

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Оренбургский государственный университет»

# **ИСПЫТАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МИКРОМАШИН**

Учебно-методическое пособие

Рекомендовано ученым советом федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Оренбургский государственный университет» для обучающихся по образовательным программам высшего образования по направлению подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Оренбург

2021

УДК 621.313(075.8)  
ББК 31.261я73  
И 88

Рецензент – д-р пед. наук, канд. техн. наук, доцент Семенова Н.Г.

Авторы: А.С. Падеев, Д.В. Сурков, И.И. Ямансарин, И.И. Гирфанов

И 88      **Испытание электрических микромашин** : учебно-методическое пособие / А.С. Падеев, Д.В. Сурков, И.И. Ямансарин, И.И. Гирфанов ; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург : ОГУ, 2021. – 100 с.  
ISBN 978-5-7410-2542-0

Учебно-методическое пособие предназначено для выполнения лабораторных работ по курсу “Электрические машины систем автоматизации” обучающимися по направлению подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника всех форм обучения.

УДК 621.313(075.8)  
ББК 31.261я73

© Падеев А.С.,  
Сурков Д.В.,  
Ямансарин И.И.,  
Гирфанов И.И., 2021  
© ОГУ, 2021

ISBN 978-5-7410-2542-0

## Содержание

Введение .....	5
1 Требования к выполнению лабораторных работ .....	6
1.1 Порядок проведения лабораторных занятий.....	6
1.2 Проведение опыта .....	7
1.3 Оформление отчета .....	8
1.4 Техника безопасности при выполнении работ.....	8
2 Методика выполнения лабораторной работы при испытании микромашин... 10	
2.1 Измерения электрических величин .....	10
2.2 Измерение неэлектрических величин .....	14
3 Испытание тахогенераторов.....	23
4 Лабораторная работа № 1. Испытание тахогенератора постоянного тока .....	25
4.1 Общие сведения.....	25
4.2 Задание .....	28
4.3 Методические указания .....	29
4.4 Анализ результатов исследований .....	31
4.5 Контрольные вопросы.....	34
5 Лабораторная работа № 2. Испытание асинхронного тахогенератора с полым ротором.....	35
5.1 Общие сведения.....	35
5.2 Задание .....	41
5.3 Методические указания .....	43
5.4 Анализ результатов исследований .....	50
5.5 Контрольные вопросы.....	52
6 Лабораторная работа № 3. Испытание сельсинов .....	54
6.1 Общие сведения, конструкция и принцип действия .....	54
6.2 Контактные сельсины .....	55
6.3 Бесконтактные сельсины конструкции Иосифьяна – Свечарника.....	58
6.4 Бесконтактные сельсины с кольцевым трансформатором.....	60
6.5 Индикаторная схема синхронной связи.....	62

6.6 Трансформаторная схема синхронной связи.....	65
6.7 Задание .....	68
6.8 Расчеты и построения .....	68
6.9 Пояснения и указания к работе. Исследование работы сельсина в индикаторном режиме .....	69
6.10 Исследование работы сельсинов в трансформаторном режиме .....	75
6.11 Анализ результатов исследований .....	80
6.12 Контрольные вопросы .....	86
7 Лабораторная работа № 4. Испытание исполнительного двигателя постоянного тока .....	87
7.1 Общие сведения.....	87
7.2 Задание .....	88
7.3 Контрольные вопросы.....	95
Список использованных источников .....	96
Приложение А Технические данные тахогенераторов .....	97

## Введение

Данные методические указания к лабораторным работам по электрическим микромашинам предназначены для обучающихся электроэнергетического факультета направления подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника, профиля «Электромеханика», а также для обучающихся других специальностей, которым в курсе «Электрические машины систем автоматики» излагается теория и устройство различных микромашин.

Практические работы в лаборатории электрических микромашин имеют цель ознакомить обучающихся с конструкцией, методикой сборки схем и испытаний электрических машин, а также научить обучающихся 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 обучающимися 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, автор посчитал 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 обучающихся.

# **1 Требования к выполнению лабораторных работ**

## **1.1 Порядок проведения лабораторных занятий**

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

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

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

На второе и последующие занятия обучающиеся 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 обучающегося к предстоящей работе. Обучающиеся, пришедшие на занятие неподготовленными или не составившие, отчет по предыдущему лабораторному занятию, к выполнению очередного лабораторного исследования не допускаются.

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

Обучающиеся, 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 обучающийся 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, обучающиеся обязаны ознакомиться с рабочим местом: щитом питания, включением и выключением напряжения на рабочем месте, выяснить величину подаваемого напряжения и его характер. В лаборатории электрических микромашин применяются напряжения величиной  $5\text{ В}$  постоянного тока,  $220\text{ В}$  и  $110\text{ В}$  переменного тока,  $50\text{ Гц}$ .

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

После такой подготовительной работы можно приступить непосредственно к проведению испытаний. Обучающиеся имеют право включить напряжение после обязательной проверки преподавателем схемы. Включив напряжение, визуальное 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 обучающийся 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 обучающийся 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 СТО 101-2015. 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 обучающегося, 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**

Обучающиеся, 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 машин малой мощности возникает необходимость проведения измерений малых величин, при том, что измерительные устройства и приборы потребляют мощности, сопоставимые с номинальной мощностью испытуемых машин. Кроме того, нагрев обмоток приводит к увеличению их активных сопротивлений, что существенно влияет на характеристики машины, поэтому испытания необходимо 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 электрических машин малой мощности, 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 электрических машин малой мощности, 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)

