подключением к сети Интернет 1Мб/сек. При использовании установщика: ПК с Windows 10, процессором x64 4 ядра, ОЗУ 4ГБ, 4 ГБ места на жестком диске, монитор 1024x768.

Лабораторная работа № 1.1. Определение момента сил трения и момента инерции стенда исследования электропривода с машиной постоянного тока независимого возбуждения

Подготовка к работе

1. Изучить основы механики электропривода и способы определения момента сопротивления и момента инерции.
2. На основании паспортных данных стенда оценить предполагаемые значения момента сил трения и момента инерции. Рассчитать необходимые для выполнения работы параметры нагрузочного электропривода по паспортным данным.
3. Построить предполагаемые статические электромеханические $\omega(I_{я.ИЭП})$ на одном графике и механические характеристики $\omega(M_{ИЭП})$ – на втором – исследуемого электропривода (для всех допустимых энергетических режимов работы):
   1) Естественные;
   2) реостатные для пуска в 1 ступень.
4. Последовательно для каждого пункта программы работы:
   1) изобразить электрическую схему включения исследуемого и нагрузочного электропривода с пусковыми резисторами, коммутационной аппаратурой, и т.д., а также необходимыми приборами для измерения значений координат электропривода;
   2) продумать и составить таблицу для записи результатов измерений и последующих расчетов;
   3) на электрической схеме включения отметить, какими приборами измеряются физические величины, вносимые в таблицу. Записать формулы расчета физических величин, вносимых в таблицу.

Программа работы

1. Экспериментально определить момент сил сопротивления по моменту трогания.
2. Экспериментально определить момент инерции по времени выбега со скоростей 500, 1000 и 1500 об/мин и на основании результатов, полученных в п 1. Каждый опыт проводится 3-5 раз. Результаты измерений усредняются.
3. Экспериментально определить момент инерции и момент сил сопротивления из опыта разгона-торможения при максимальных

скоростях 500, 1000 и 1500 об/мин. Каждый опыт проводится 3-5 раз. Результаты измерений усредняются.

4. Собрать схему пуска исследуемого электропривода в одну ступень. Убедившись, что уставки реле времени достаточны для невыхода оборудования из строя (для лаборатории, как правило >10сек), осуществить пуск.

Обработка результатов

Обработать результаты измерений, сравнить полученные результаты с паспортными данными и теоретическими представлениями, сделать выводы.

Индивидуальное задание

Выполнить индивидуальное задание 3.1 лабораторной работы № 3.

Вопросы для самопроверки:

1. Объясните, что такое момент трения трогания?
2. Объясните различия в получаемых результатах момента инерции с разных скоростей, как зависит момент инерции от параметров?
3. Какой способ определения момента инерции наиболее точный, почему?
4. Что входит в суммарный момент инерции, определяемый опытным путем?
5. Значение момента сопротивления из какого опыта наиболее подходит для применения в дальнейших опытах, почему?
6. В чем отличие в измерении момента сопротивления в 1 опыте и в 3?
7. Какие допущения используются при определении момента инерции в опыте 2?

Лабораторная работа № 1.2. Исследование электропривода с машиной постоянного тока независимого возбуждения

Подготовка к работе

1. Используя технические данные машины постоянного тока независимого возбуждения исследуемого электропривода, рассчитать значения добавочных сопротивлений в цепи якоря, необходимых для пуска $R_п$, реверса $R_{рев}$ и динамического торможения $R_{дт}$.
2. Рассчитать необходимые для выполнения работы параметры нагрузочного электропривода по паспортным данным.
3. Построить для исследуемого электропривода (для всех допустимых энергетических режимов работы) предполагаемые статические электромеханические характеристики $\omega(I_{я.ИЭП})$ на одном графике и механические характеристики $\omega(M_{ИЭП})$ – на втором:
   1) естественные;
   2) при ослаблении магнитного потока в 1,5 раза;
   3) пуска, реверса и динамического торможения;
   4) при питании обмоток якоря от управляемого источника напряжения при выходном напряжении 100,75,25 и 50% номинального напряжения якоря $U_{я.ИЭП.н.}$.
4. Последовательно для каждого пункта программы работы:
   1) изобразить электрическую схему включения исследуемого и нагрузочного электропривода с пусковыми резисторами, коммутационной аппаратурой, и т.д., а также необходимыми приборами для измерения значений координат электропривода.
   2) продумать и составить таблицу для записи результатов измерений и последующих расчетов.
   3) на электрической схеме включения отметить, какими приборами измеряются физические величины, вносимые в таблицу. Записать формулы расчета физических величин, вносимых в таблицу.

Программа работы

Убедившись, что уставки реле времени достаточны для невыхода оборудования из строя (для лаборатории >10сек), для исследуемого электропривода получить данные для построения следующих электромеханических и механических характеристик:

1. Естественных.
2. При ослабленном магнитном потоке.

3. С добавочным сопротивлением $R_П$ в обмотке якоря.
4. В режиме динамического торможения.
5. В режиме динамического торможения с добавочным сопротивлением $R_Т$ в цепи якоря.
6. При питании якорной цепи от управляемого источника напряжения для **двух указанных преподавателем** значений его выходного напряжения.

Обработка результатов

Обработать результаты измерений, построить полученные экспериментально характеристики исследуемого электропривода – электромеханические на одном графике и механические на втором. Сравнить полученные результаты с теоретическими представлениями, сделать выводы о целесообразности применения различных способов регулирования скорости машины постоянного тока независимого возбуждения.

