

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Оренбургский государственный университет»

Кафедра электромеханики

А.С. ПАДЕЕВ, С.В. МИТРОФАНОВ

ИСПЫТАНИЕ ТАХОГЕНЕРАТОРОВ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО КУРСУ
“ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ СИСТЕМ АВТОМАТИКИ”

Рекомендовано к изданию Редакционно-издательским советом
государственного образовательного учреждения высшего
профессионального образования «Оренбургский государственный
университет»

Оренбург 2006

УДК 621.373.1 (076.5)

ББК 32.96-04 я73

П 12

Рецензент доцент В.Б. Фатеев

А.С. Падеев

П 12

Испытание тахогенераторов: методические указания к выполнению лабораторных работ/А.С. Падеев, С.В. Митрофанов. – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2006 – 40 с.

Методические указания содержат 2 лабораторные работы по одноименному курсу “Электрические машины систем автоматики”. Приводится краткое описание лабораторных установок, программ работ, последовательности выполнения работ и обработки полученных результатов.

Методические указания предназначены для выполнения лабораторных работ студентами специальностей 140601 – “Электромеханика” и 140604 – “Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов” всех форм обучения.

ББК 32.96-04 я73

© Падеев А.С.,
Митрофанов С.В., 2006
© ГОУ ОГУ, 2006

Содержание

Введение.....	4
1 Требования к выполнению лабораторных работ.....	5
1.1 Порядок проведения лабораторных занятий.....	5
1.2 Проведение опыта.....	5
1.3 Оформление отчета.....	6
1.4 Техника безопасности при выполнении работ.....	6
2 Методика выполнения лабораторной работы при испытании микромашин.....	8
2.1 Измерения электрических величин.....	8
2.2 Измерение неэлектрических величин.....	11
3 Испытание тахогенераторов.....	17
4 Лабораторная работа № 1. Испытание тахогенератора постоянного тока.....	19
4.1 Общие сведения.....	19
4.2 Задание.....	21
4.3 Методические указания.....	21
4.4 Анализ результатов исследований.....	23
4.5 Контрольные вопросы.....	25
5 Лабораторная работа № 2. Испытание асинхронного тахогенератора с полым ротором.....	26
5.1 Общие сведения.....	26
5.2 Задание.....	31
5.3 Методические указания.....	32
5.4 Анализ результатов исследований.....	36
5.5 Контрольные вопросы.....	39
Список использованных источников.....	40

Введение

Данные методические указания к лабораторным работам по электрическим микромашинам предназначены для студентов электроэнергетического факультета, обучающихся по специальности «Электромеханика», а также для студентов других специальностей, которым в курсе «Электрические машины систем автоматики» излагается теория и устройство различных микромашин.

Практические работы в лаборатории электрических микромашин имеют цель ознакомить студентов с конструкцией, методикой сборки схем и испытаний электрических машин, а также научить студентов обработке и оформлению результатов испытаний. Они способствуют закреплению знаний, приобретению навыков в обращении с электрическими машинами, развивают аналитическое мышление в процессе анализа полученных результатов.

В первом и втором разделах методических указаний содержатся порядок прохождения студентами лабораторных занятий, описание методики испытаний, приборов и устройств, применяемых для измерений электрических и неэлектрических величин.

В третьем и последующих разделах методических указаний содержатся описания лабораторных работ. Учитывая многообразие типов электрических микромашин, авторы посчитали целесообразным поместить в каждой работе краткое описание устройства, принципа действия и основных свойств исследуемой машины.

Программа испытания машин построена таким образом, что значительное внимание уделяется исследованию физических процессов, протекающих в микромашинах, снятию выходных характеристик, оценке энергетических показателей машин. Большое значение придается критическому анализу результатов экспериментального исследования. В связи с этим настоящая работа может быть полезна при проведении учебно – исследовательских работ, а также при проведении испытаний машин в процессе научно-исследовательской работы студентов.

1 Требования к выполнению лабораторных работ

1.1 Порядок проведения лабораторных занятий

На первом занятии студенты знакомятся с правилами поведения в лаборатории, техникой безопасности и устройством стендов.

Студент обязан самостоятельно подготовиться к работе. Подготовка состоит в ознакомлении с принципом действия, конструкцией, основами теории испытуемой микромашин, в усвоении содержания работы, используя конспект лекций по данной теме, а также литературу и контрольные вопросы, приведенные в конце описания каждой работы.

Студент обязан знать все необходимые по программе характеристики, продумать и объяснить порядок снятия той или иной характеристики, технику необходимых измерений.

На второе и последующие занятия студенты должны приходить в лабораторию с заранее подготовленными бланками отчета. Наличие заблаговременно подготовленного бланка отчета проверяется преподавателем перед каждым занятием.

Перед началом лабораторной работы преподаватель проверяет готовность студента к предстоящей работе. Студенты, пришедшие на занятие неподготовленными или не составившие, отчет по предыдущему лабораторному занятию, к выполнению очередного лабораторного исследования не допускаются.

По окончании оформления работы студент отчитывается перед преподавателем. Отчет о проделанной работе предоставляется каждым студентом индивидуально на текущем или следующем занятии.

Студенты, допущенные к работе, приступают к сборке схемы. Собранные схемы проверяются преподавателем. Включение схем и всевозможные переключения в ходе работы без разрешения преподавателя производить воспрещается. В случае нарушения этого требования студент отстраняется от работы, а при порче оборудования несет материальную ответственность.

1.2 Проведение опыта

Опыт должен проводиться быстро, чтобы свести к минимуму влияние высокой скорости нарастания температуры нагрева микромашин на их характеристики.

Прежде чем приступить к сборке схемы, студенты обязаны ознакомиться с рабочим местом: щитом питания, включением и выключением напряжения на рабочем месте, выяснить величину подаваемого напряжения и его характер. В нашей лаборатории применяются напряжения величиной 5 В постоянного тока, 220 В и 110 В переменного тока, 50 Гц.

Далее студенты обязаны записать паспортные данные испытуемой и вспомогательной микромашин или же вспомогательного устройства, выяснить, какие зажимы машин, реостатов и вспомогательных устройств соответствуют отдельным точкам электрической схемы.

После такой подготовительной работы можно приступить непосредственно к проведению испытаний. Студенты имеют право включить напряжение после обязательной проверки преподавателем схемы. Включив напряжение, визуально по приборам просматривается очередная характеристика в требуемом диапазоне. Далее можно приступать к проведению и записи опыта.

Лабораторные работы обычно выполняются бригадой в 3-4 человека. В процессе работы каждый член бригады выполняет определенные обязанности. В последующих работах обязанности членов бригады должны меняться, так как только в этом случае каждый студент получит необходимые навыки и знания.

При проведении экспериментов на график наносятся точки, соответствующие измеряемым величинам, записанным в таблице. По нанесенным точкам строится график. Экспериментальные кривые наносятся только карандашом. В большинстве случаев само расположение точек кривой может указать на неточность ряда отсчетов, ошибки в измерениях, несоблюдения условий проведения опыта и т.п. Выпавшие точки должны быть проверены ещё раз.

1.3 Оформление отчета

Каждый студент заранее подготавливает протокол будущей работы, в который во время опыта вносятся необходимые измерения и требуемые расчеты. Отчет по лабораторной работе должен быть оформлен в соответствии с требованиями СТП 101-00. Отчет выполняется на отдельных листах формата А4 (размер 210× 297 мм). Отчет должен иметь титульный лист, на котором записываются: названия лабораторной работы, фамилия и инициалы студента, курс, факультет, группа, дата проведения, фамилия и инициалы преподавателя.

Далее приводятся основные рабочие схемы испытаний, программа работы, таблица результатов опытов, графическое построение характеристик, необходимые вычисления по обработке материалов испытаний (приводятся примеры расчета одной точки характеристик) и выводы о проделанной работе. Отчет должен быть аккуратно оформлен. Графики могут выполняться, как на листах формата А4 с нанесением сетки, так и на миллиметровой бумаге (размер 210× 297 мм). Графики и схемы вычерчиваются карандашом.

1.4 Техника безопасности при выполнении работ

Студенты, проходящие курс электрических микромашин в лаборатории, обязаны прослушать краткую информацию по технике безопасности, соблюдение которой требуется на протяжении всего цикла лабораторных работ. Следует помнить, что в лаборатории рабочее напряжение 220 В и 110 В переменного тока и 5 В постоянного тока, а сопротивление тела человека может падать до 600 Ом. Указанные величины напряжения опасны. Кроме того, необходимо помнить, что открытые вращающиеся части электрических микромашин имеют частоту вращения в отдельных случаях до 10000 оборотов в минуту.

Поэтому, основные правила техники безопасности заключаются в следующем:

- 1) не прикасайтесь к находящимся под напряжением элементам цепей, лишенных изоляции;
- 2) прежде, чем сделать пересоединение цепи, отключите источник питания;
- 3) включайте собранную цепь только с разрешения преподавателя после проверки схемы;
- 4) не пользуйтесь проводниками с изношенной изоляцией;
- 5) не производите пересоединений в цепях машины до полной остановки ротора;
- 6) не прикасайтесь к зажимам отключенных конденсаторов;
- 7) нельзя тормозить вал или шкив рукой;
- 8) необходимо помнить, что гладкий вращающийся вал способен «захватывать» обвисающие части одежды (свободно повязанный шарф, концы платка и т.д.)

В случае поражения током, «захвата» вращающейся частью, обрыва проводов, находящихся под напряжением, образования недопустимого искрения в машинах следует немедленно отключить напряжение.

Невыполнение правил техники безопасности может привести к травме, выходу из строя дорогих измерительных приборов и самой испытываемой машины.

2 Методика выполнения лабораторной работы при испытании микромашин

При испытаниях электрических микромашин приходится измерять малые величины, так, что измерительные устройства и приборы потребляют мощности, сравнимые с номинальной мощностью испытуемых машин. Кроме того, нагрев обмоток сильно влияет на характеристики машины, поэтому испытание следует производить по возможности в короткие промежутки времени. Большая скорость нарастания температуры объясняется малыми габаритами и относительно высокими сопротивлениями микромашин. Эти причины обуславливают отличие методики испытания микромашин от методики испытания машин средней и большой мощности.

Целью настоящего раздела является изучение основных особенностей испытания микромашин, которые имеют место при измерении электрических величин (ток, напряжение, мощность) и неэлектрических величин (момент, частота вращения).

2.1 Измерения электрических величин

При испытании микромашин для измерений целесообразно использовать приборы с малым потреблением энергии, и измерение всех параметров производить одновременно. Предел измерения следует выбирать таким, чтобы стрелки приборов находились во второй половине шкалы. При исследовании приходится одновременно измерять токи, напряжения и мощности, при этом неизбежны погрешности за счет собственного потребления мощности измерительными приборами. Так же, измеряемые величины при испытании микромашин, особенно переменного тока, лежат на пороге чувствительности обычных приборов. Поэтому для точных испытаний приходится применять специальные приборы, исключать погрешности внесением поправок на собственное потребление мощности приборами и выбирать такую схему включения измерительных приборов, которая позволяет свести к минимуму влияние собственного потребления.

Существует 18 различных схем включения амперметра, вольтметра и ваттметра. Из них предпочтение следует сделать двум схемам (рисунок 2.1)

Рекомендуемые схемы при испытании двигателей напряжением 110 В, при падении напряжения в амперметре и токовой цепи ваттметра около 2 В дают погрешность измерения мощности около 1,5%, что можно считать допустимым. При напряжении более 110 В и токах нагрузки меньше, чем пределы измерения амперметров и ваттметров, погрешность будет ещё меньше. При напряжениях менее 110 В погрешность измерения мощности увеличивается, и в таких случаях её следует учитывать, вводя в результат измерения соответствующие поправки.