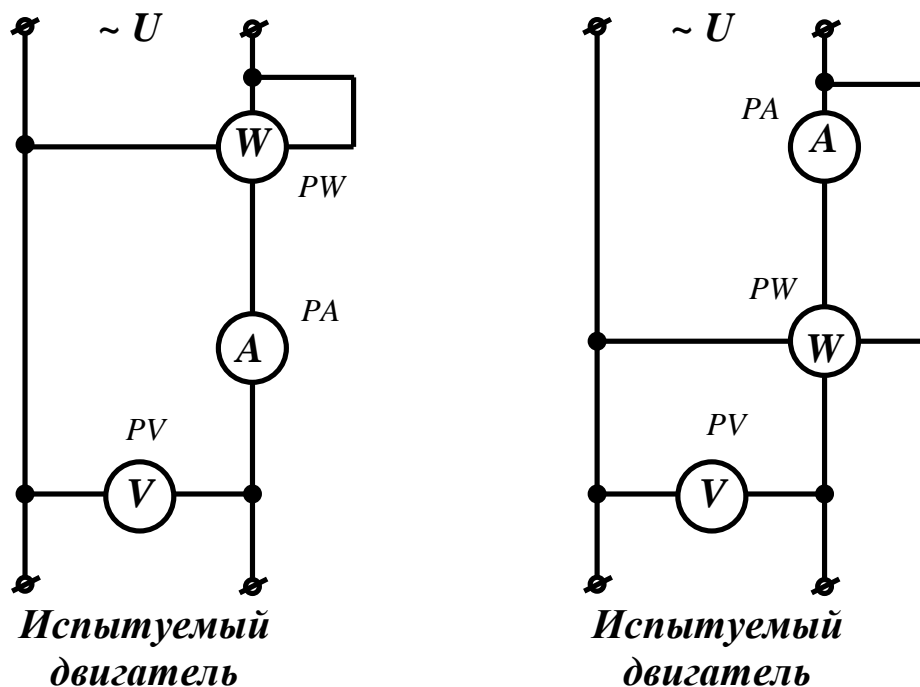


Рисунок 2.1 – Схемы для испытания электрических машин малой мощности

При испытании микродвигателей напряжением  $110 В$  рекомендуемые схемы дают погрешность измерения мощности около  $1,5\%$ , при падении напряжения в амперметре и токовой цепи ваттметра около  $2 В$ , что считается допустимым. При меньших токах нагрузки и напряжении более  $110 В$ , чем пределы измерения приборов, погрешность будет ещё меньше. Погрешность измерения мощности будет увеличиваться при напряжениях менее  $110 В$ , и для ее уменьшения в результате измерения необходимо вводить соответствующие поправки.

При исследовании электрических машин малой мощности при измерении мощности необходимо оценивать погрешность и вводить поправку на собственное потребление измерительных приборов,  $Вт$  :

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

где  $I$  – ток,  $A$ ;

$R_A, R_W$  – активные сопротивления соответственно амперметра и токовой цепи ваттметра,  $Om$ .

### 2.1.1 Измерение тока и напряжения

При измерении тока до  $1A$  рекомендуется пользоваться выпрямительными приборами, у которых по сравнению с другими потребление мощности значительно меньше. Кроме того, эти приборы – многопредельные (например  $100, 250, 1000 mA$ ) и, следовательно, позволяют исследовать различные режимы работы электрических машин малой мощности. Нижним пределом для амперметров электромагнитного и электродинамического типа можно считать  $100mA$  (по номинальному значению шкалы), но на этом пределе относительно велико собственное потребление мощности. Для измерения токов свыше  $1A$  можно пользоваться стандартными амперметрами с пределами  $2,5-5 A$  и  $5-10 A$ . При номинальном токе падение напряжения на них не превышает  $0,5-0,7 B$ .

Измерение напряжения необходимо производить высокоомными вольтметрами (внутреннее сопротивление вольтметра должно быть не менее  $500-1000 Om/B$ ), в которых можно пренебречь собственным потреблением мощности. Таким условиям удовлетворяют электронные и выпрямительные вольтметры, которые и могут быть рекомендованы для испытания электрических машин малой мощности. Выпрямительные приборы обладают большой точностью, а электронные имеют меньше собственное потребление. В настоящее время для точных исследований применяются цифровые измерительные приборы.

## 2.1.2 Измерение мощности

При измерении мощности необходимо выбирать приборы, у которых мало собственное потребление мощности, а также мала фазовая погрешность при значениях  $\cos\varphi$  в диапазоне  $0,2 - 1,0$ . 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  $0,5\text{ A}$  может быть рекомендован электродинамический ваттметр. При значениях токов менее  $0,5\text{ A}$  необходимо пользоваться специальными ваттметрами, например, электронными.

## 2.1.3 Измерение активного сопротивления и превышения температуры обмоток

Измерение активного сопротивления обмоток производится на постоянном токе с помощью моста постоянного тока или методом амперметра и вольтметра. В настоящее время широко применяются цифровых омметров (измерители сопротивлений с цифровой индикацией). Сопротивления обмоток якоря коллекторных машин измеряют непосредственно на пластинах коллектора.

Для определения превышения температуры обмоток электрической машины малой мощности над температурой окружающей среды используется методом сопротивления. Суть метода заключается в следующем: измеряется активное сопротивление обмотки в холодном состоянии  $r_x$  и температура окружающей среды  $\theta_{o.x.}$ . Для повышения точности проводятся два или три измерения, а сопротивление обмотки вычисляется как среднее арифметическое значение. Затем электрическая машина включается на номинальное напряжение, и выставляется номинальный режим работы. Для достижения установившегося теплового режима испытуемая машина выдерживается в течении не менее одного часа. После этого проводят измерение активного сопротивления обмотки в горячем состоянии  $r_2$  и температуры окружающей среды  $\theta_{o.c.}$ .

Превышение температуры обмотки  $\theta, ^\circ\text{C}$  :

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

где  $K$  – коэффициент, зависящий от материала обмотки ( $K = 235$  для медных обмоток и  $K = 245$  для алюминиевых).

Необходимо отметить, что в электрических микромашинах выходные характеристики сильно зависят от активного сопротивления обмоток, поэтому важно знать, при какой температуре обмоток (их активном сопротивлении) измерены отдельные показатели.