Индивидуальное задание

Выполнить индивидуальное задание 3.2 лабораторной работы № 3.

Вопросы для самопроверки:

1. Почему нельзя подавать питание якорной обмотки МПТ НВ до подачи питания на обмотку возбуждения?
2. Что такое естественная характеристика электропривода?
3. Что такое искусственная характеристика электропривода?
4. Как происходит динамическое торможение двигателя?
5. Какие существуют энергетические режимы работы электрического привода?
6. Как отличаются жесткости характеристик при питании от сети и от управляемого источника напряжения?
7. Как изменяется жесткость характеристик при добавлении в цепь якоря добавочных сопротивлений?

Лабораторная работа № 1.3. Переходные процессы электропривода с машиной постоянного тока независимого возбуждения

Подготовка к работе

1. На основании экспериментальных результатов лабораторной работы 1.2 определить значение добавочного сопротивления в цепи якоря, используемого для пуска $R_П$ и для динамического торможения $R_Т$.
2. Рассчитать уставки реле времени, использующихся для пуска в одну ступень и динамического торможения исследуемого электропривода.
3. Рассчитать уставки при уменьшении тока возбуждения электрической машины исследуемого электропривода $I_{в.ИЭП}$ в 1,5 раза по сравнению с номинальным значением $I_{в.ИЭП.н}$.
4. Для исследуемого электропривода по данным пунктов 2 и 3 рассчитать и построить диаграммы переходных процессов:
   1) на **одном графике** в осях механических характеристик – $\omega(M_{ИЭП})$;
   2) на **одном графике** в осях электромеханических характеристик – $\omega(I_{я.ИЭП})$.
5. Для исследуемого электропривода по данным пунктов 2-4 рассчитать и построить временные диаграммы: $\omega(t)$, $I_{я.ИЭП}(t)$, $M_{ИЭП}(t)$.
6. Последовательно для каждого пункта программы работы изобразить электрическую схему включения исследуемого и нагрузочного электропривода с пусковыми резисторами, коммутационной аппаратурой, и т.д., а также необходимыми приборами для измерения значений координат электропривода.

   Предусмотреть возможность получения временных диаграмм тока якоря $I_{я.ИЭП}(t)$ и скорости вращения вала исследуемой машины постоянного тока $\omega(t)$ при помощи осциллографа.
7. Для каждого пунктов 2 и 3 программы работы построить временные диаграммы: скорости холостого хода $\omega_{0.ИЭП}(t)$, $\omega(t)$, $I_{я.ИЭП}(t)$, момента исследуемого электропривода $M_{ИЭП}(t)$.

Программа работы

1. Собрать схему управления исследуемым электроприводом, обеспечивающую автоматический пуск в одну ступень и остановку динамическим торможением. Получить временные диаграммы тока якоря $I_{я.ИЭП.н.}(t)$ и скорости вращения вала $\omega(t)$ исследуемой машины

постоянного тока при настройках реле времени 10 секунд и пониженном потоке.

2. Получить временные диаграммы п.1 после проведения корректной настройки реле.
3. Получить временные диаграммы п.1 при номинальном потоке.
4. Получить временные диаграммы п.1 при номинальном потоке после проведения корректной настройки реле.

Обработка результатов

Обработать результаты измерений, определить реальное значение уставки реле времени. Отобразить полученные временные диаграммы в осях механических характеристик $\omega(M_{ИЭП})$ и электромеханических характеристик $\omega(I_{я.ИЭП})$. Сравнить полученные результаты с теоретическими представлениями, сделать выводы.

Индивидуальное задание

Выполнить индивидуальное задание 3.3 лабораторной работы № 3.

Вопросы для самопроверки

1. Какое минимальное значение времени необходимо для пуска в одну ступень?
2. Что будет если произвести пуск с настройкой реле времени меньше минимально допустимого?
3. На пересечении каких характеристик будет установившаяся точка при нулевом значении момента нагрузки НЭП?
4. Как будет изменяться установившаяся скорость при увеличении момента нагрузки?
5. Что означает провести настройку реле?
6. Как получить точку холостого хода ИЭП?
7. Какая коммутационная аппаратура применяется в данной работе?

Лабораторная работа № 1.4. Переходные процессы электропривода с машиной постоянного тока независимого возбуждения при питании от управляемого источника напряжения

Подготовка к работе

1. Изучить особенности динамических режимов при плавном изменении возмущающего фактора.
2. Рассчитать уставку задатчика интенсивности напряжения якоря машины постоянного тока независимого возбуждения исследуемого электропривода, обеспечивающую без учета нагрузки на валу ускорение разгона и торможения с током $0{,}25*I_{я.ИЭП.н}$.
3. Для каждого пункта программы работы изобразить электрическую схему включения исследуемого и нагрузочного электропривода с пусковыми резисторами, коммутационной аппаратурой, и т.д., а также необходимыми приборами для измерения значений координат электропривода. Предусмотреть возможность получения временных диаграмм тока якоря $I_{я.ИЭП}(t)$, напряжения якоря $U_{Я.ИЭП}(t)$ и скорости вращения вала исследуемой машины постоянного тока $\omega(t)$ при помощи осциллографа.
4. Для пункта программы работы построить (на основании теоретических представлений) на одном графике временные диаграммы: скорости холостого хода $\omega_{0.ИЭП}(t)$, $\omega(t)$, $I_{я.ИЭП}(t)$, момента исследуемого электропривода $M_{ИЭП}(t)$, напряжения якоря исследуемого электропривода $U_{Я.ИЭП}(t)$.