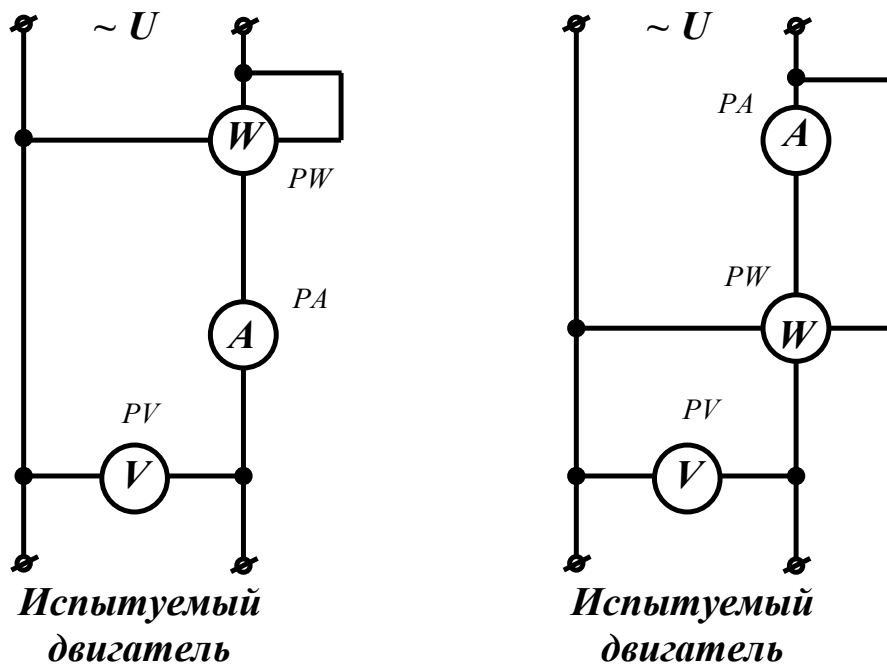


Рисунок 2.1 – Схемы для испытания микродвигателей

При исследовании микродвигателей всегда следует оценивать погрешность при измерении мощности и, в случае необходимости, вводить поправку на собственное потребление приборов

$$P_{\Pi} = I^2 (R_A + R_W), \quad (2.1)$$

где I – ток; R_A , R_W – сопротивление амперметра и токовой цепи ваттметра.

2.1.1 Измерение тока и напряжения

При измерении тока до 1 А рекомендуется пользоваться выпрямительными приборами, у которых по сравнению с другими потребление мощности значительно меньше. Кроме того, эти приборы – многопредельные (например 100, 250, 1000 мА) и, следовательно, позволяют исследовать различные режимы работы микромашин. Нижним пределом для амперметров электромагнитного и электродинамического типа можно считать 100 мА (по номинальному значению шкалы), но на этом пределе относительно велико потребление мощности. Для измерения токов свыше 1 А можно пользоваться стандартными амперметрами с пределами 2,5 – 5 А и 5 – 10 А. Падение напряжения на них при номинальном токе не должно превышать 0,5 – 0,7 В.

Измерение напряжения рекомендуется производить вольтметрами, в которых можно пренебречь собственным потреблением мощности (сопротивление вольтметра должно быть не менее 500 – 1000 Ом на вольт). Таким условиям удовлетворяют электронные и выпрямительные вольтметры, которые и могут быть рекомендованы для испытания микромашин. Выпрямительные приборы

обладают большой точностью, а электронные имеют меньше собственное потребление. В последнее время для исследований, где необходима большая точность, применяются цифровые вольтметры.

2.1.2 Измерение мощности

При измерении мощности следует выбирать приборы, у которых мало собственное потребление мощности, а также мала фазовая погрешность при значениях $\cos\varphi$ в пределах 0,2 – 1,0. Нежелательно иметь ваттметр с большим числом пределов измерений по току и напряжению для использования одного и того же прибора при измерении мощности испытуемой машины в различных режимах. Для номинальных токов свыше 0,5 А может быть рекомендован электродинамический ваттметр. При токах менее 0,5 А приходится пользоваться специальными ваттметрами, например, электронными.

2.1.3 Измерение активного сопротивления и превышения температуры обмоток

Измерение сопротивления обмоток производится на постоянном токе с помощью моста постоянного тока или методом амперметра и вольтметра. Применяются также измерители сопротивлений с цифровой индикацией – цифровые омметры. Измерение сопротивления обмоток якоря у коллекторных машин производят непосредственно на пластинах коллектора.

Превышение температуры обмоток машины над температурой окружающей среды определяют методом сопротивления. Перед включением машины на напряжение измеряют сопротивление обмотки в холодном состоянии r_x и температуру окружающей среды $\theta_{o.c.}$. Рекомендуется провести два или три измерения и определить среднее арифметическое значения сопротивления обмотки. Затем машина включается на номинальное напряжение и выдерживается в номинальном режиме до достижения установившегося теплового режима. После этого измеряют сопротивление обмотки в горячем состоянии r_2 и температуру окружающей среды $\theta_{o.c.}$. Превышение температуры обмотки θ , °С,

$$\theta = \frac{r_2 - r_x}{r_x} (K + \theta_{o.c.}) + \theta_{o.c.} - \theta_{o.c.}, \quad (2.2)$$

где K – коэффициент, равный 235 для обмотки из медных проводов и 245 из алюминиевых.

Следует отметить, что в электрических машинах малой мощности активное сопротивление обмоток оказывает сильное влияние на выходные характеристики, поэтому важно знать, при какой температуре обмоток измерены отдельные показатели.

2.2 Измерение неэлектрических величин

2.2.1 Измерение вращающихся моментов

При испытании электрических микромашин для получения рабочих характеристик применяются главным образом способы непосредственной нагрузки вместо косвенных методов, пригодных для машин средней и большой мощности.

Испытуемая микромашина сочленяется с нагрузочной машиной, которая часто используется непосредственно и для измерения моментов; такие устройства называют тормозами – моментомерами.

Специфические особенности в измерении моментов микромашин:

- 1) большой диапазон измеряемых моментов (примерно от $1 \cdot 10^{-4}$ до 6 Н·м) в широком диапазоне частот вращения (примерно от 0 до 40000 об/мин);
- 2) большие погрешности, обусловленные аппаратурой и методикой измерения. Особые трудности с точки зрения точности измерения встречаются при измерении малых моментов при малых «ползучих» частотах вращения;
- 3) более жесткие требования в отношении времени измерения, удлинение которого сопряжено с искажением измеряемых величин в результате нагревания машины;
- 4) трудности создания унифицированных измерительных устройств вследствие чрезвычайно большой номенклатуры и широкой области применения микромашин.

Основными требованиями к измерителям моментов следует считать: малые погрешности; удобство в работе; малая инерционность с целью уменьшения времени измерения; большой диапазон измеряемых моментов в большем диапазоне частот вращения; пригодность для испытания любого типа машины; надежность работы в любых условиях эксплуатации.

К дополнительным требованиям относят: малый момент инерции нагрузочного устройства; отсутствие гармонических составляющих в кривой моментов нагрузочного устройства; стабильность нагрузочного момента при измерении температуры окружающей среды; вибропрочность и др.

В настоящее время, ввиду отсутствия серийно изготавливаемых устройств для измерения моментов (моментометра), предприятия конструируют и изготавливают их применительно к выпускаемым ими микромашинам. При этом конструкция отдельных типов моментометров не удовлетворяют полностью приведенным требованиям.

Тормоза – моментометры, используемые в лабораторных условиях, можно разделить на две основные группы:

- 1) фрикционные, создающие тормозной момент за счет сил трения, возникающих между трущимися элементами при их относительном перемещении;
- 2) электромеханические в виде нагрузочных машин с измерительной шкалой. В качестве нагрузочной машины используются чаще всего

индукционные тормоза, машина постоянного тока с независимым возбуждением и управляемые асинхронные микродвигатели.

В качестве примеров моментометра, относящегося к первой группе, рассмотрим механический ленточный тормоз с маятником. Внешний вид тормоза с маятником для машин мощностью до 10 Вт показан на рисунке 2.2.

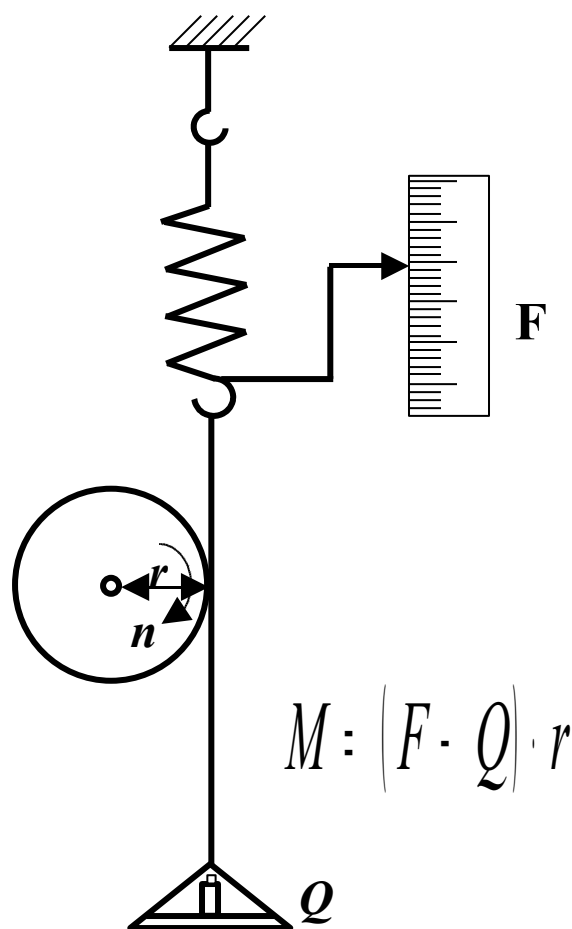


Рисунок 2.2 – Схема тормоза с пружинным динамометром

Нагрузка испытуемого двигателя производится натяжением шнура, охватывающего шкивы тормоза и двигателя. Натяжения шнура производится с помощью упорного винта. Маятник, жестко связанный со стрелкой, поворачивается до тех пор, пока не будет уравнена сила трения между шкивом и шнуром. Величина вращающего момента испытуемого двигателя определяется по углу отклонения стрелки на шкале.

Пределы измеряемых величин моментов регулируются величиной и положением груза маятника и применением на испытуемом двигателе шкивов различных диаметров.

Ко второй группе моментометров относятся электромагнитный и электродинамический тормоза.

а) электромагнитный тормоз представляет собой устройство, в котором тормозящий момент создается воздействием вихревых токов, наводимых во вращающемся диске, и магнитного поля электромагнитов.

В настоящее время известен ряд конструкций электромагнитных тормозов. Внешний вид одного из тормозов показан на рисунке 2.3. Основными эле-

ментами его является алюминиевый диск 3, соединяемый с валом испытуемого двигателя с помощью резиновой трубки и системой электромагнитов 2, укрепленных на кольце, установленном в шариковых подшипниках. К кольцу, которое может поворачиваться в направлении вращения диска, прикреплен маятник с грузами и стрелка, показывающая на неподвижной шкале 1 угол отклонения маятника. Тормозящий момент, создаваемый вихревыми токами, передается кольцу электромагнитов и поворачивает его до тех пор, пока отклоняющийся маятник не уравнивает момент двигателя. По углу отклонения стрелки маятника на шкале определяется величина момента.