## 2.2 Измерение неэлектрических величин

### 2.2.1 Измерение вращающихся моментов

Для получения рабочих характеристик электрических машин малой мощности чаще всего применяются способы непосредственной нагрузки вместо косвенных методов, пригодных для машин средней и большой мощности.

Испытуемая электрическая машина малой мощности механически соединяется с нагрузочной машиной, которая часто используется непосредственно и для измерения моментов; такие устройства называют тормозами – моментометрами.

Специфические особенности в измерении вращающихся моментов машин малой мощности:

1. Большой диапазон измеряемых моментов (примерно от  $1 \cdot 10^{-4}$  до  $6 \text{ Н} \cdot \text{м}$ ) в широком диапазоне частот вращения (примерно от 0 до 40000 об / мин).
2. Большие погрешности, обусловленные используемыми измерительными приборами и методикой измерения. Особые трудности с точки зре-

ния точности измерения встречаются при измерении малых моментов при малых «ползучих» частотах вращения.

3. Ограниченность времени измерения, увеличение которого приводит к искажению измеряемых величин в результате повышения активного сопротивления обмоток при нагреве машины.

4. Практическая невозможность создания универсальных измерительных устройств обусловленная большой номенклатурой и широкой области применения электрических машин малой мощности.

Измерители моментов должны удовлетворять следующим требованиям: удобство в работе; незначительные погрешности; малый момент инерции с целью уменьшения времени измерения; широкий диапазон измеряемых моментов в широком диапазоне частот вращения; возможность применения для испытания любого типа микромашины; 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, в которых возникают силы, противодействующие движению, в результате трения между движущимися относительно друг друга элементами при их относительном перемещении.

2. Электромеханические в виде нагрузочных машин с измерительной шкалой. В качестве нагрузочной машины используются чаще всего машины

постоянного тока с независимым возбуждением, индукционные тормоза и управляемые асинхронные двигатели малой мощности.

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.

Нагрузка испытываемого 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 испытываемого двигателя определяется по углу отклонения стрелки на шкале.

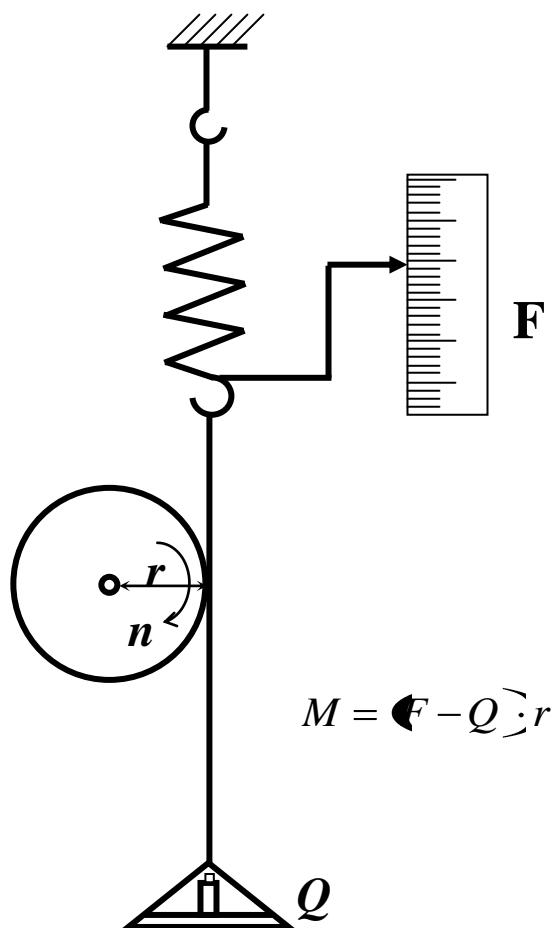


Рисунок 2.2 – Схема тормоза с пружинным динамометром



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.

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 элементами 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 электромагнитами и поворачивает его до тех пор, пока отклоняющийся маятник не уравновесит момент двигателя. По углу отклонения стрелки маятника на шкале определяется величина момента.

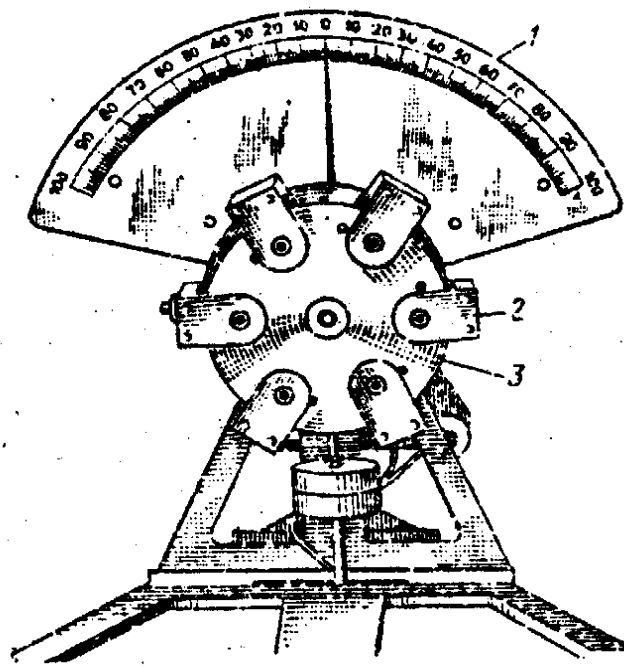


Рисунок 2.3 – Электромагнитный тормоз с пределами измерения момента до  $0,2 \text{ Н}\cdot\text{м}$

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.

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,  $H \cdot м$  :

$$M_T = G \cdot l \quad (2.3)$$

где  $l$  – длина плеча,  $м$ ;

$G$  – масса грузов,  $Н$ .

### 2.2.2 Измерение частоты вращения ротора

Задача измерения частоты вращения электрических машин малой мощности осложняется двумя факторами:

1. Измерения частоты вращения испытуемой машины следует проводить без механической нагрузки, способной изменить режим её работы.
2. Частоту вращения необходимо измерять с достаточно большой точностью.