Программа работы

1. Экспериментально получить временные диаграммы пуска и торможения исследуемого электропривода при питании якорной цепи машины постоянного тока от управляемого источника напряжения.
2. Экспериментально получить временные диаграммы изменения напряжения якоря при пуске и торможении исследуемого электропривода при питании якорной цепи машины постоянного тока от управляемого источника напряжения.

Обработка результатов

Обработать результаты измерений, определить реальное значение уставки задатчика напряжения. Отобразить полученные временные диаграммы в осях механических характеристик $\omega(M_{ИЭП})$ и электромеханических характеристик $\omega(I_{я.ИЭП})$. Сравнить полученные результаты с теоретическими представлениями, сделать выводы о целесообразности применения устройств плавного пуска.

Вопросы для самопроверки

1. С какой целью осуществляется пуск исследуемого ЭП от управляемого источника напряжения?
2. Как можно рассчитать уставку задатчика интенсивности? Зачем это нужно?
3. По какому закону изменяется скорость холостого хода $\omega_{0.ИЭП}$ при пуске ДПТ от управляемого источника напряжения?
4. Запишите уравнение, описывающие изменение скорости вращения ДПТ при пуске от управляемого источника напряжения.
5. Чем определяется максимальный момент при переходном процессе при плавном изменении возмущающего фактора?
6. Укажите особенности переходных процессов при питании якоря двигателя от управляемого источника напряжения?
7. Чему будет равно ЭДС преобразователя за время, равное времени пуска?

Лабораторная работа № 2.1. Определение момента сил трения и момента инерции стенда исследования электропривода с асинхронной машиной с фазным ротором

Подготовка к работе

1. Изучить основы механики электропривода и способы определения момента сопротивления и момента инерции.
2. На основании паспортных данных стенда оценить предполагаемые значения момента сил трения и момента инерции. Рассчитать необходимые для выполнения работы параметры нагрузочного электропривода по паспортным данным.
3. Построить предполагаемые статические естественные электромеханические $\omega(I_{1ИЭП})$ на одном графике и механические характеристики $\omega(M_{ИЭП})$ – на втором – исследуемого электропривода (для всех допустимых энергетических режимов работы).
4. Последовательно для каждого пункта программы работы:
   1) изобразить электрическую схему включения исследуемого и нагрузочного электропривода с пусковыми резисторами, коммутационной аппаратурой, и т.д., а также необходимыми приборами для измерения значений координат электропривода;
   2) продумать и составить таблицу для записи результатов измерений и последующих расчетов;
   3) на электрической схеме включения отметить, какими приборами измеряются физические величины, вносимые в таблицу. Записать формулы расчета физических величин, вносимых в таблицу.

Программа работы

1. Экспериментально определить момент сил сопротивления по моменту трения трогания.
2. Экспериментально определить момент инерции по времени выбега со скоростей 500, 1000 и 1500 об/мин и на основании результатов, полученных в п 1. Каждый опыт проводится 3-5 раз. Результаты измерений усредняются.
3. Экспериментально определить момент инерции и момент сил сопротивления из опыта разгона-торможения при максимальных скоростях 500, 1000 и 1500 об/мин. Каждый опыт проводится 3-5 раз. Результаты измерений усредняются.

4. Собрать схему пуска исследуемого электропривода. Осуществить пуск.

Обработка результатов

Обработать результаты измерений, сравнить полученные результаты с паспортными данными и теоретическими представлениями, сделать выводы.

Индивидуальное задание

Выполнить индивидуальное задание 3.1 лабораторной работы № 3.

Вопросы для самопроверки

1. Объясните понятие момент трогания?
2. Объясните различия в получаемых результат момента инерции с разных скоростей, как зависит момент инерции от параметров?
3. Какой способ определения момента инерции наиболее точный?
4. Что входит в суммарный момент инерции, определяемый опытным путем?
5. Значение момента сопротивления из какого опыта наиболее подходит для применения в дальнейших опытах, почему?
6. В чем отличие в измерении момента сопротивления в 1 опыте и в 3?
7. Какие допущения используются при определении момента инерции во 2 опыте?

Лабораторная работа № 2.2. Исследование электропривода с асинхронной машиной с фазным ротором

Подготовка к работе

1. Рассчитать необходимые для выполнения работы параметры нагрузочного электропривода по паспортным данным.
2. Используя технические данные испытуемой асинхронной электрической машины рассчитать и построить для исследуемого электропривода (для всех допустимых энергетических режимов работы) предполагаемые статические электромеханические $\omega(I_{1..ИЭП})$ на одном графике и механические характеристики $\omega(M_{ИЭП})$ – на втором:
    1) естественные;
    2) при подключении добавочных сопротивлений $R_{2доб}$ в цепи ротора;
    3) динамического торможения без добавочных сопротивлений $R_{2доб}$ в цепи ротора;
    4) динамического торможения при подключении добавочных сопротивлений $R_{2доб}$ в цепи ротора.
1. Последовательно для каждого пункта программы работы:
    1) изобразить электрическую схему включения исследуемого и нагрузочного электропривода с пусковыми резисторами, коммутационной аппаратурой, и т.д., а также необходимыми приборами для измерения значений координат электропривода.
    2) продумать и составить таблицу для записи результатов измерений и последующих расчетов.
    3) на электрической схеме включения пометить, какими приборами измеряются физические величины, вносимые в таблицу. Записать формулы расчета физических величин, вносимых в таблицу.