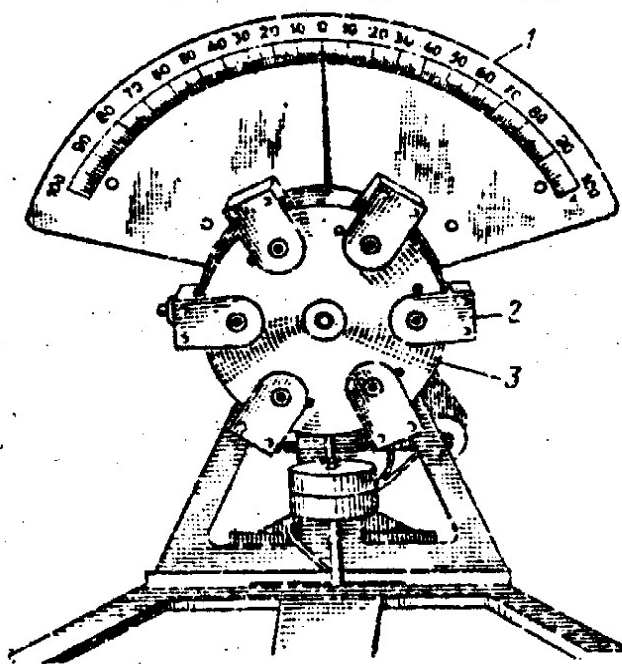


Рисунок 2.3 – Электромагнитный тормоз с пределами измерения момента до 0,2 Н·м

Электромагнитный тормоз имеет следующие достоинства: удобен в эксплуатации; даёт возможность плавно изменять нагрузку путём регулирования тока возбуждения в катушках электромагнитов; даёт непосредственный отсчет величины момента на шкале; позволяет измерять начальные пусковые моменты двигателей.

К недостаткам тормоза описанной конструкции следует отнести: уменьшение тормозящего момента при малых частотах вращения и, следовательно, невозможность осуществления нагрузки двигателя при малых частотах вращения; вибрацию диска при больших частотах вращения; влияние сопротивления воздуха на точность измерения моментов. Погрешность в измерении момента из-за потерь на трение диска о воздух может быть учтена поправочным коэффициентом.

В разработанных на кафедре электрических машин МЭИ электромагнитных тормозах конструкции М.А. Панасенкова частично устранены указанные недостатки. Кроме того, эти тормоза позволяют снимать неустойчивую

часть кривой момента асинхронного двигателя и расширять пределы измеряемых величин.

б) электродинамический тормоз (балансирная машина) представляет собой нагрузочный генератор постоянного тока, станина которого может поворачиваться вокруг оси. На станине имеются рычаги с крючками для подвешивания груза. Валы испытуемого двигателя и балансирной машины жестко соединяются друг с другом. Балансирная машина имеет независимое возбуждение, которое может регулироваться в широких пределах. Обмотка якоря включается на нагрузочное сопротивление.

Уравновешивая станину с помощью грузов, можно определить вращающий момент

$$M_T = G \cdot l \quad (2.2)$$

где l – длина плеча;
 G – масса грузов.

2.2.2 Измерение частоты вращения

Задача измерения частоты вращения микромашин осложняется двумя факторами:

- 1) необходимость измерения без механической нагрузки испытуемой машины, способной изменить режим её работы;
- 2) необходимо измерять частоту вращения с достаточно большой точностью.

Различают три способа измерения частоты вращения электродвигателей:

- 1) непосредственного соединения измерителя скорости (тахометра, тахогенератора, тахографа) с испытуемым двигателем;
- 2) стробоскопический, основанный на использовании стробоскопического эффекта неоновых или ртутных ламп (строботаксометры, строборама и другие устройства);
- 3) частотный, основанный на сравнении заданной эталонной частоты и частоты вращения двигателя (устройство с генератором звуковой частоты, датчик частоты).

Тахометры. Обычные тахометры, используемые при испытании машин большой мощности, непригодны для испытания микромашин мощностью менее 50 Вт, т.к. в этом случае они являются существенной нагрузкой для испытуемой машины, способной изменить режим её работы. Пользование обычным тахометром для машин мощностью свыше 50 Вт является допустимым, так как в этом случае вносимая им погрешность меньше 2 %. Для измерения частоты вращения микромашин применяется часто часовой тахометр, не создающий заметной дополнительной нагрузки на валу испытуемого двигателя и вместе с тем обеспечивающий высокую точность измерения.

Тахогенераторы. Тахометрические генераторы, представляющие собой датчики частоты вращения, подробно описаны в разделе 3.

Для измерения частоты вращения испытуемых двигателей в рабочих и переходных режимах тахогенераторы соединяются жестко с двигателем и включаются на точный регистрирующий прибор: либо вольтметр (при установленном режиме), либо шлейф осциллографа для записи $n = f(t)$ (в переходных режимах).

Точность измерения частоты вращения с помощью тахогенератора определяется точностью частоты регистрирующего прибора и самого тахогенератора.

Стробоскопический способ. Для измерения частоты вращения микромашин наилучшим является стробоскопический способ. Сущность этого способа заключается в том, что вращающаяся деталь (вала испытуемого двигателя) освещается прерывистым (с определенной частотой) светом неоновой или ртутной лампы. При этом глаз человека не успевает заметить движение объекта в момент вспышки. Если число оборотов объекта (вала испытуемого двигателя) и число вспышек лампы за один и тот же промежуток времени равны между собой, то объект кажется неподвижным. Если частота вспышек лампы в единицу времени больше, чем число оборотов объекта, то последний представляется наблюдателю вращающимся с некоторой скоростью в направлении, обратном действительному; если же частота вспышек меньше, то объект кажется вращающимся в направлении его действительного вращения.

Строботахометр (стробоскоп) обычно представляет собой ламповый генератор регулируемой частоты, питающий осветительную лампу и имеющий шкалу частоты, градуированную в числах оборотов в минуту. Лампа монтируется в рефлектор. Строботахометр является удобным переносным прибором, дающим возможность достаточно точно измерять частоту вращения, не нагружая испытуемый двигатель. Он позволяет также измерять скольжение асинхронных машин, угол θ синхронных машин (при синхронизации с сетью), скорость механизмов, имеющих – возвратно-поступательное движение, и частоту вибраций.

Датчик частоты. Частота вращения электродвигателей может быть измерена с помощью специального датчика частоты.

Принцип работы основан на преобразовании угловой частоты вращения в электрические импульсы и измерения частоты следования этих импульсов. Система состоит из фотоэлектрического датчика-преобразователя частоты вращения и тахометра ЦАТ-2М (либо аналогичного).

Фотоэлектрический датчик-преобразователь ФДП представляет собой электронно-оптическое устройство. Работа ФДП основана на преобразовании промодулированного светового потока в электрические импульсы, частота следования которых пропорциональна частоте вращения. Сфокусированный световой поток с осветителя отправляется на поверхность диска с отверстиями, который непосредственно прикреплен на вращающемся объекте. Световой поток,

попадающий на рабочую поверхность фоточувствительного элемента через отверстия диска, оказывается промодулированным по интенсивности. В качестве фоточувствительного элемента применен германиевый фотодиод ФД-1. Под действием светового потока изменяется электрический ток во внешней цепи фотодиода и создает падение напряжения на сопротивлении; включенным последовательно с фотодиодом. Полученные электрические импульсы подаются на формирователь, где усиливаются и формируются в прямоугольные импульсы. Электрические импульсы с выхода формирователя подаются на вход цифрового автоматического тахометра ЦАТ-2М, который регистрирует на цифровом табло число этих импульсов за фиксированный интервал времени.

Показания счетчика прямо пропорциональны угловой частоте вращения n (об/сек), числу импульсов за один оборот – « C » и времени отсчета – $t_{отсчета}$.

$$A = n \cdot C \cdot t_{отсчета} .$$

Если $C = 1$ и $t_{отсчета} = 1$ сек., тогда показания счетчика $A = n$, об/сек. При $C = 60$ и $t_{отсчета} = 1$ сек., показания счетчика $A = n$, об/мин.

3 Испытание тахогенераторов

Тахогенераторами (ТГ) называются электрические микромашины, предназначенные для преобразования механической величины в электрический сигнал. Они применяются:

- 1) для получения демпфирующих и форсирующих сигналов в схемах автоматической обработки;
- 2) при вычислительных операциях в счетно-решающих системах;
- 3) для контроля за частотой вращения различных машин и механизмов;
- 4) для исследования процессов разбега двигателей различных типов, т.е. для снятия кривой скорости в функции времени.

Существуют тахогенераторы переменного (асинхронные и синхронные) и постоянного тока (с независимым возбуждением или постоянными магнитами).

По назначению в автоматических устройствах тахогенераторы можно разделить на две группы:

- 1) демпфирующие или форсирующие – для обратных связей;
- 2) точные (измерительные) – для дифференцирующих и интегрирующих звеньев в счетно-решающих устройствах.

Требования к выходным характеристикам тахогенераторов указанных групп различны. Так, к тахогенераторам, предназначенным для работы в качестве элементов обратной связи, часто не предъявляются требования высокой точности (линейности выходной характеристики), однако требуется большая крутизна выходной характеристики. От второй же группы тахогенераторов требуется, главным образом, высокая точность.

Главным техническим показателем качества работы любого типа тахогенератора является линейность выходной характеристики, представляющей зависимость выходного напряжения от частоты вращения $U = f(n)$ или $u = f(v)$, где $v = \frac{n}{n_n}$ – относительная скорость вращения (n_n – номинальная частота вращения); $u = \frac{U}{U_n}$ – относительное выходное напряжение (U_n – номинальное напряжение).

В тахогенераторе любого типа происходит дифференцирование углового перемещения, основанное на том, что ЭДС, индуцируемая при постоянном потоке Φ , пропорциональна частоте вращения машины:

$$E = c_1 \left(\frac{d\alpha}{dt} \right) = c_e n \Phi \quad (3.1)$$

- где E – выходная ЭДС тахогенератора, В;
 c_1, c_e – коэффициенты пропорциональности;
 n – угловая частота вращения, об/мин;
 α – угол поворота, град.

Только в «идеальном» тахогенераторе зависимость выходной ЭДС или выходного напряжения от частоты вращения можно считать строго линейной. У реального же тахогенератора имеют место погрешности выходных величин, вызванные рядом факторов:

- 1) электромагнитной реакцией якоря (или ротора);
- 2) изменением параметров (сопротивления обмоток) под влиянием температуры, насыщения и других причин;
- 3) изменением некоторых параметров в функции частоты вращения (например, сопротивления полого ротора);
- 4) падением напряжения при включении выходной обмотки на нагрузку;
- 5) неизбежными технологическими неточностями при изготовлении.

4 Лабораторная работа № 1. Испытание тахогенератора постоянного тока

4.1 Общие сведения

Цель настоящей работы состоит в исследовании свойств тахогенератора постоянного тока. ТГ постоянного тока представляет собой коллекторную электрическую машину постоянного тока с возбуждением либо от постоянного магнита, либо с помощью обмотки, расположенной на явно выраженных неподвижных полюсах (независимое возбуждение).

По сравнению с тахогенератором переменного тока он имеет ряд существенных недостатков:

- 1) наличие скользящих контактов между коллектором и щётками;
- 2) коммутационное искрение под щётками;
- 3) коллекторные биения;
- 4) необходимость устройства фильтров от радиопомех;
- 5) большая сложность конструкции;
- 6) более высокая стоимость.

Однако применение ТГ постоянного тока оправдывается прежде всего в таких системах, где требуется независимость выходного напряжения от характера нагрузки. Существенным достоинством ТГ с постоянными магнитами является отсутствие постороннего источника энергии для возбуждения и малое влияние нагрева на выходную характеристику.