Существует три способа измерения частоты вращения электрических машин:

1. Испытуемая электрическая машина непосредственно соединяется с измерителем скорости вращения (тахометр, тахогенератор, тахограф).

2. Стробоскопический, основанный на использовании стробозэффекта 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, применяемые при испытаниях электрических машин большой мощности, непригодны для испытаний микромашин мощностью менее  $50 \text{ Вт}$ , так как в этом случае они являются существенной нагрузкой для испытываемой микромашины, приводящей к изменению режима её работы. Использование обычного тахометра для машин мощность которых превышает значение  $50 \text{ Вт}$  является допустимым, так как в этом случае вносимая им погрешность не превышает  $2\%$ . Для измерения частоты вращения машин малой мощности достаточно часто применяется часовой тахометр, не создающий заметной дополнительной нагрузки на валу испытываемого 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 испытываемых электрических электродвигателей в рабочих и переходных режимах тахогенераторы механически сочленяются с двигателем и подключаются к точному регистрирующему прибору: используется либо вольтметр (при установившемся режиме работы), либо шлейф осциллографа для записи  $n = f \varphi$  (в переходных режимах работы).

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

**Стробоскопический способ.** Для измерения частоты вращения электрических машин малой мощности наилучшим является стробоскопический способ. Суть данного способа заключается в том, что вращающаяся деталь (вал испытываемой электрической машины) освещается прерывистым (с определенной частотой) светом неоновой или ртутной лампы. При этом глаз человека не ус-

певает заметить движение объекта в момент вспышки. Если число оборотов объекта (вала испытуемой электрической машины) и число вспышек ламп 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 измерять частоту вращения с высокой точностью, не нагружая испытуемый микродвигатель. Он позволяет также измерять скольжение асинхронных двигателей, угол  $\theta$  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 электронного 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 применяются фотодиоды. Под действием светового потока изменяется электрический ток во внешней цепи фотодиода и создает падение напряжения на сопротивлении, включенным последовательно с фотодиодом. Полученные электрические импульсы поступают на формирователь, где усиливаются и формируются в прямоугольные импульсы. Электрические импульсы с выхода формирователя подаются на вход цифрового автоматического тахометра, 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 –  $t_{отсчета}$ :

$$A = n \cdot C \cdot t_{отсчета} \quad (2.4)$$

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 машины малой мощности, выходная ЭДС которых прямо пропорциональна скорости вращения ротора. Они применяются:

1. Для получения демпфирующих и форсирующих сигналов в схемах автоматической обработки.
2. При вычислительных операциях в счетно-решающих устройствах.
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 постоянного (с независимым возбуждением или постоянными магнитами) и переменного тока (асинхронные и синхронные).

По назначению в устройствах автоматики 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 данных групп различны. Так, к тахогенераторам, использующихся в качестве элементов обратной связи, достаточно часто не предъявляются требования высокой точности (линейности выходной характеристики), однако выходная характеристика должна иметь большую крутизну. Тахогенераторы второй группы должны обладать высокой точностью.

Главным техническим показателем качества работы любого типа тахогенератора является линейность выходной характеристики, представляющей зависимость выходного напряжения от частоты вращения  $U = f(\omega)$  или  $u = f(\omega)$ ,

где  $v = \frac{n}{n_n}$  – относительная скорость вращения ( $n_n$  – номинальная частота

вращения);  $u = U/U_n$  – относительное выходное напряжение ( $U_n$  – номинальное напряжение).

В тахогенераторе любого типа происходит дифференцирование углового перемещения, основанное на том, что ЭДС, индуцируемая при постоянном значении потока  $\Phi$ , прямо пропорциональна частоте вращения машины.

Выходная ЭДС тахогенератора,  $B$ :

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

где  $c_1, c_e$  – коэффициенты пропорциональности;

$n$  – угловая частота вращения, *об / мин*;

$\alpha$  – угол поворота, *град*.

Только у «идеального» тахогенератора выходная характеристика будет абсолютно линейной. Реальные тахогенераторы имеют погрешности выходной характеристики, вызванные рядом факторов:

1. Электромагнитной реакцией якоря (или ротора).
2. Изменением параметров (сопротивления обмоток) под влиянием изменения температуры, насыщения магнитопроводов и других причин.
3. Изменением некоторых параметров в функции частоты вращения (например, сопротивления полого ротора).
- 4.падением напряжения в генераторной обмотке при подключении нагрузки.
5. Различными технологическими погрешностями 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 малой мощности с возбуждением либо от постоянного магнита, либо с помощью обмотки возбуждения, расположенной на явно выраженных полюсах статора (независимое возбуждение).

ТГ постоянного тока по сравнению с ТГ переменного тока присущи существенные недостатки:

1. Наличие щеточно-коллекторного узла.
2. Коммутационное искрение под щётками.
3. Коллекторные биения.
4. Необходимость применения фильтров от радиопомех.
5. Более сложная конструкция.
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,  $B$ :

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

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, В;

$r_a$  – сопротивление цепи якоря, Ом.