Программа работы

Для исследуемого электропривода получить данные для построения электромеханических и механических характеристик:

1. Естественных.
2. При подключении добавочных сопротивлений $R_{2доб}$ в цепи ротора.
3. Динамического торможения без добавочных сопротивлений $R_{2доб}$ в цепи ротора.

4. Динамического торможения при подключении добавочных сопротивлений $R_{2доб}$ в цепи ротора.

Обработка результатов

Обработать результаты измерений, построить полученные экспериментально характеристики исследуемого электропривода – электромеханические на одном графике и механические на втором. Сравнить полученные результаты с теоретическими представлениями, сделать выводы о целесообразности применения различных способов регулирования скорости асинхронной машины с фазным ротором.

Вопросы для самопроверки

1. Какие существуют энергетические режимы работы привода?
2. В каких случаях для получения участка МХ не подходит использование НЭП, создающего постоянный момент?
3. Что такое естественная характеристика электропривода?
4. Что такое искусственная характеристика электропривода?
5. Как происходит динамическое торможение двигателя?
6. Почему при работе нагрузочного электропривода в режиме источника момента нельзя получить точки механической характеристики электропривода с асинхронной машиной, в которых скольжение превышает критическое?
7. Как изменяется вид характеристик при добавлении сопротивлений в цепь ротора?

Лабораторная работа № 2.3. Исследование электропривода с асинхронной машиной с фазным ротором при питании от преобразователя частоты

Подготовка к работе

1. Рассчитать необходимые для выполнения работы параметры нагрузочного электропривода по паспортным данным.
2. Используя технические данные испытуемой асинхронной электрической машины рассчитать и построить для исследуемого электропривода (для всех допустимых энергетических режимов работы) предполагаемые статические электромеханические $\omega(I_{1.ИЭП})$ на одном графике и механические характеристики $\omega(M_{ИЭП})$ – на втором:
   1) естественные;
   2) при питании двигателя от преобразователя частоты:
      – $f_1 = 75$ Гц;
      – $f_1 = 25$ Гц;
      – $f_1 = 5$ Гц.
3. Используя технические данные испытуемой асинхронной машины, рассчитать и построить зависимость $U_1(f_1)$ при питании от преобразователя частоты.
4. Последовательно для каждого пункта программы работы:
5. Изобразить электрическую схему включения исследуемого и нагрузочного электропривода с пусковыми резисторами, коммутационной аппаратурой, и т.д., а также необходимыми приборами для измерения значений координат электропривода.
6. Продумать и составить таблицу для записи результатов измерений и последующих расчетов.
7. На электрической схеме включения отметить, какими приборами измеряются физические величины, вносимые в таблицу. Записать формулы расчета физических величин, вносимых в таблицу.

Программа работы

1. Экспериментально получить данные для построения зависимости $U_1(f_1)$ при питании исследуемого электропривода от преобразователя частоты.
2. Для исследуемого электропривода получить данные для построения электромеханических и механических характеристик при питании от

преобразователя частоты для **указанных преподавателем** значений частоты.

Обработка результатов

Обработать результаты измерений, построить зависимость $U_1(f_1)$ и полученные экспериментально характеристики исследуемого электропривода – электромеханические на одном графике и механические на втором. Сравнить полученные результаты с теоретическими представлениями, сделать выводы о целесообразности применения преобразователя частоты для регулирования скорости асинхронной машины с фазным ротором.

Вопросы для самопроверки

1. Как изменяется допустимый момент при разных значениях задания преобразователя частоты?
2. Как по отношении к естественной изменяется характеристика при уменьшении частоты?

Лабораторная работа № 3. Исследование электропривода с машиной постоянного тока независимого возбуждения на виртуальном стенде

Ссылка на виртуальный стенд доступна на сайте кафедры Автоматизированного электропривода «НИУ «МЭИ» и на сервере www.EPLabz.ru. Стенд доступен как в веб-версии (рис. 11), так и в виде устанавливаемого приложения. При очном обучении задания 3.1, 3.2 и 3.3 настоящей лабораторной работы предлагается выполнять в рамках подготовки к выполнению очных лабораторных работ 1.1, 1.2 и 1.3 соответственно. Виртуальный стенд может быть использован и при дистанционном формате обучения. Задание выполняется по вариантам. Вариант 0 соответствует реальным стендам кафедры АЭП. Индивидуальный стенд собран из неизвестных обучающемуся компонентов. В ходе лабораторной работы необходимо провести параметрическую идентификацию; определить, какое оборудование установлено; произвести настройку электропривода. Стенд работает «в реальном времени» и для