Рассмотрим основные технические показатели ТГ постоянного тока. Уравнение выходной характеристики тахогенератора при нагрузке R_H с учётом влияния реакции якоря и падения напряжения в щёточном контакте может быть представлено в виде:

$$U = \frac{c_e n}{1 + (r_a + kn)/R_H} - \frac{\Delta U_{щ}}{1 + (r_a + kn)/R_H}, \quad (4.1)$$

где: c_e – коэффициент пропорциональности между ЭДС и частотой вращения при холостом ходе ($R_H = \infty$);

k – коэффициент, учитывающий связь потока реакции якоря с током;

$\Delta U_{щ}$ – падение напряжения в щёточном контакте;

r_a – сопротивление цепи якоря.

В идеальном случае, при отсутствии реакции якоря и падения напряжения в щёточном контакте, выходная характеристика тахогенератора представляется прямой линией:

$$U = c_1 n, \quad (4.2)$$

где $c_1 = k_1 \Phi / (1 + r_a / R_H)$

k_1 – коэффициент пропорциональности между потоком, ЭДС и частотой вращения при нагрузке при нагрузке ($R_H \neq \infty$).

Относительная погрешность тахогенератора:

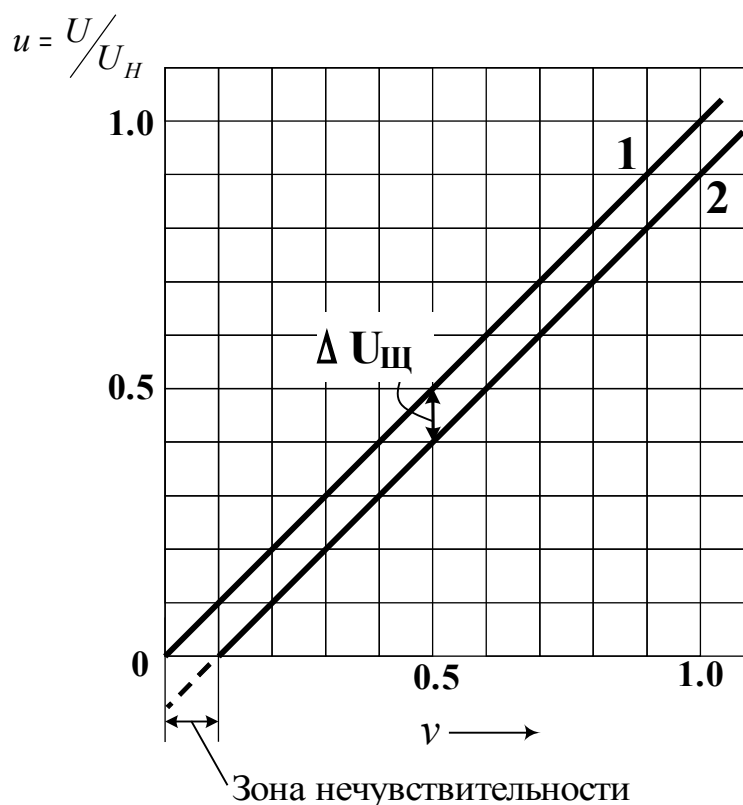
$$\Delta_U = (U_i - U) / U_i \quad (4.3)$$

Качество работы ТГ постоянного тока определяется основными техническими показателями – линейностью и крутизной выходной характеристики – и такими отличительными особенностями тахогенератора постоянного тока, как асимметрия выходного напряжения и зона нечувствительности.

В тахогенераторах постоянного тока погрешности выходной характеристики обуславливаются главным образом действием реакции якоря, температуры и насыщения. Отклонение от линейности при максимальной рабочей частоте вращения у современных машин отечественного производства составляет $\Delta_U = \pm (0,5 - 3) \%$.

Крутизна выходной характеристики у современных тахогенераторов постоянного тока $k_U = 5 - 100$ мВ/(об/мин) и выше (меньшие значения относятся к тахогенераторам с постоянными магнитами).

Важными техническими показателями качества работы тахогенератора постоянного тока является асимметрия выходного напряжения тахогенератора, представляющая собой разность между выходной ЭДС (напряжением) при правом и левом направлении вращения, обусловленная главным образом технологическими факторами и точностью установки щёток на нейтрали.



- 1 – без учета $\Delta U_{Щ}$;
- 2 – с учетом $\Delta U_{Щ}$.

Рисунок 4.1 – Выходные характеристики тахогенератора постоянного тока

В выходной характеристике $u = f(v)$ при малых частотах вращения существует зона нечувствительности, в которой выходное напряжение вращающегося тахогенератора равно нулю. Вследствие этого выходная характеристика смещается вправо (рисунок 4.1). Это смещение обусловлено падением напряжения в щёточном контакте, и при малых частотах вращения становится соизмеримом с ЭДС вращения (первый член в уравнении (4.1)).

Цель работы состоит в исследовании основных свойств тахогенератора постоянного тока с независимым возбуждением.

4.2 Задание

4.2.1 Ознакомиться с конструкцией тахогенератора и его техническими данными;

4.2.2 Снять выходные характеристики:

а) при холостом ходе: $R_{H1} = R_{ПР} \approx \infty$;

б) при сопротивлении нагрузки $R_{H2} = 200, 500, 1000$ Ом в диапазоне рабочих скоростей вращения от 0 до $1,25 \cdot n_H$;

4.2.3 Определить зону нечувствительности;

4.2.4 Снять зависимость выходного напряжения от сопротивления нагрузки $U = f(R)$ при $n = n_H$;

4.2.5 Определить асимметрию выходного напряжения $\Delta U_{ac}, \%$;

4.2.6 Построить выходные характеристики тахогенератора $U=f(n)$:

а) при холостом ходе $R_{H1} = R_{ПР} \approx \infty$;

б) при сопротивлении нагрузки $R_{H2} = 200, 500, 1000$ Ом для диапазона рабочих скоростей вращения от 0 до $1,25 \cdot n_H$. Рассчитать крутизну k_U при $R_H \approx \infty$;

4.2.7 Показать на графиках $U=f(n)$ зону нечувствительности:

а) при холостом ходе: $R_H = R_{ПР} \approx \infty$;

б) при сопротивлении нагрузки $R_H = 200, 500, 1000$ Ом;

4.2.8 Построить зависимость выходного напряжения от сопротивления нагрузки $U=f(R)$ при $n = n_H$;

4.2.9 Рассчитать величину асимметрии выходного напряжения.

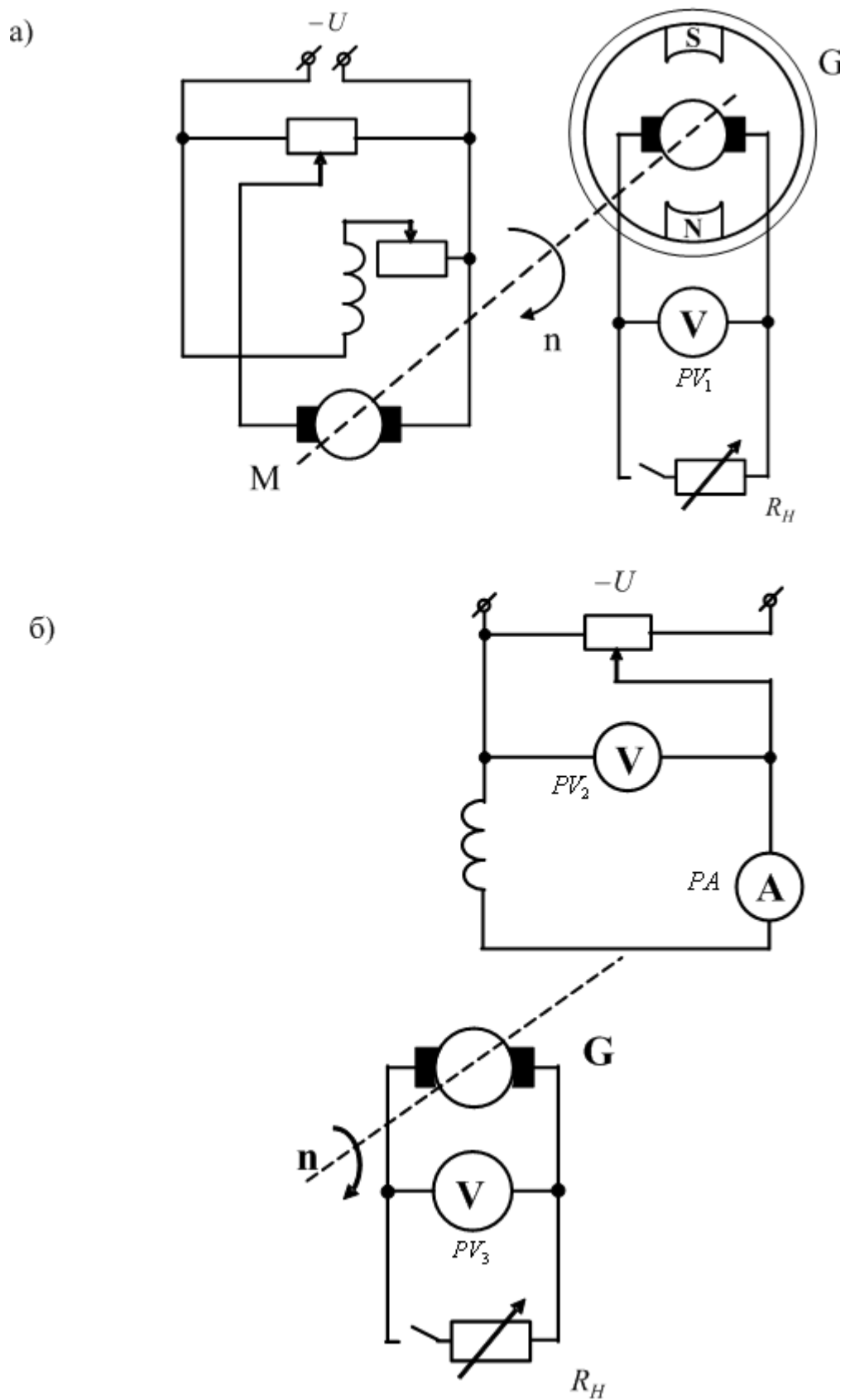
4.3 Методические указания

Схема для испытания тахогенератора постоянного тока представлена на рисунке 4.2.

Вольтметр для измерения выходного напряжения должен иметь большое сопротивление.

При номинальной рабочей частоте вращения определяется выходное напряжение; крутизна выходной характеристики, мВ/(об/мин), рассчитывается как

$$k_U = U / n_{\max} \quad (4.4)$$



а) тахогенератор с постоянными магнитами;
 б) тахогенератор с независимым возбуждением.

Рисунок 4.2 – Схема для испытания тахогенератора постоянного тока

Выходные характеристики, т.е. зависимости выходного напряжения на якорной обмотке от частоты вращения $U=f(n)$, снимаются при различных сопротивлениях нагрузки R_H :

а) в режиме холостого хода: $R_{H1} = R_{HP} \approx \infty$;

б) $R_{H2} = 200, 500, 1000$ Ом.

У тахогенератора с независимым возбуждением при получении выходной характеристики поддерживается постоянное напряжение возбуждения, равное номинальному. По характеристикам определяется крутизна k_U .

При получении выходных характеристик следует наиболее тщательно выявить зависимость $U=f(n)$ в области малых частот вращения и определить протяженность зоны нечувствительности, в которой вращающийся тахогенератор не даёт напряжения.

Асимметрия выходного напряжения тахогенератора постоянного тока определяется как отношение разности между значениями напряжения на генераторной обмотке при правом и левом направлении вращения к среднему значению выходного напряжения, [%]:

$$\Delta U_{ac} = 2 \frac{U_{прав} - U_{лев}}{U_{прав} + U_{лев}} \cdot 100 \%, \quad (4.5)$$

где: $U_{прав}$, $U_{лев}$ – выходное напряжение при правом и левом направлении вращения якоря.