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

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

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 ТГ:

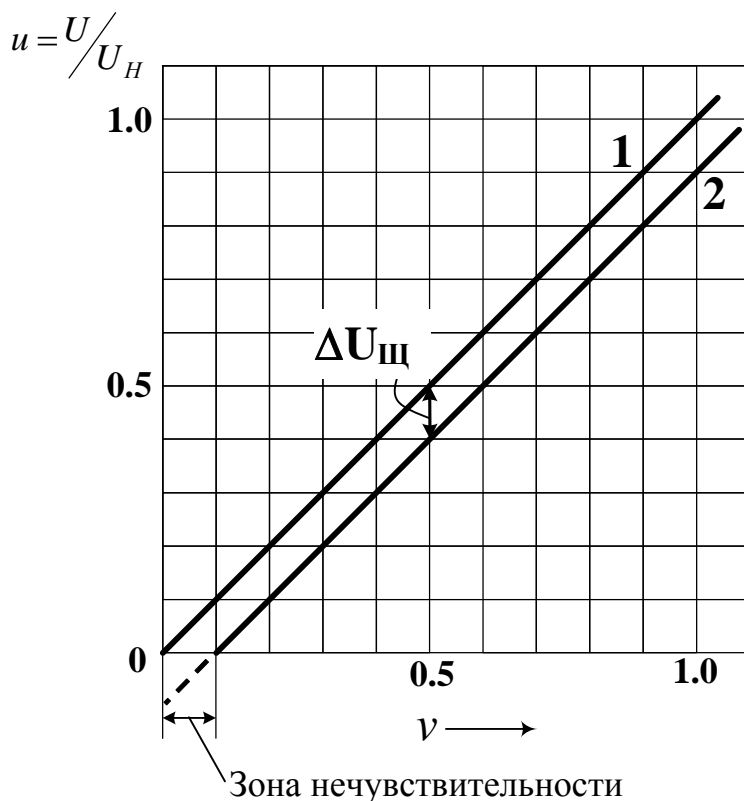
$$\Delta_U = (U_i - U) / U_i \quad (4.3)$$

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

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

Современные ТГ постоянного тока имеют крутизну выходной характеристики  $k_U = 5 - 100 \text{ мВ} / (\text{об} / \text{мин})$  и выше (меньшие значения относятся к тахогенераторам с постоянными магнитами).

Важным техническим показателем качества работы ТГ постоянного тока является асимметрия выходного напряжения, представляющая собой разность между выходной ЭДС (напряжением) при правом и левом направлении вращения, обусловленная главным образом технологическими факторами и точностью установки щёток на геометрической 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 ТГ 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  $U=f(n)$ :

а) при холостом ходе:  $R_{H1} = R_{IP} \approx \infty$ . Экспериментальные данные занести в таблицу 4.1;

Таблица 4.1 – Выходная характеристика тахогенератора при  $R_H = \infty$

$U, В$							
$n, об/мин$							

б) при сопротивлении нагрузки  $R_{H2} = 200, 500, 1000 \text{ Ом}$  в диапазоне рабочих скоростей вращения от 0 до  $1,25 \cdot n_H$ . Экспериментальные данные занести в таблицу 4.2.

Таблица 4.2 – Выходная характеристика тахогенератора при  $R_H = 200 \text{ Ом}$   
( $R_H = 500 \text{ Ом}; R_H = 1000 \text{ Ом}$ )

$U, В$							
$I, mA$							
$n, об/мин$							

При снятии выходных характеристик диапазон изменения частоты вращения ротора тахогенератора оказывается очень большим (от 0 до  $\approx 6000 \text{ об/мин}$ ), поэтому число экспериментально снятых точек должно быть не менее десяти.

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  $R_{H1} = R_{IP} \approx \infty$ ;

б) при сопротивлении нагрузки  $R_{H2} = 200, 500, 1000 \text{ Ом}$  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:  $R_H = R_{PP} \approx \infty$ ;

б) при сопротивлении нагрузки  $R_H = 200, 500, 1000 \text{ Ом}$ .

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.

Выходное напряжение должно измеряться вольтметром, имеющим большое внутреннее сопротивление.

Выходное напряжение определяется при номинальной (рабочей) частоте вращения. Крутизна выходной характеристики,  $mB / (об / мин)$ :