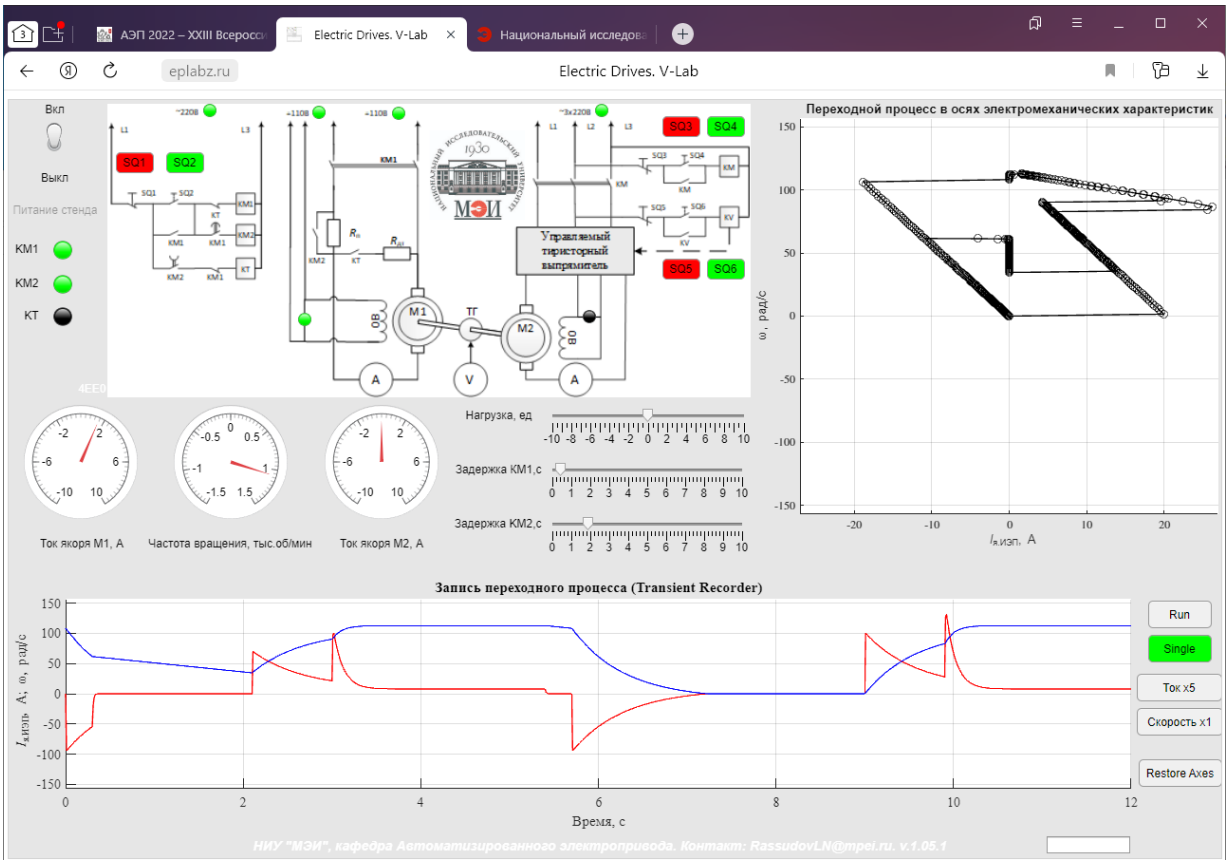


Рис. 11. Веб-интерфейс виртуального стенда

временных отсечек при анализе переходных процессов можно использовать как встроенный осциллограф, так и секундомер.

Индивидуальность комплекта виртуального оборудования заключается в том, что в вариантах отличаются исследуемые электроприводы:

1) электрические машины постоянного тока независимого возбуждения;
2) сопротивления пуска и динамического торможения.

Нагрузочный электропривод для всех вариантов един. Для него коэффициент пропорциональности между моментом и током якоря принимается равным $k\Phi_{н.НЭП}$=0,96 В*с.

Задание 3.1

1. С учетом возможной зависимости от скорости определить любым известным способом (ЛР1.1) следующие параметры:
   1) суммарный момент инерции вращающихся частей J_{Σ};
   2) момент сил трения $M_{тр}$.
2. Сделать выводы.

Задание 3.2

1. Определить следующие параметры
   1) $k\Phi_{н.ИЭП}$ коэффициент пропорциональности между моментом и током машины постоянного тока исследуемого электропривода;
   2) величину используемого для пуска сопротивление $R_{п}$;
   3) сопротивление обмоток якорной цепи $R_{я}$;
   4) величину используемого для динамического торможения сопротивление $R_{дт}$.
2. На основании полученных данных определить, какая из машин постоянного тока из справочника установлена в стенде в составе исследуемого электропривода.

Задание 3.3

1. Используя данные о предельных значениях тока якоря (из справочника), настроить реле времени, обеспечив **максимальную** скорость переходных процессов.
2. Сравнить полученные результаты настройки с рассчитанными из теоретических представлений.
3. Составить отчет о выполнении заданий 3.1-3.3 работы. Сделать выводы.