Асимметрия напряжения проверяется только при номинальной (максимальной) рабочей частоте вращения.

4.4 Анализ результатов исследований

Основные требования в отношении точности тахогенератора постоянного тока следующие:

- 1) линейность выходной характеристики;
- 2) минимальная асимметрия выходного напряжения при изменении направления вращения;
- 3) малое влияние на выходную характеристику изменения температуры и величины нагрузки;
- 4) минимум пульсаций напряжений на коллекторе.

Из анализа уравнения (4.1) следует, что при уменьшении сопротивления нагрузки зависимость выходного напряжения от частоты вращения отклоняется от линейной. Основные причины нарушения линейности выходной характеристики – реакция якоря и падение напряжения в якорной цепи, которые возрастают с увеличением тока нагрузки (при уменьшении R_H). Следовательно, точность тахогенератора постоянного тока возрастает с увеличением сопротивления нагрузки.

Падение напряжения в щёточном контакте при малых частотах вращения может быть соизмеримо с индуктируемой в якоре ЭДС. Это приводит к

смещению выходной характеристики, т.е. к образованию зоны нечувствительности (от $n = 0$ до n_{\min}), где выходное напряжение равно нулю.

Для уменьшения зоны нечувствительности применяют мягкие щётки (например, медно-графитовые, серебряно-графитовые, а в прецизионных тахогенераторах применяют щётки с серебряными и золотыми напайками). Вследствие неточной установки щеток на геометрической нейтрали, а также за счёт смещения их при эксплуатации возникает несимметрия выходного напряжения при изменении направления вращения якоря. У современных ТГ ошибка асимметрии не превышает 1 – 3 %.

Отклонение от линейной зависимости выходного напряжения от частоты вращения связано также с изменением потока возбуждения при изменениях температуры окружающей среды. Особенно чувствительны к влиянию температуры ТГ с электромагнитным возбуждением. В них при изменении температуры обмотки возбуждения изменяется ток возбуждения, а, следовательно, и поток. Для уменьшения влияния температуры магнитную систему ТГ делают сильно насыщенной. Но это приводит к увеличению размагничивающего действия реакции якоря, а потому в ТГ, работающих на номинальную нагрузку, это недопустимо.

В ТГ с постоянными магнитами практически отсутствует влияние температуры окружающей среды на величину магнитного потока постоянных магнитов.

Одной из серьезных погрешностей ТГ постоянного тока являются пульсации выходного напряжения – коллекторные, зубцовые и якорные. Причины возникновения пульсаций выходного напряжения связаны чаще всего с эксцентриситетом и эллиптичностью якоря, неравномерностью магнитных свойств материала якоря в разных направлениях, вибрацией щеток и др. Основные средства уменьшения пульсаций в соответствии с характером последних следующие:

- 1) для якорных пульсаций – увеличение воздушного зазора, «веерная» сборка пакета, точность изготовления якоря;
- 2) для зубцовых – скос пазов, правильный выбор числа пазов и ширины полюсного наконечника, применение магнитных клиньев;
- 3) для коллекторных – выбор большого числа коллекторных пластин, надежная конструкция, правильный выбор сорта щеток и уход за ними.

Сравнительная оценка свойств двух типов ТГ постоянного тока позволяет выяснить следующие преимущества ТГ с постоянными магнитами:

- 1) отсутствие источника постоянного тока для возбуждения;
- 2) меньшие габариты;
- 3) отсутствие влияния температуры на магнитный поток.

Сравнивая свойства ТГ постоянного тока и асинхронного, следует отметить, важное преимущество первого – отсутствие фазовой погрешности. Однако наличие коллектора и щеток снижает точность ТГ постоянного тока. Кроме того, ТГ постоянного тока являются источниками радиопомех и щеточных шумов.

4.5 Контрольные вопросы

4.5.1 Какие способы возбуждения могут быть у тахогенератора постоянного тока?

4.5.2 Как влияет величина тока в якоре тахогенератора на линейность выходной характеристики?

4.5.3 Какой тахогенератор постоянного тока целесообразней применять при изменениях окружающей температуры и почему?

4.5.4 Как влияет величина тока в якоре тахогенератора постоянного тока на крутизну выходной характеристики?

4.5.5 Какие щеточные контакты следует применять у тахогенератора постоянного тока и почему?

4.5.6 Что такое зона нечувствительности у тахогенератора постоянного тока и как её уменьшить?

4.5.7 Дайте сравнительную характеристику свойств двух типов ТГ постоянного тока: с электромагнитным возбуждением и с возбуждением от постоянных магнитов.

4.5.8 Что такое ошибка асимметрии тахогенератора постоянного тока? Укажите средства её уменьшения.

4.5.9 Какие виды пульсаций возможны у ТГ постоянного тока? Укажите их причины.

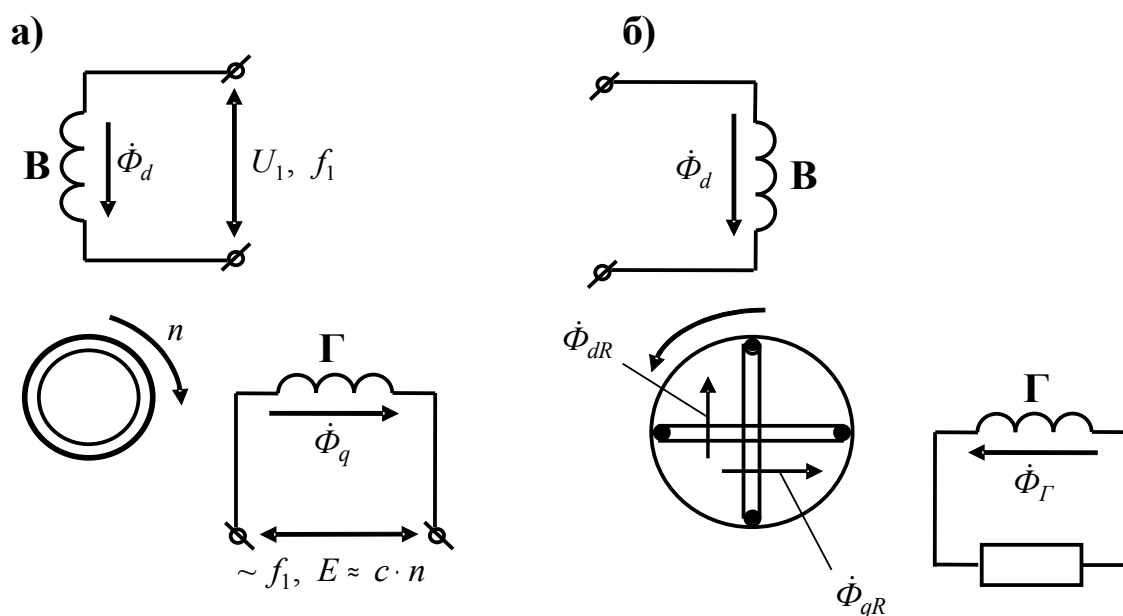
4.5.10 Перечислите способы уменьшения отдельных видов пульсаций.

5 Лабораторная работа № 2. Испытание асинхронного тахогенератора с полым ротором

5.1 Общие сведения

Конструктивно тахогенератор с полым ротором не отличается от двигателя подобного типа. Только ротор асинхронного тахогенератора высокой точности выполняется из материала с большим удельным сопротивлением, а также с малым температурным коэффициентом сопротивления $\alpha \leq 10^{-4} - 10^{-5}$ Ом/°С (например, из фосфористой, марганцевистой бронзы или из сплавов типа манганин, нейсильбер). У менее точных тахогенераторов ротор выполняется также, как у исполнительного двигателя из алюминиевого сплава.

Тахогенератор (рисунок 5.1 и 5.2) имеет два статора (внешний и внутренний), на одном из которых расположены две однофазные обмотки, сдвинутые на угол 90 эл. град; **В** – обмотка возбуждения, создающая пульсирующий магнитный поток возбуждения; **Г** – выходная или генераторная обмотка, в которой наводится ЭДС, пропорциональная частоте вращения. Нередко для устранения магнитной асимметрии обмотки размещаются на двух статорах, при этом внутренний статор может поворачиваться.



а) электромагнитная схема;

б) распределение потоков статора и ротора

Рисунок 5.1 – Асинхронный тахогенератор

При неподвижном роторе (рисунок 5.1) обмотка **В** создает пульсирующий поток Φ_d , который наводит в роторе только трансформаторную ЭДС и не сцеплен с обмоткой **Г** (в случае идеального сдвига обмоток на 90 эл. град). Од-

нако точной магнитной симметрии (квадратуры осей обмоток) практически достигнуть невозможно, и часть потока Φ_d оказывается трансформаторно связанной с обмоткой Г, вызывая в ней остаточную ЭДС.

В роторе при его вращении, кроме трансформаторной ЭДС, индуцируется ЭДС вращения.

Электродвижущая сила трансформации наводится в контурах ротора, расположенных в плоскости, перпендикулярной потоку возбуждения Φ_d . Ток этих контуров создает продольный поток реакции ротора Φ_{dR} , направленный на встречу потоку возбуждения. Электродвижущая сила вращения наводится в контурах ротора, плоскости которых параллельны потоку возбуждения. Ток этих контуров создаст поперечный ротора Φ_{qR} , сцепленный с генераторной обмоткой Г. Этот поток, ЭДС ротора, ток и ЭДС в обмотке Г пропорциональны частоте вращения, а частота их равна частоте потока возбуждения.

Уравнение выходной характеристики $U = f(v)$ асинхронного тахогенератора может быть записано в комплексной форме:

$$\dot{U} = \frac{jk\dot{U}_B v}{(\dot{A} - \dot{B}v^2)}, \quad (5.1)$$

где \dot{U} – выходное напряжение;

\dot{U}_B – напряжение обмотки возбуждения;

$k = w_{\Delta} / w_{\Delta,B}$ – отношение эффективных витков обмоток статора («условный» коэффициент трансформации);

\dot{A} и \dot{B} – комплексные коэффициенты, зависящие от параметров схемы замещения тахогенератора;

$v = \frac{n}{n_c}$ – относительная частота вращения.

Как видно из (5.1) линейность выходной характеристики нарушает член, содержащийся в знаменателе и зависящий от квадрата частоты вращения. Происхождение этого фактора нелинейности обусловлено, прежде всего, непостоянством потока возбуждения, а также изменением сопротивления ротора r_R при изменении частоты вращения.

Для получения линейности выходной характеристики, т.е. для уменьшения погрешности, при проектировании тахогенератора принимаются меры по уменьшению либо коэффициента \dot{B} , либо относительной частоты вращения v . Без учета индуктивного сопротивления ротора ($X_R = 0$) коэффициент

$$\dot{B} = \frac{k^2}{Z_H} \cdot \frac{Z_R^2}{r_R} + \frac{Z_S}{r_R} \quad (5.2)$$

где Z_R – полное сопротивление ротора;

Z_S - полное сопротивление статора.

При заданной нагрузке ($Z_H \neq \infty$) уменьшить \dot{B} можно за счет увеличения активного сопротивления ротора r_R путем применения материала с высоким удельным сопротивлением и уменьшения полного сопротивления статора Z_S . Однако следует иметь в виду, что уменьшение Z_S сопряжено с увеличением площади паза, т.е. размеров машины.