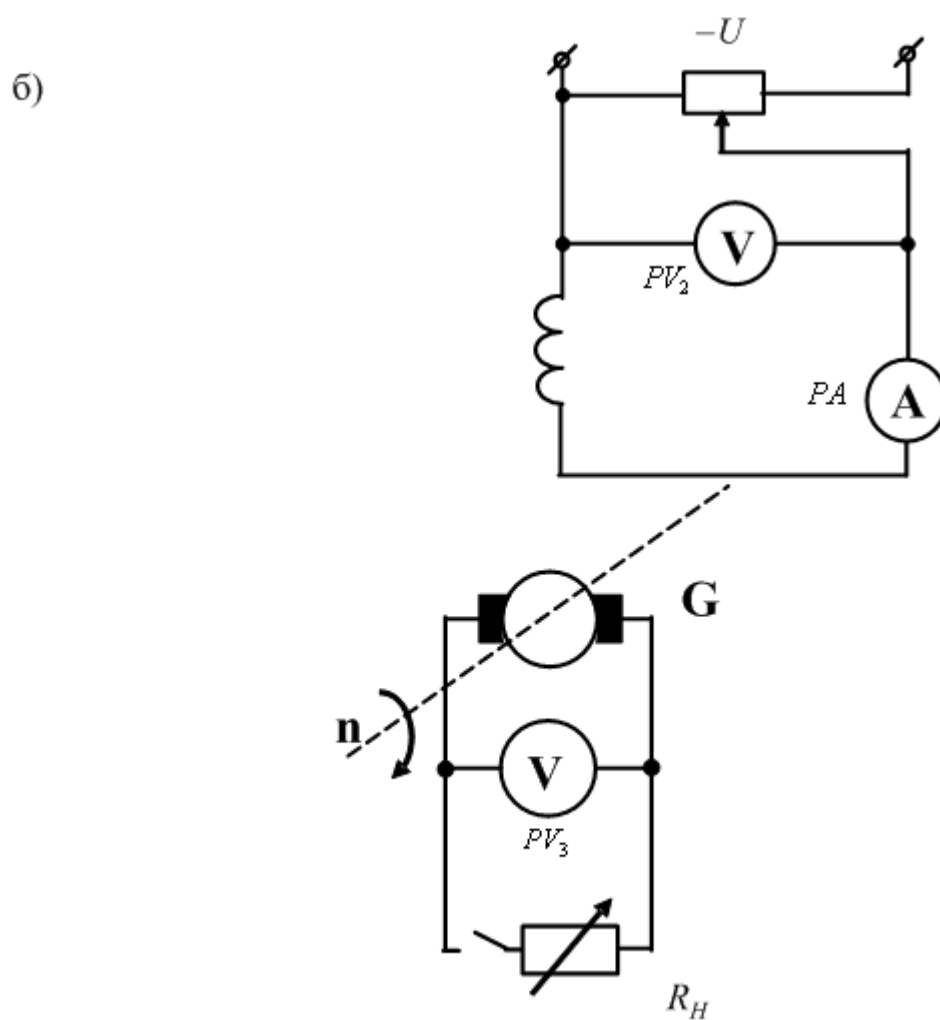
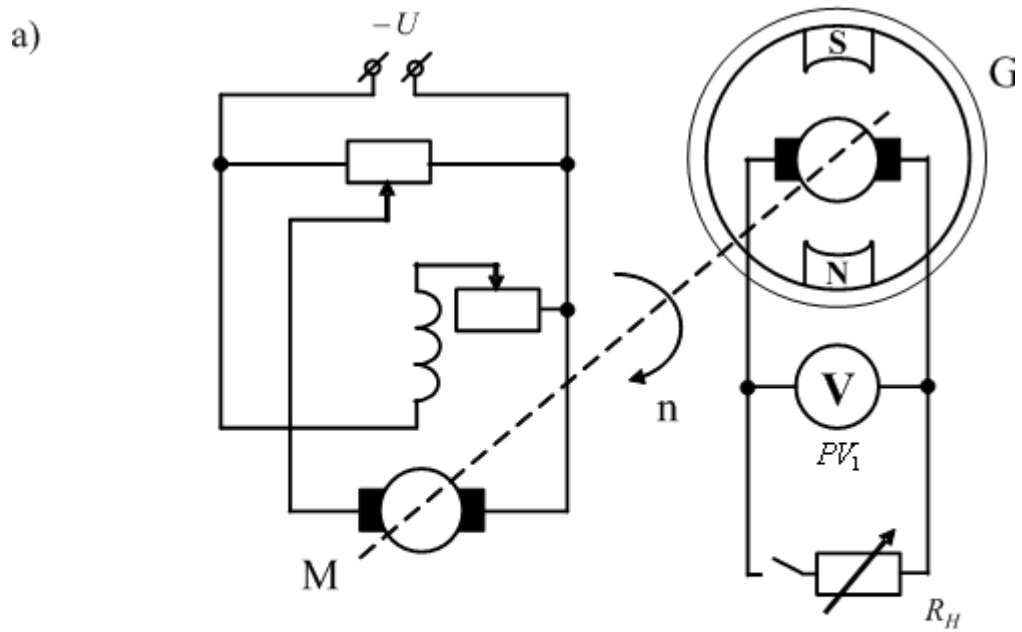
$$k_U = U / n_{макс} \quad (4.4)$$

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

1. В режиме холостого хода:  $R_{H1} = R_{PP} \approx \infty$ .

2. При сопротивлениях  $R_{H2} = 200, 500, 1000 \text{ Ом}$ .

У тахогенератора с независимым возбуждением при снятии выходной характеристики необходимо напряжение возбуждения поддерживать постоянным, равным номинальному. По характеристикам определяется крутизна  $k_U$ .



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

Рисунок 4.2 – Схема для испытания тахогенератора постоянного тока

Для определения протяженности зоны нечувствительности, в которой выходное напряжение равно нулю, при снятии выходных характеристик следует очень тщательно выявить зависимость  $U = f(n)$  в области малых частот вращения.

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

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

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

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. Максимальная линейность выходной характеристики.
2. Минимальная асимметрия выходного напряжения при изменении направления вращения.
3. Практическое отсутствие или незначительность температурной погрешности, а также малое влияние на выходную характеристику изменения величины нагрузки.
4. Пульсации выходного напряжения на коллекторе должны быть минимальными.

Из анализа уравнения (4.1) следует, что при увеличении нагрузки выходная характеристика  $U = f(n)$  становится нелинейной. Основные причины на-

рушения линейности выходной характеристики – реакция якоря и коммутационных токов, а также падение напряжения в якорной цепи, которые возрастают с увеличением тока якоря. Следовательно, точность тахогенератора постоянного тока возрастает с увеличением сопротивления нагрузки.

При малых частотах вращения падение напряжения в щёточном контакте может быть соизмеримо с индуцируемой ЭДС в генераторной обмотке. 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). Неточность установки щеток на геометрической нейтрали, а также их смещение с нейтрали в процессе эксплуатации приводит к возникновению несимметрии выходного напряжения при изменении направления вращения якоря. У современных ТГ ошибка ассиметрии не превышает 1–3 %.

Изменения температуры окружающей среды приводят к изменениям активного сопротивления обмоток ТГ, и как следствие к изменению потока возбуждения, также приводят к нарушению линейности выходной характеристики (температурная погрешность). Особенно чувствительны к влиянию температуры ТГ с электромагнитным возбуждением. В них при изменении температуры обмотки возбуждения изменяется ток возбуждения, а, следовательно, и поток. Существует несколько способов уменьшения температурной погрешности:

1. Используют стабилизированный источник тока для питания обмотки возбуждения.
2. 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.
3. В цепь обмотки возбуждения включается терморезистор с отрицательным температурным коэффициентом.
4. Между полюсными наконечниками устанавливаются теплочувствительные магнитные шунты, изготовленные из сплавов, изменяющих свою маг-



нитную проводимость при нагреве ТГ; при возрастании температуры магнитное сопротивление шунта растет, что приводит к вытеснению магнитного потока из шунтов в якорь. Таким образом, происходит стабилизация потока, проходящего через якорь.