Приложение А. Примерный образец оформления Отчета

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский университет «МЭИ»

КАФЕДРА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА
КУРС «ОСНОВЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРИВОДА»

Отчёт по лабораторной работе №0
«Стенд исследования электроприводов»

Группа ЭЛ-01-XX Бригада № 1

Члены бригады	Васильев В.В.	Иванов И.И.	Петров П.П.
Решаемые задачи	Пункт 3, 4	Пункт 3, 4	Пункт 1,2, 3
Подпись студ., дата	*ВВВ 31.08.2020*	*ИИИ 31.08.2020*	*ППП 31.08.2020*
Подготовка	*4*	*4*	*5*
Выполнение	*4*	*5*	*5*
Защита	*5*	*5*	*5*
Итог	*4,3*	*4,7*	*5,0*
Подпись преподавателя	*ССС 01.09.2020*	*ССС 01.09.2020*	*ССС 01.09.2020*

Дата выполнения *01.09.2023* Проверил *Сидоров С.С*

Москва, 2023

ПОДГОТОВКА К РАБОТЕ

Исследуемый электропривод (ИЭП) установлен в стенд исследования электроприводов. Вал машины через муфту подсоединяется к валу электрической машины нагрузочного электропривода (НЭП). Исследование ИЭП в такой системе заключается в том, что при помощи НЭП формируется требуемый момент нагрузки и анализируются соответствующие значения координат ИЭП. Функциональная схема стенда исследования электроприводов представлена на рис. А1. В состав стенда входит ИЭП с асинхронной машиной и НЭП с машиной постоянного тока независимого возбуждения (МПТ НВ). Параметры машин приведены в таблице А1 и таблице А2, соответственно.

Перед началом работ по исследованию электропривода, необходимо определить свойства, присущие самому стенду.

- Соответствие электромагнитного момента нагрузочной машины $M_{эмНМ}$ задаваемому току её якоря $I_{ЯНМ.}$
- Момент трения, присущий стенду $M_{ТР}$.
- Суммарный момент инерции вращающихся частей J_{Σ}.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: Определение свойств стенда исследования электроприводов.

ЗАДАЧИ РАБОТЫ

- Определить связь момента НЭП и задающего воздействия.
- Экспериментально определить момент трения стенда.
- Экспериментально определить суммарный момент инерции вращающихся частей.

Таблица А1 – Некоторые параметры асинхронной машины ИЭП.

Тип	*MTF011-6*
Момент инерции $J_{ИМ}$	*0,021 кг·м²*

Таблица А2 – Некоторые параметры МПТ НВ НЭП.

Тип	*ПБСТ 43*
Номинальная мощность, $J_{ИМ}$	*1,9кВт*
Номинальная частота вращения $n_{НМ.н}$	*1000 об/мин*
Номинальное напряжение $U_{ЯНМ.н}$	*110В*
Номинальный ток якоря $I_{ЯНМ.н}$	*21А*
Суммарное активное сопротивление обмотки якоря $R_{Я\Sigma НМ}$	*0,4 Ом*
Момент инерции $J_{НМ}$	*0,057 кг·м²*

Связь момента НЭП и задающего воздействия

Обмотка якоря МПТ НВ питается от управляемого тиристорного выпрямителя (УТВ) с отрицательной обратной связью по току (рис. А1). $M_{\text{эмНМ}}$, развиваемым нагрузочной машиной (НМ) связан с задаваемым током якоря $I_{\text{ЯНМ}}$ (в пренебрежении эффектами петли гистерезиса и нелинейностями магнитной системы) выражением:

$$M_{\text{эмНМ}} = k\Phi_{\text{НМ.н}} I_{\text{ЯНМ}}, \tag{1}$$

где $k\Phi_{\text{НМ.н}}$ – коэффициент пропорциональности, соответствующий номинальному току возбуждения. Его можно определить из уравнения электромеханической характеристики МПТ НВ в номинальной точке [1]:

$$k\Phi_{\text{НМ.н}} = \frac{30\left(U_{\text{ЯНМ.н}} - I_{\text{ЯНМ.н}} \cdot R_{\text{Я}\Sigma\text{НМ}}\right)}{\pi \cdot n_{\text{НМ.н}}} = \frac{30(110 - 21 \cdot 0{,}4)}{\pi \cdot 1000} = \\ = 0{,}97\ \text{В} \cdot \text{с} \tag{2}$$