Как правило, тахогенераторы (особенно из категории точных) в схемах автоматики работают в режиме холостого хода (при $Z_H = \infty$). Следовательно уменьшение коэффициента \dot{B} достигается в основном за счет увеличения сопротивления ротора. С целью уменьшения отклонения от линейности выходной характеристики за счет значительного уменьшения v^2 более выгодно исполнение тахогенераторов на повышенную частоту f и с малым числом полюсов $2p$, т.к. при этом относительная частота вращения будет меньше:

$$v = \frac{n}{n_c} = \frac{np}{60f} \quad (5.3)$$

Максимальная рабочая частота вращения тахогенератора принимается за номинальную; её соответствует номинальное выходное напряжение. В современных асинхронных тахогенераторах диапазон рабочих частот вращения (в относительных единицах) обычно не превышает

$$v_{\text{макс}} = \frac{n_{\text{макс}}}{n_c} = 0,25.$$

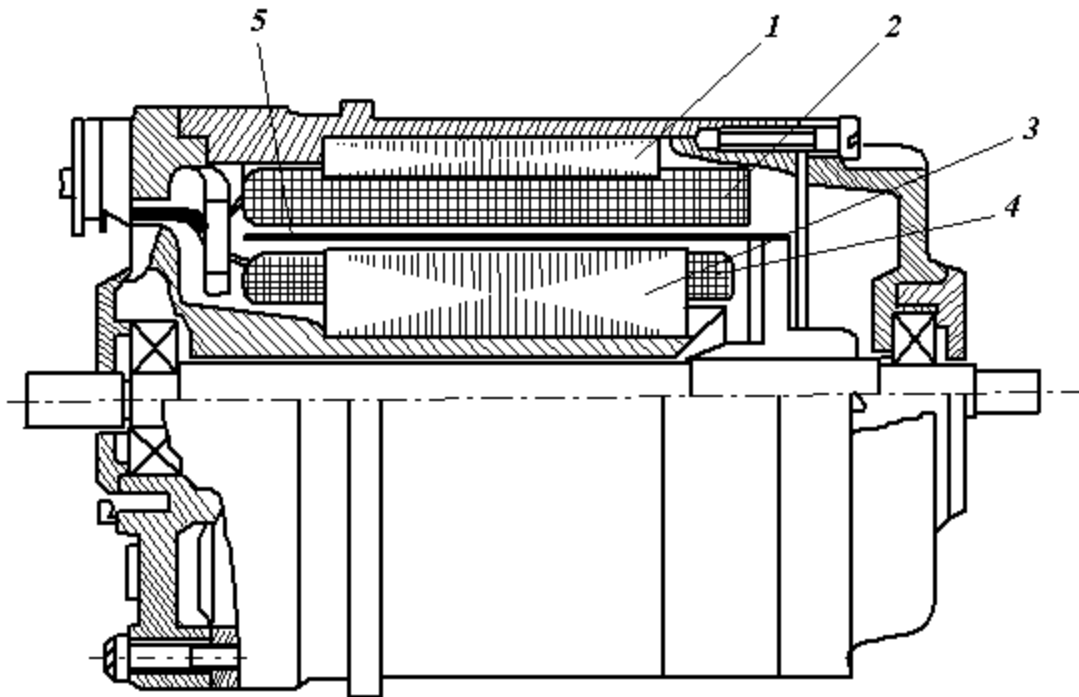
Важным техническим показателем качества работы тахогенератора является крутизна (или удельная ЭДС), т.е. ЭДС (или напряжение) тахогенератора, отнесенная к одному обороту в минуту, [мВ/(об/мин)]:

$$k_U = \frac{U}{n} = \frac{kU_B}{n_c} \cdot \frac{10^{-3}}{|\dot{A} - \dot{B}v^2|} = \frac{kU_B}{n_c} \cdot \frac{10^{-3}}{|\dot{A}|} \quad (5.4)$$

Так как комплексные коэффициенты являются функцией параметров схемы замещения, то крутизна тахогенератора зависит от изменения параметров при изменении температуры, насыщения и от других причин. У современных асинхронных тахогенераторов отечественного производства крутизна колеблется в пределах от 0,1 до 10 мВ/(об/мин) (большие значения относятся к тахогенераторам для обратных связей).

В асинхронном тахогенераторе, как и в машине переменного тока выходное напряжение с изменением частоты вращения меняется по амплитуде и фазе. Погрешность тахогенератора должна рассматриваться как величина комплексная, равная геометрической сумме амплитудной Δ_U и фазной δ_ψ погрешностей:

$$\Delta \dot{U} = \Delta U + j\delta_\psi = v^2 \frac{\dot{B}}{\dot{A} - \dot{B}v^2} \approx v^2 \frac{\dot{B}}{\dot{A}} \quad (5.5)$$



1 – внешний статор; 2 – обмотка возбуждения; 3 – внутренний статор; 4 – генераторная обмотка; 5 – полый ротор.

Рисунок 5.2 – Конструкция асинхронного тахогенератора с полым ротором типа АТ-231

Модуль полной погрешности:

$$\Delta U = \sqrt{\Delta U^2 + \delta_\psi^2} \quad (5.6)$$

Амплитудная погрешность представляет собой отклонение от линейной выходной характеристики $U = f(v)$ и оценивается в долевых единицах или в процентах. Под фазовой погрешностью понимают отклонение фазы выходного напряжения (по отношению к напряжению возбуждения) от её номинального значения; она определяется в угловых единицах (радианах или минутах). Амплитудная и фазовая погрешности зависят как от параметров самого тахогенератора, так и от величины и характера нагрузки тахогенератора.

В соответствии с тем, что главными факторами, влияющими на амплитудную и фазовую погрешности, являются частоты вращения, температура, напряжение и частота возбуждения, можно разделить погрешности ТГ на две группы:

- 1) основная скоростная – обусловлена принципом работы асинхронного тахогенератора;

- 2) дополнительные (температурная, частотная и от изменения напряжения) связаны с условиями эксплуатации ТГ в устройствах автоматики. Кроме того, у тахогенераторов могут быть погрешности, связанные с конструкцией и технологией.

Асинхронные ТГ по точности можно разделить на три подгруппы:

- 1) демпфирующие (для обратных связей) с амплитудой погрешностью от 1 до 2,5 %;
- 2) указатели скорости, применяемые в устройствах стабилизации скорости, с амплитудной погрешностью от 0,2 до 1 %;
- 3) элементы счетно-решающих устройств с амплитудной погрешностью от 0,05 до 0,2 %.

Качество работы тахогенератора в автоматических устройствах зависит также от наличия остаточной ЭДС (называемой иначе нулевым сигналом или э.д.с помех). Остаточная ЭДС (напряжение) E_0 в генераторной обмотке асинхронного тахогенератора соответствует неподвижному положению ротора ($n = 0$). Важным показателем точности является переменная составляющая остаточной ЭДС, определяемая разностью между максимальным и минимальным значениями остаточной ЭДС в пределах одного оборота ротора:

$$\Delta E_0 = E_{0.\text{макс}} - E_{0.\text{мин}} \quad (5.7)$$

У современных типов ТГ остаточная ЭДС колеблется в пределах 20 – 100 мВ, переменная составляющая – ниже 7 мВ.

Точность работы ТГ переменного тока в схемах автоматики характеризуется также статическим моментом трения, т.е. минимальным моментом, приложенным к валу ротора тахогенератора, при котором начинается медленное вращение ротора. Статический момент трения в современных тахогенераторах составляет $(2 - 10) \cdot 10^{-4}$ Н·м.

Целью работы является изучение основных средств асинхронного тахогенератора с полым ротором, качественная оценка точности ТГ и выявление зависимости выходного напряжения и его фазы от характера нагрузки.

5.2 Задание

5.2.1 Ознакомится с конструкцией и основными техническими данными тахогенератора;

5.2.2 Измерить номинальные данные обмотки возбуждения тахогенератора $P_{в.н.}$, $I_{в.н.}$, U_n , при $U_{в.н.}$, f_n , n_n и $Z_n = \infty$;

5.2.3 Определить полные сопротивления схемы замещения тахогенератора, приведенные:

- а) к обмотке возбуждения;
- б) к генераторной обмотке;

5.2.4 Определить остаточную ЭДС $E_0 = f(\theta)$ (при $n = 0$) и её переменную составляющую (θ – угол поворота ротора);

5.2.5 Снять выходные характеристики тахогенератора $U = f(n)$ при $U_B = U_{в.н.}$ в диапазоне изменения частоты вращения $0 - 1,5 n_n$:

- а) для холостого хода $Z_n = \infty$;
- б) для активной нагрузки $R_n = 200, 500, 1000$ Ом;

5.2.6 Снять зависимости выходного напряжения тахогенератора от характера нагрузки (внешние характеристики) $U = f(Z_H)$ для $n = n_n$ ($v = v_n$):

- а) при активной $U = f(R_H)$;
- б) при емкостной $U = f(X_C)$;
- в) при индуктивной $U = f(X_L)$;

5.2.7 Определить фазу выходного напряжения при $n = n_n$:

- а) для холостого хода;
- б) для активной нагрузки;
- в) для емкостной нагрузки;

5.2.8 Осуществить смещение по фазе выходного напряжения и напряжения возбуждения;

5.2.9 Построить зависимость остаточной ЭДС от угла поворота ротора $E_0 = f(\theta)$. Рассчитать переменную составляющую ЭДС ΔE_0 ;

5.2.10 Построить выходные характеристики при нормальном напряжении возбуждения $U = f(n)$ в относительных единицах:

- а) для холостого хода ($Z_n = \infty$);
- б) для активной нагрузки ($R_n = 200, 500, 1000$ Ом);

5.2.11 Построить зависимости выходного напряжения от характера и величины нагрузки:

- а) при активной $U = f(R_H)$;
- б) при емкостной $U = f(X_C)$;
- в) при индуктивной $U = f(X_L)$;

5.2.12 Рассчитать и построить зависимости крутизны тахогенератора от характера и величины нагрузки:

- а) при активной $k_U = f(R_H)$;
- б) при емкостной $k_U = f(X_C)$;
- в) при индуктивной $k_U = f(X_L)$;

- 5.2.13 Построить векторные диаграммы напряжений для определения фазы выходного напряжения при $n = n_n$:
- для холостого хода;
 - для активной нагрузки;
 - для емкостной нагрузки;
 - при включении добавочного сопротивления в цепь обмотки возбуждения.

5.3 Методические указания

В работе исследуется асинхронный тахогенератор на частоту 50 Гц. Схема для испытаний приведена на рисунке 5.3.