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 неравномерностью воздушного зазора и эллиптичностью якоря, неодинаковой магнитной проводимостью сердечника якоря в разных направлениях (вдоль и поперек проката стали), вибрацией щеток и др. Основные средства уменьшения пульсаций, применяемые при проектировании и изготовлении ТГ:

1. Для якорных пульсаций – «веерная» сборка пакета, увеличение воздушного зазора, точность изготовления якоря.
2. Для зубцовых – скос пазов якоря, 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 выявить следующие преимущества ТГ с постоянными магнитами:

1. Отсутствует источник питания для возбуждения.
2. Меньшие массогабаритные показатели.
3. Отсутствует температурная погрешность.

Сравнивая свойства ТГ постоянного тока и асинхронного, следует отметить, важное преимущество первого – отсутствие фазовой погрешности. Однако наличие коллектора и щеток снижают точность ТГ постоянного тока и его надежность. Кроме того, ТГ постоянного тока являются источниками радиопомех и щеточных шумов, а из-за возможного искрения под щетками не могут эксплуатироваться во взрывоопасных условиях.

## 4.5 Контрольные вопросы

4.5.1 Назовите способы возбуждения тахогенераторов постоянного тока? Объясните конструкции тахогенераторов постоянного тока.

4.5.2 Как зависит линейность выходной характеристики от величины тока в якоре тахогенератора?

4.5.3 Что такое температурная погрешность? Перечислите способы ее уменьшения.

4.5.4 Как зависит крутизна выходной характеристики от величины тока в якоре тахогенератора? Напишите уравнение выходной характеристики и проанализируйте его.

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

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

4.5.7 Проведите сравнение свойств двух типов ТГ постоянного тока: с электромагнитным возбуждением и с возбуждением от постоянных магнитов.

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

4.5.9 Перечислите виды пульсаций ТГ постоянного тока? Укажите их причины.

4.5.10 Назовите известные способы уменьшения отдельных видов пульсаций.

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

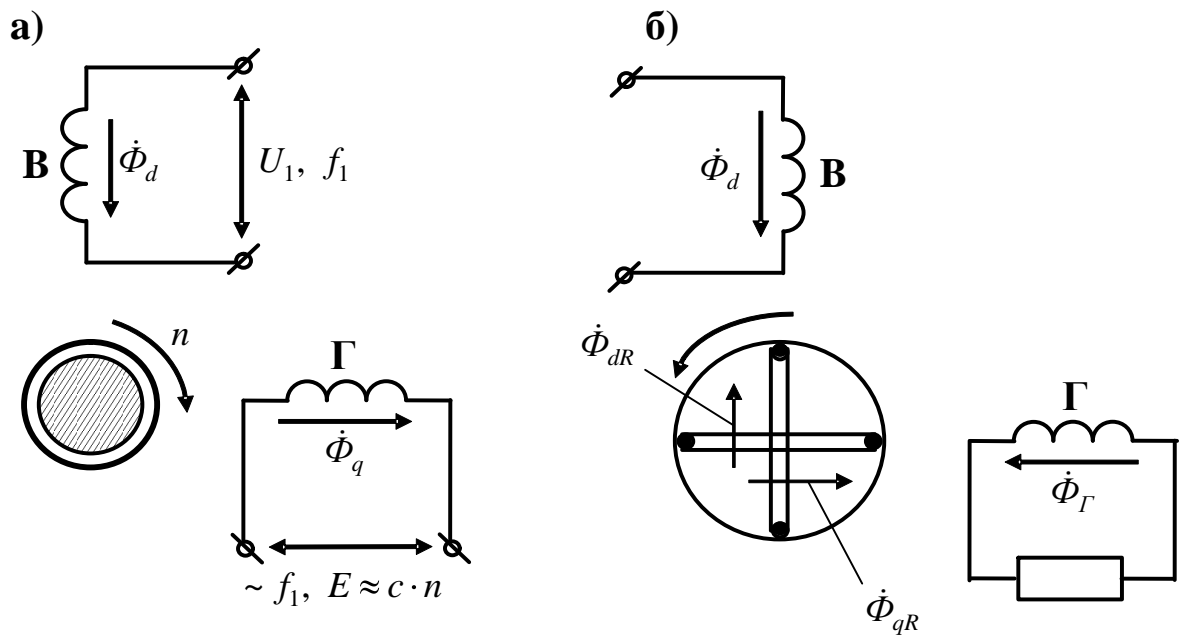
### 5.1 Общие сведения

Конструкция тахогенератора с полым ротором не отличается от двигателя подобного типа. В асинхронных тахогенераторах высокой точности ротор выполняется из материала с большим удельным сопротивлением, а также с малым температурным коэффициентом сопротивления  $\alpha \leq 10^{-4} - 10^{-5} \text{ Ом/}^\circ\text{C}$  (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 распложены две однофазные обмотки, сдвинутые на угол  $90 \text{ эл. град}$ ; **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.

При неподвижном роторе (рисунок 5.1) обмотка **В** создает пульсирующий поток  $\Phi_d$ , который наводит в роторе только трансформаторную ЭДС и не сцеплен с обмоткой **Г** (при идеальном сдвиге обмоток на  $90 \text{ эл. град}$ ). Однако точной магнитной симметрии (квадратуры осей обмоток) достичь практически невозможно, и часть потока  $\Phi_d$  оказывается трансформаторно связанной с обмоткой **Г**, вызывая в ней остаточную ЭДС.

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



а) электромагнитная схема; б) распределение потоков статора и ротора.