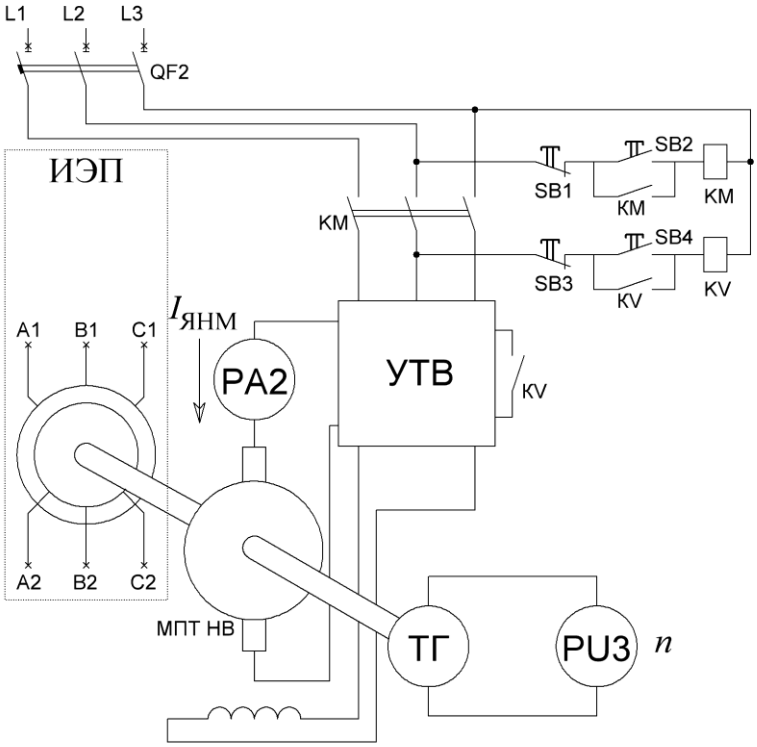


Рис. А1. Схема стенда

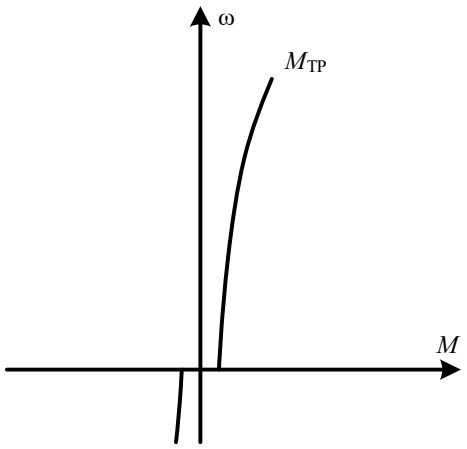


Рис. А2. Вид механической характеристики момента сил трения

Момент трения стенда

$M_{ТР}$ включает в себя трение и ИЭП, и в НЭП, т.е. всего стенда. В $M_{ТР}$ входит трение в подшипниках, скользящих контактах, вентиляторная нагрузка. Момент сил трения подлежит экспериментальному определению. Ожидаемый вид характеристики показан на рис. А2.

Суммарный момент инерции вращающихся частей

Суммарный момент инерции подлежит идентификации. С учётом того, что кроме моментов инерции ИЭП $J_{ИМ}$ и НЭП $J_{НМ}$ в J_{Σ} входят моменты инерции муфты, датчиков и др., ожидаемое значение момента инерции:

$$J_{\Sigma} > J_{ИМ} + J_{НМ} = 0{,}021 + 0{,}057 = 0{,}078 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \qquad (3)$$

ПРОГРАММА РАБОТЫ

Экспериментально определить момент сил сопротивления по моменту трогания.

Экспериментально определить момент инерции по времени выбега со скоростей n_m = 500, 1000 и 1500 об/мин и на основании результатов, полученных в п 1.

Экспериментально определить момент инерции и момент сил сопротивления из опыта разгона-торможения при максимальных скоростях n_m = 500, 1000 и 1500 об/мин. Каждый опыт проводится 3 раза. Результаты измерений усредняются.

Сравнить полученные результаты с теоретическими, сделать выводы.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТОВ

Опыт измерения момента сил трения по моменту трогания

Включить питание стенда (QF1 и QF2 панели А1) и подать питание на УТВ (SQ2 панели А6). На панели А6 выкрутить в ноль потенциометр «Задание момента» и выставить переключатель «Задание момента в положение «+М».

Подать питание от УТВ на нагрузочную машину (SQ4 панели А6).

Постепенно увеличивая задание момента нагрузочной машины потенциометром «Задание момента» из нуля, зафиксировать $I_{ЯНМ}$ (амперметр PA2), при котором вал придёт во вращение. Данные занести в таблицу 3. Выполнить трижды.

Отключить питание якорной обмотки ДПТ НВ от УТВ (SQ3 панели А6). На панели А6 выкрутить в ноль потенциометр «Задание момента» и выставить переключатель «Задание момента» в положение «0».

Из среднего значения $I_{ЯНМ}$ по (1) рассчитать момент трогания $M_{тр.трог}$ (таблица А3).

Таблица А3 – Измерение момента силы трения по моменту трогания.

	$I_{ЯНМ}$, А			$I_{ЯНМ.ср}$, А	$M_{тр.трог}$, Н·м
$I_{ЯНМ}$, А	*1,0*	*1,1*	*1,0*	*1,03*	*1*

Опыт определения момента инерции по времени выбега

Включить питание стенда (QF1 и QF2 панели А1) и подать питание на УТВ (SQ2 панели А6).

На панели А6 выкрутить в ноль потенциометр «Задание момента» и выставить переключатель «Задание момента в положение «+М».

Подать питание от УТВ на нагрузочную машину (SQ4 панели А6).

Выставив некоторое задание потенциометром «Задание момента» разогнать систему до n_m = 500 об/мин, ориентируясь по показаниям вольтметра тахогенератора. По достижении этой скорости отключить питание якорной обмотки ДПТ НВ от УТВ (SQ3 панели А6) и засечь с помощью секундомера время до полной остановки нагрузочной машины. Данные занести в таблицу А4. Повторить трижды.

Отключить питание якорной обмотки ДПТ НВ от УТВ (SQ3 панели А6). На панели А6 выкрутить в ноль потенциометр «Задание момента» и выставить «Задание момента» в положение «0».

Рассчитать для каждого значения скорости момент инерции по среднему времени выбега $t_{выб.ср}$, приняв момент трения постоянным, равным $M_{тр.трог}$:

$$J_{\Sigma} = \frac{30\left(M_{тр.трог} \cdot t_{выб.ср}\right)}{\pi \cdot n_{НМ.н}}. \qquad (7)$$

Повторить пункты 2.2 — 2.6 для n_m = 1000 об/мин и 1500 об/мин.

Отключить питание УТВ (SQ1 на А6) и стенда (QF2 и QF1 на А1).