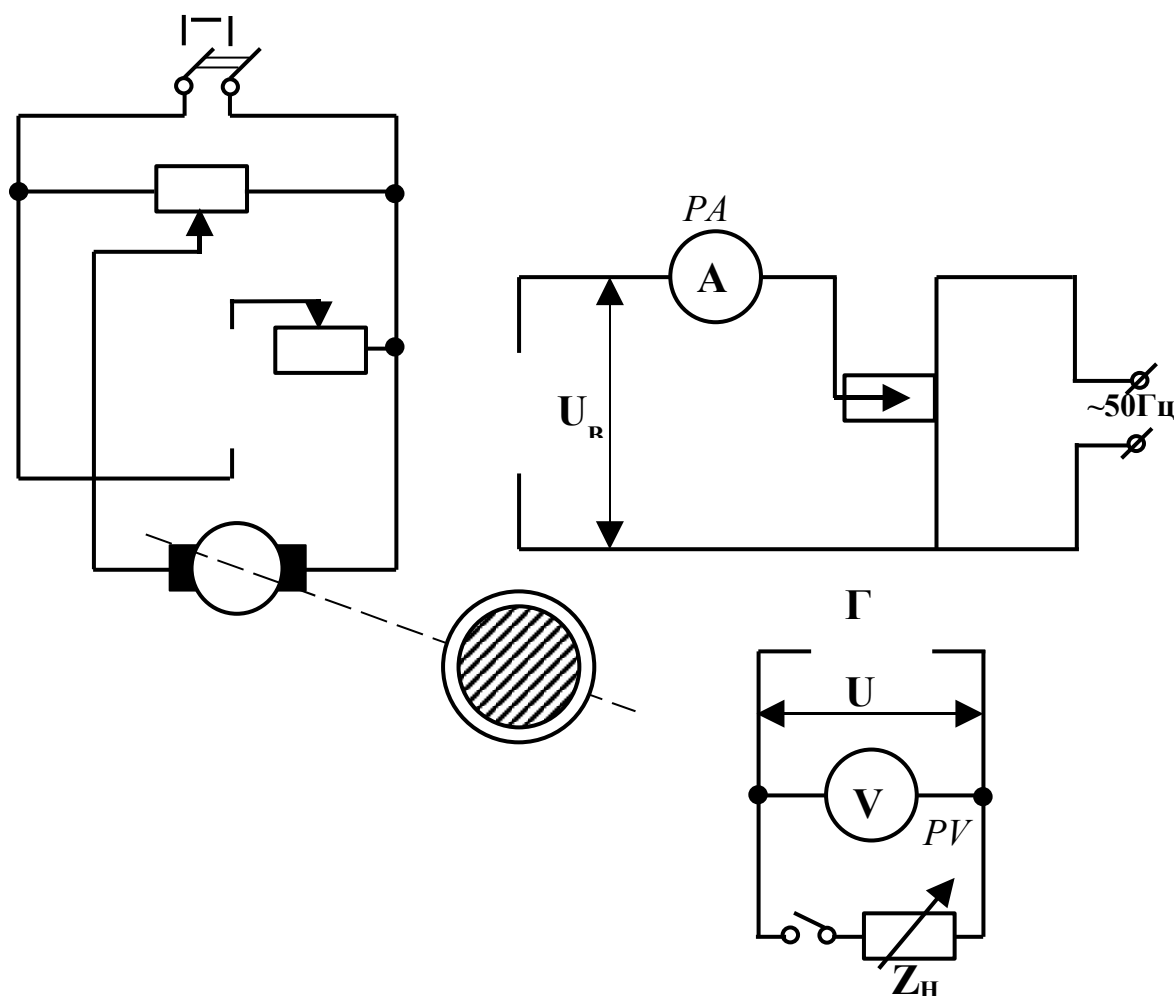


Рисунок 5.3 – Схема для испытания асинхронного тахогенератора

В качестве различного рода нагрузок для тахогенераторов с полым ротором используются магазины сопротивлений, емкостей, индуктивностей. Измерение выходного напряжения производится вольтметром с большим входным сопротивлением. Частота вращения измеряется с помощью цифрового тахогенератора.

Исследования проводятся в следующем порядке:

1) перед началом опытов необходимо ознакомиться с паспортными данными:

- а) напряжением возбуждения $U_{в.н}$;
- б) частотой f ;
- в) номинальной частотой вращения n_n ;
- г) числом полюсов машины $2p$.

При этом следует рассчитать номинальную относительную частоту вращения:

$$v_n = \frac{n_n p}{60 f}, \quad (5.8)$$

где p – число пар полюсов тахогенератора;
 f – частота сети.

2) определение тока и мощности обмотки возбуждения производится по схеме рисунка 5.3 при номинальных напряжениях и частоте возбуждения, при номинальной частоте вращения в режиме холостого хода, т.е. при разомкнутой генераторной обмотке.

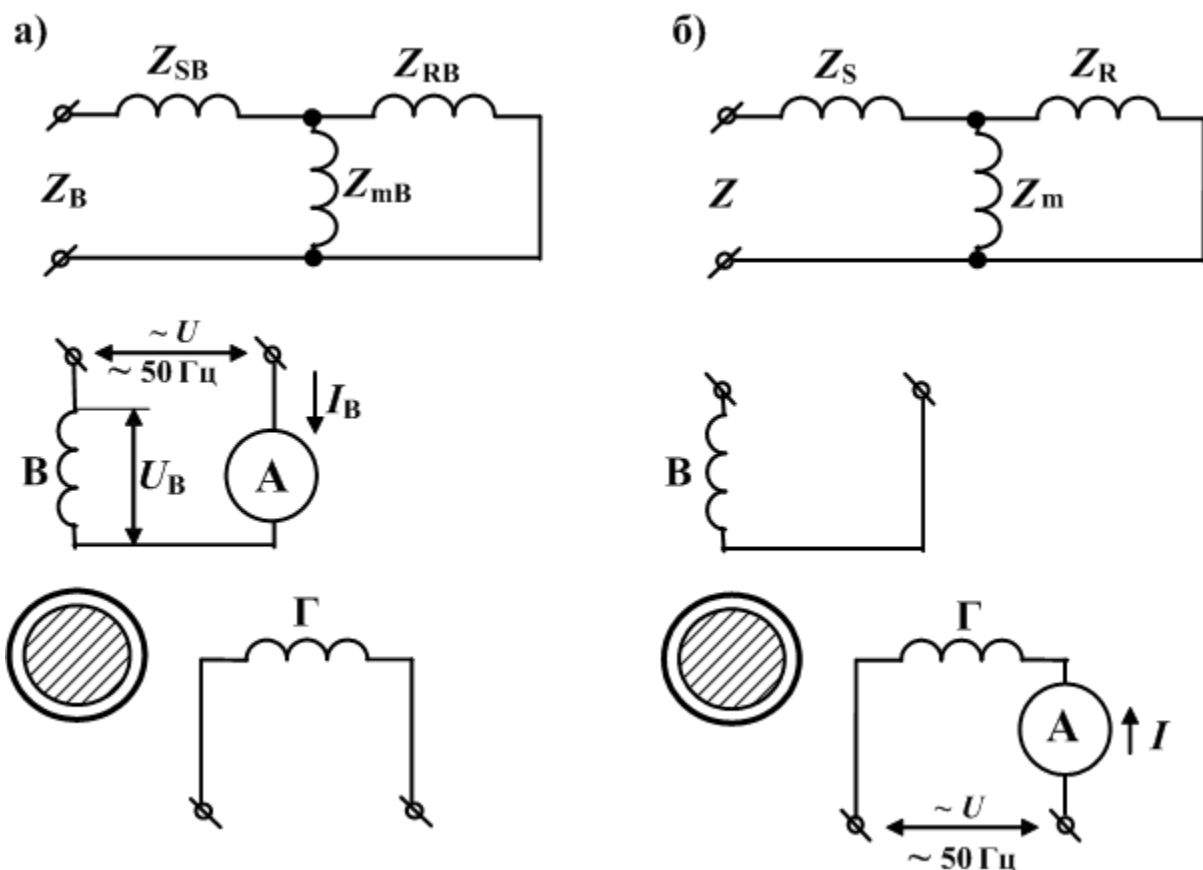
Мощность, потребляемая обмоткой возбуждения тахогенератора, измеряется ваттметром.

3) при определении полного сопротивления, приведенного к генераторной обмотке, обмотка возбуждения остается разомкнутой, а ротор неподвижным.

На генераторную обмотку подается напряжение U_n , равное выходному напряжению при номинальной частоте вращения n_n и номинальной частоте возбуждения. Полное сопротивление, приведенное к обмотке возбуждения, определяется по схеме рисунка 5.4 (а), тем же способом, как и для генераторной обмотки (последняя во время опыта остается разомкнутой). Полное сопротивление любой обмотки, Ом, определяется как $Z=U/I$.

Отношение полного сопротивления генераторной обмотки к полному сопротивлению обмотки возбуждения позволяет определить коэффициент трансформации статорных обмоток, т.е. отношение эффективных чисел витков соответствующих обмоток:

$$k = \frac{w_{\text{э}}}{w_{\text{эв}}} \approx \sqrt{\frac{Z}{Z_{\text{е}}}} \quad (5.9)$$



а) полное сопротивление обмотки возбуждения $Z_{\sigma} = U_{\sigma} / I_{\sigma}$;

б) полное сопротивление генераторной обмотки $Z = U / I$.

Рисунок 5.4 – К определению полных сопротивлений, приведенных к обмотке статора

4) исследование выходной характеристики включает качественную и количественную оценки трех основных показателей – остаточной ЭДС, линейности и крутизны, а также определяет зависимость выходного напряжения от характера нагрузки.

Определение остаточной ЭДС и её переменной составляющей. Измерение остаточной ЭДС (нулевого сигнала) производится по схеме рисунка 5.3. При неподвижном роторе тахогенератора на обмотку возбуждения подается номинальное напряжение при номинальной частоте, а генераторная обмотка включается на вольтметр с большим входным сопротивлением (режим холостого хода).

При медленном повороте ротора в пределах одного оборота фиксируются максимальное и минимальное значение ЭДС генераторной обмотки. Наибольшая величина измеренной ЭДС принимается за величину остаточной ЭДС тахогенератора. Переменная составляющая остаточной ЭДС определяется как разность между наибольшей и наименьшими величинами:

$$\Delta E_0 = E_{0\text{макс}} - E_{0\text{мин}} .$$

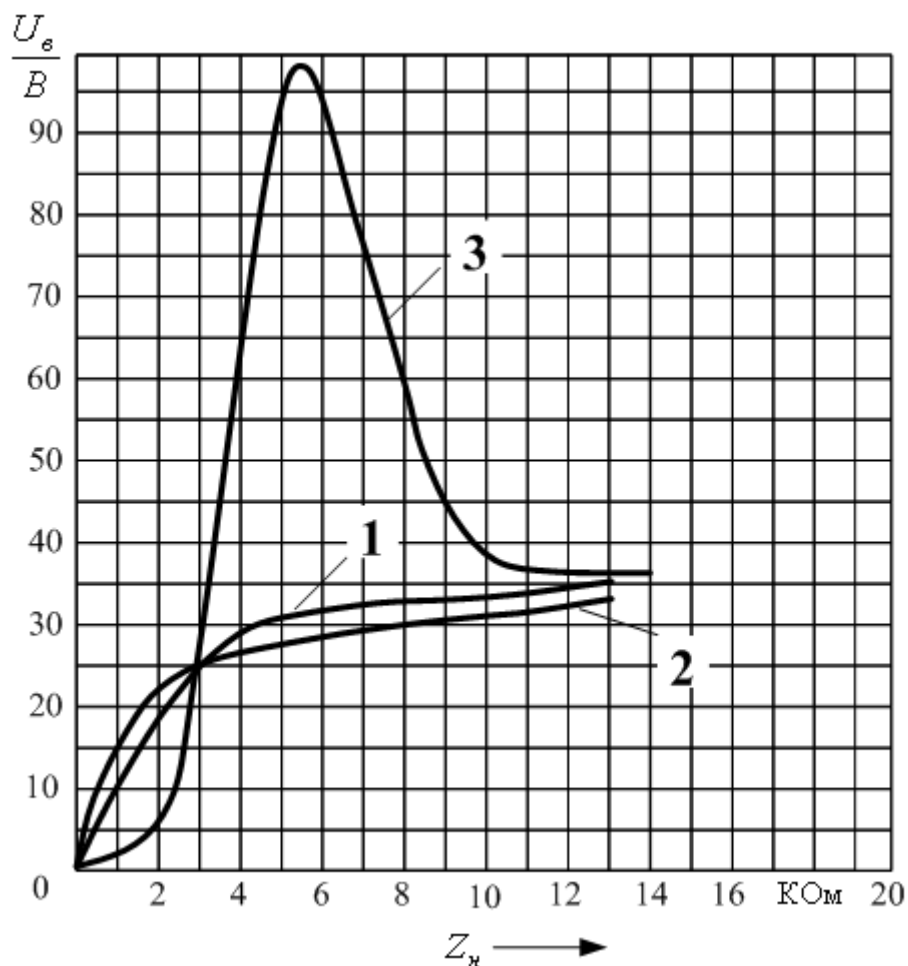
Выходные характеристики снимаются для двух режимов:

- 1) в режиме холостого хода $Z_n = \infty$ (при включении генераторной обмотки на высокоомный вольтметр) и при номинальном напряжении возбуждения ($U_e = U_{e.n}$);
- 2) при активной нагрузке $R_n = 200, 500, 1000$ Ом и при номинальном напряжении возбуждения ($U_e = U_{e.n}$).

Выходные характеристики снимаются в диапазоне рабочих частот вращения от 0 до $1,5 \cdot v_n$, где зависимость выходного напряжения от частоты вращения у точных генераторов практически линейна ($\Delta U \leq 0,1 - 0,2 \%$).

Внешние характеристики. Для выполнения зависимости выходного напряжения тахогенератора от характера нагрузки следует снять внешние характеристики $U = f(Z)$ при чисто активных, индуктивных и емкостных сопротивлениях нагрузки (8 – 10 точек в каждой характеристике).

Расчет емкости в соответствии с указанными пределами сопротивлений нагрузки от 500 до 10000 Ом производится по формуле $C = 10^6 / (2 \cdot \pi \cdot f \cdot X_C)$, где C – емкость, мкФ; X_C – емкостное сопротивление, Ом.



- 1 – при активной нагрузке;
- 2 – при индуктивной нагрузке;
- 3 – при емкостной нагрузке.

Рисунок 5.5 – Опытные внешние характеристики асинхронного ТГ $U = f(Z_n)$ при $n = \text{const}$ и $U_e = \text{const} = U_{e.n}$.

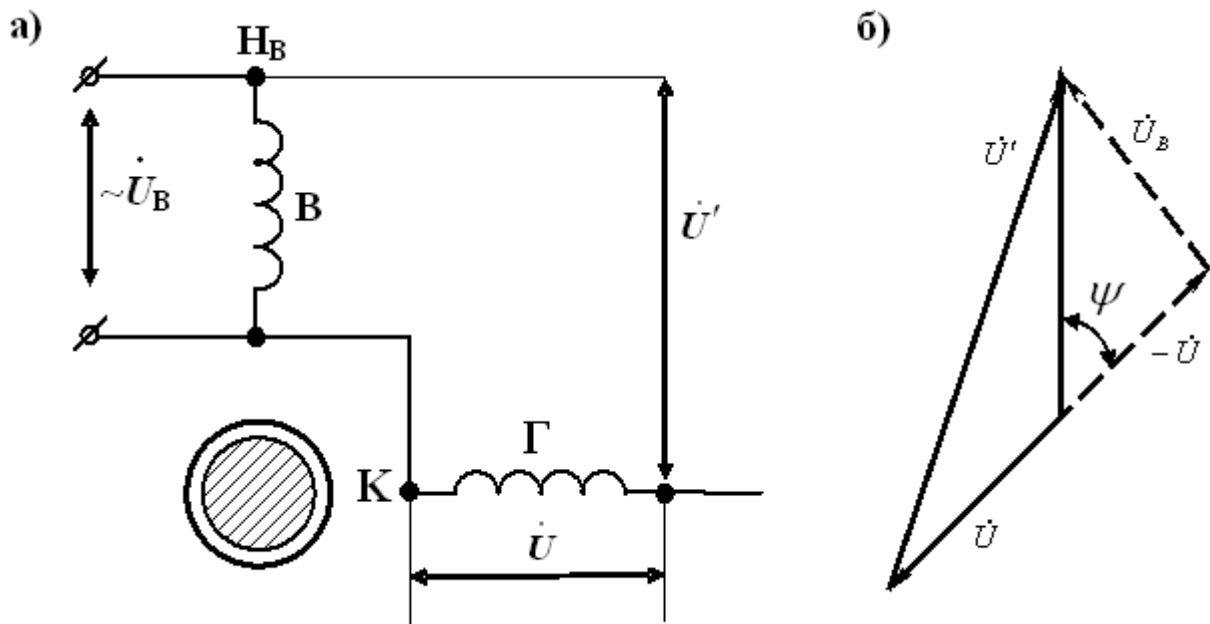


Рисунок 5.6 – К вопросу об измерении фазы выходного напряжения

Расчет индуктивности производится по формуле $L = X_L / (2 \cdot \pi \cdot f)$, Гн.

Определение крутизны. Крутизна выходной характеристики при номинальной рабочей частоте вращения может быть определена из внешних характеристик (рисунок 5.5) тахогенератора при разных нагрузках (R , X_L , X_C) и из выходной характеристики при $Z = \infty$ как отношение $k_U = U / n_H$, мВ/(Об/мин), где k_U – крутизна характеристики; U – выходное напряжение при номинальной частоте вращения.

5. При определении фазы выходного напряжения необходимо соединить обмотки тахогенератора по схеме рисунка 5.6 (а). Измерив три напряжения $\dot{U}_B, \dot{U}, \dot{U}'$ следует построить треугольник напряжений (рисунок 5.6 (б)), из которого можно найти угол сдвига фаз ψ между \dot{U} и \dot{U}_B . Определяется этот угол при $Z_n = \infty$; $Z_n = R_n = 500$, Ом и $Z_n = X_C = 500$, Ом.

Используя схему соединения обмоток для определения фазы можно определить величину добавочного сопротивления, включаемого в цепь возбуждения и необходимо для совмещения по фазе напряжений \dot{U} и \dot{U}_B . При этом следует определить крутизну ТГ. Величину фазы можно определить также с помощью катодного осциллографа, подавая \dot{U} и \dot{U}_B на его пластины.

5.4 Анализ результатов исследований

Для анализа свойств асинхронного тахогенератора опытные данные следует свести в таблицу 5.1 и представить в виде графиков.

Из сравнения выходных характеристик тахогенератора $u = f(v)$ при $Z_n = \infty$ и $R_n = 500$ Ом в о.е., где $u = U / U_n$ и данных таблицы 5.1 следует, что крутизна тахогенератора k_U при уменьшении сопротивления нагрузки резко

уменьшается вследствие увеличения падения напряжения в генераторной обмотке и уменьшения потока по её оси из-за реакции якоря.

Таблица 5.1

Наименование величины	При сопротивлениях нагрузки				При добавочном сопротивлении в обмотке возбуждения
	$Z_n = \infty$	$Z_n = R_n$	$Z_n = X_C$	$Z_n = X_L$	
Крутизна k_U , мВ/(об/мин)					
Фаза выходного напряжения ψ , эл. град.					
Постоянная составляющая остаточной ЭДС E , мВ					
Переменная составляющая остаточной ЭДС ΔE , мВ					

Опытное определение погрешностей асинхронного тахогенератора (т.е. оценка его точности) является сложной задачей. Для определения амплитудной погрешности, т.е. количественной оценки степени линейности выходной характеристики, необходимо применение специальных композиционных схем для точного измерения выходного напряжения. Кроме того, следует точно задать стабилизированные частоты вращения в рабочем диапазоне.

Опытное определение точности асинхронного тахогенератора составляет специальную задачу исследования и поэтому выходит за пределы настоящей лабораторной работы.

Внешние характеристики асинхронного тахогенератора при различном характере нагрузки и постоянной частоте вращения представлены на рисунке 5.6. Из рисунка видно, что при активной и индуктивной нагрузках зависимости U от сопротивления нагрузки почти одинаковы, а именно, и в том и в другом случаях при уменьшении сопротивления внешней цепи выходное напряжение снижается.

При чисто емкостной нагрузке с уменьшением её сопротивления напряжение сначала растет, далее при некотором значении емкости достигает максимальной величины (почти вдвое большей, чем при холостом ходе, когда $X_C \approx \infty$), а затем резко снижается. На этой особенности асинхронного тахогенератора основывается так называемое «компаундирование» при смешанной активно – емкостной нагрузке, при этом выходное напряжение (при данной частоте вращения) почти не зависит от величины сопротивления нагрузки.

Наличие остаточной ЭДС обусловлено в основном индуктивными и емкостными связями генераторной обмотки, вызванными неоднородностью материалов магнитной системы и ротора, несовершенством изготовления, конструкцией обмоток и другими причинами. Остаточная ЭДС складывается из постоянной E_o и переменной ΔE_o составляющих. Величина постоянной составляющей зависит главным образом от качества магнитной системы, а переменной – от качества ротора.

При малых частотах вращения, когда величины полезной выходной ЭДС и остаточной ЭДС соизмеримы, при изменении направления вращения ротора симметричность выходной характеристики нарушается, т.е. величина и фаза выходной ЭДС при изменении скорости меняется по-разному. Это приводит к увеличению погрешностей, особенно в реверсивных системах управления. Поэтому стремятся уменьшить величину постоянной составляющей остаточной ЭДС, применяя прежде всего размещение обмоток на разных статорах, а также различные компенсационные устройства.

Переменную составляющую остаточной ЭДС уменьшают посредством технологических операций, называемой электрическим симметрированием.

5.5 Контрольные вопросы

5.5.1 Где располагаются обмотки возбуждения и генераторная?

5.5.2 Из каких материалов и почему выполняется полый ротор ТГ?

5.5.3 Напишите и объясните уравнение выходной характеристики тахогенератора в общем виде.

5.5.4 Что такое амплитудная погрешность?

5.5.5 Что такое фазовая погрешность?

5.5.6 Какими средствами можно уменьшить погрешности тахогенератора?

5.5.7 Какую частоту имеет выходное напряжение тахогенератора? Ответ объяснить.

5.5.8 Почему у некоторых тахогенераторов для ротора выбирается материал с большим удельным сопротивлением и малым температурным коэффициентом?

5.5.9 Что такое остаточная ЭДС и какими причинами она вызывается?

5.5.10 Какие меры применяются для уменьшения остаточной ЭДС?

5.5.11 Как меняется крутизна выходной характеристики в зависимости от характера нагрузки?

5.5.12 Как влияет на величину остаточной ЭДС поворот ротора относительно статора? Объясните физику явления.

5.5.13 Как изменяется фаза выходного напряжения в зависимости от характера нагрузки?

5.5.14 Назначение тахогенератора в устройствах автоматики.

5.5.15 В каких устройствах требуется тахогенератор более высокой точности?

Список использованных источников

- 1 **Юферов, Ф.М.** Электрические машины автоматических устройств / Ф.М. Юферов. – М.: Высшая школа, 1976. – 416 с.
- 2 **Хрущев, В.В.** Электрические машины систем автоматики / В.В. Хрущев. – Л.: Энергоатомиздат, 1976. – 368 с.
- 3 **Кацман, М.М.** Электрические машины автоматических устройств / М.М. Кацман. – М.: Форум – Инфра-М, 2002. – 264 с.
- 4 Испытание электрических микромашин / Под ред. Н.В. Астахова. – М.: Высшая школа, 1984. – 272 с.
- 5 **Астахов, Н.В.** Испытание электрических микромашин / Н.В. Астахов, Б.Л. Крайз, Е.М. Лопухина и др. – М.: Высшая школа, 1973. – 220 с.
- 6 **Иванов-Смоленский, А.В.** Электрические машины / А.В. Иванов-смоленский. – М.: Энергия, 1980. – 928 с.
- 7 **Потапов, Л.А.** Измерение вращающих моментов и скоростей вращения микроэлектродвигателей / Л.А. Потапов, Ф.М. Юферов. – М.: Энергия, 1974. – 128 с.
- 8 **Гольдман, М.А.** Методические указания к лабораторным работам по электрическим микромашинам (для студентов специальности 10.04, 18.01) часть I / М.А. Гольдман, В.М. Тулупов. – Оренбург: ОрПИ, 1988. – 46 с.