Таблица А4 – Определение момента инерции по времени выбега.

n_m, об/мин	$t_{выб}$, с			$t_{выб.ср}$, с	J_{Σ}, кг·м2
500	*4,38*	*4,12*	*4,54*	*4,35*	*0,083*
1000	*8,20*	*8,08*	*8,38*	*8,22*	*0,078*
1500	*11,28*	*11,48*	*11,42*	*11,39*	*0,072*

Опыт разгоне-выбеге для определения момента инерции и момента сил сопротивления при

Включить питание стенда (QF1 и QF2 панели А1) и подать питание на управляемый тиристорный выпрямитель (SQ2 панели А6). На панели А6 выкрутить в ноль потенциометр «Задание момента» и выставить переключатель «Задание момента в положение «+М».

Кратковременно подавая питание от УТВ на нагрузочную машину при помощи (SQ3 и SQ4 панели А6), выставить положение ручки потенциометра «Задание момента», соответствующее току $I_{ЯНМ}$ (амперметр PA2). Значение должно быть выбрано исходя из необходимости обеспечения разгона, близкого к равноускоренному, а также обеспечения максимальной точности определения времени разгона.

Подать питание от УТВ на нагрузочную машину (SQ4 панели А6) и запустить секундомер. По достижении скорости n_m = 500 об/мин отключить питание якорной обмотки ДПТ НВ от УТВ (SQ3 панели А6), одновременно сделав промежуточную отсечку на секундомере. В момент полной остановки системы остановить секундомер. Данные о времени разгона $t_{разг}$ и выбега $t_{выб}$ занести в таблицу А5. Повторить трижды. Занести $I_{ЯНМ}$ в таблицу А5.

По (9) и (10) рассчитать момент инерции и момент трения по средним $t_{разг}$ и $t_{выб}$:

$$J_{\Sigma} = \text{———————————},\qquad (9)$$

$$M_{ТР} = J_{\Sigma}\frac{\pi \cdot n_m}{30 t_{выб.ср}}.\qquad (10)$$

Повторить пункты 3.3 — 3.4 для n_m = 1000 об/мин и 1500 об/мин.

Отключить питание УТВ (SQ1 на А6) и стенда (QF2 и QF1 на А1).

Таблица А5 – Опыт разгона-выбега

n_m, об/мин	$I_{ЯНМ}$,A	$t_{разг}$, c			$t_{разг.ср}$, с	$t_{выб}$, с			$t_{выб.ср}$, с	J_{Σ}, кг·м^2	$M_{тр}$, Нм
500	*3,0*	*2,98*	*3,08*	*3,08*	*3,05*	*4,05*	*4,29*	*4,37*	*4,24*	*0,099*	*1,22*
1000	*3,0*	*5,54*	*5,48*	*5,56*	*5,53*	*8,25*	*7,93*	*7,95*	*8,04*	*0,091*	*1,19*
1500	*3,0*	*8,36*	*8,18*	*8,14*	*8,23*	*11,77*	*11,45*	*11,95*	*11,72*	*0,09*	*1,2*

ВЫВОД

В лабораторной работе был рассчитан коэффициент пропорциональности между током якоря нагрузочной машины и электромагнитным моментом.

В ходе лабораторной работы в 1 и 2 опыте был определен момент силы трения трогания и момент инерции стенда. Уменьшение момента инерции в опыте 2 с ростом скорости, с которой производился выбег связано с тем, что в формулу 7 подставлялось одно и то же значение момента трения, в то время как на самом деле средний момент силы трения при выбеге растет со скоростью. Ожидаемое значение момента инерции (>0,078 кг˙м²) получается лишь при низкой скорости, когда средний момент трения при выбеге наиболее близок к моменту трения трогания.

Опыт 3 позволяет определить средний момент сил трения при разгоне до заданных скоростей и последующем выбеге. Согласно теоретическим представлениям средний момент трения должен увеличиваться со скоростью, а момент инерции оставаться постоянным. Неточность опыта связана с особенностью стенда: по нажатии кнопки SQ4 панели А6 питание якорной обмотки подается с задержкой и реальное время разгона ниже.

С учетом задержки включения 0,65 секунд, измеренное при помощи замедленного видео изменения показаний PA2 при подаче питания нагрузочной машины, получим результаты, соответствующие ожиданиям:

Таблица А6 – Опыт разгона-выбега с учетом задержки на включение

n_m, об/мин	$I_{ЯНМ}$,А	$t_{разг.ср}$, с	$t_{выб.ср}$, с	J_{Σ}, кг˙м²	Мтр, Нм
500	3	3,05-0,65	4,24	0,085	1,05
1000	3	5,53-0,65	8,04	0,084	1,10
1500	3	8,23-0,65	11,72	0,085	1,14

Опыт 3 позволяет получить значение момента инерции, а также средней силы трения с большей точностью, которая в значительной степени зависит от точности определения реального времени разгона и выбега. Полученные значения параметров стенда для использования при исследовании электроприводов с установленной асинхронной машиной приведены в таблице А7.

Таблица А7 – Свойства стенда исследования электроприводов

Параметр	Значение
$k\Phi_{НМ.н}$, В˙с	0,97
$M_{ТР}$, Нм	≥1, увеличивается с ростом скорости
J_{Σ}, кг˙м2	0,085

Учебное издание

Рассудов Лев Николаевич
Корунец Алина Александровна
Фёдорова Ксения Георгиевна

Лабораторный практикум по исследованию электроприводов

Текстовое электронное издание

Подписано к изданию Электронное издание
Объем ЭИ (Мб) 1,48 Тираж Изд. №