Рисунок 5.1 – Асинхронный тахогенератор

Электродвижущая сила трансформации наводится в контурах ротора, расположенных в плоскости, перпендикулярной потоку возбуждения  $\Phi_d$ . Ток этих контуров создает продольный поток реакции ротора  $\Phi_{dR}$ , направленный на встречу потоку возбуждения. Электродвижущая сила вращения наводится в контурах ротора, плоскости которых параллельны потоку возбуждения. Ток этих контуров создаст поперечный ротора  $\Phi_{qR}$ , 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  $U = f(\omega)$  асинхронного ТГ может быть записано в комплексной форме:

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

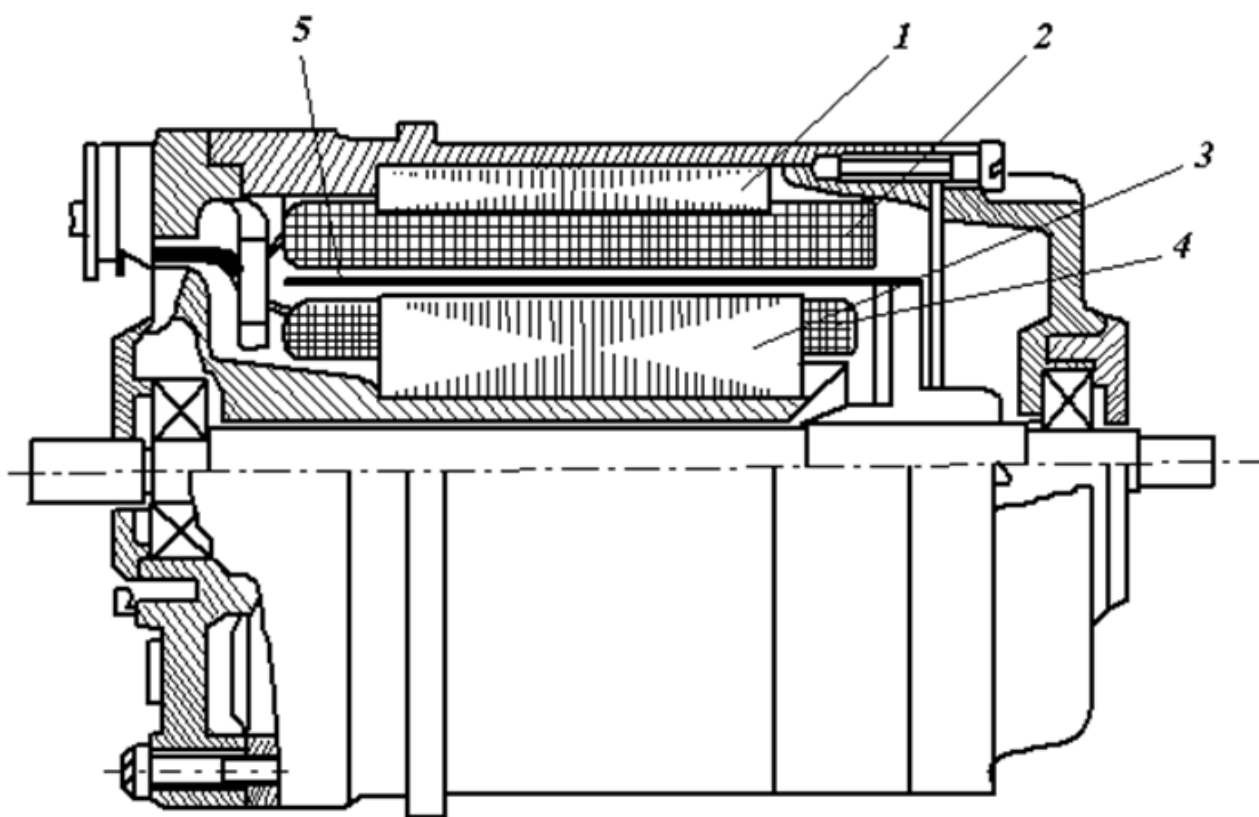
где  $\dot{U}$  – выходное напряжение, В;

$\dot{U}_B$  – напряжение обмотки возбуждения, В;

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

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

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



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

Как видно из (5.1) линейность выходной характеристики нарушает член, содержащийся в знаменателе и зависящий от квадрата частоты вращения. Данный фактор нелинейности обусловлен, прежде всего, непостоянством магнитного потока возбуждения, а также изменением активного сопротивления ротора  $r_R$  при изменении частоты вращения.

Для повышения линейности выходной характеристики, т.е. для уменьшения основной погрешности, при проектировании ТГ принимаются меры по уменьшению либо коэффициента  $\dot{B}$ , либо относительной частоты вращения  $\nu$ . 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, Ом;

$Z_S$  – полное сопротивление статора, Ом.

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 класса точных) в устройствах 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 повышения линейности выходной характеристики за счет значительного уменьшения  $\nu^2$  более выгодно исполнение тахогенераторов на повышенную частоту  $f$  и с малым числом полюсов  $2p$ , т.к. при этом относительная частота вращения будет меньше:

$$\nu = \frac{n}{n_C} = \frac{np}{60f}. \quad (5.3)$$

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,  $mB/(об/мин)$ :

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

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  $mB/(об/мин)$  (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  $\Delta_U$  и фазной  $\delta_\psi$  погрешностей:

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

Модуль полной погрешности:

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

Амплитудная погрешность представляет собой отклонение выходной характеристики  $U = f(v)$  от линейной 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 ЭДС 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:

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



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  $(2 - 10) \cdot 10^{-4} \text{ Н} \cdot \text{м}$ .

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  $P_{в.н.}, I_{в.н.}, U_{н.}$  при  $U_{в.н.}, f_{н.}, n_{н}$  и  $Z_{н} = \infty$ .

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 ( $\theta$  – 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  $n_{н}$ :

а) для холостого хода  $Z_{н} = \infty$ . Экспериментальные данные занести в таблицу 5.1;

Таблица 5.1 – Выходная характеристика тахогенератора при  $Z_{н} = \infty$

$U, \text{В}$							
$n, \text{об/мин}$							

б) для активной нагрузки  $R_H = 200, 500, 1000$  Ом. Экспериментальные данные занести в таблицу 5.2.

Таблица 5.2 – Выходная характеристика тахогенератора при  $R_H = 200$  Ом ( $R_H = 500$  Ом;  $R_H = 1000$  Ом)

$U, B$							
$I, mA$							
$n, об/мин$							

5.2.6 Снять зависимости выходного напряжения тахогенератора от характера нагрузки (внешние характеристики)  $U = f(Z_H)$  для  $n = n_H$  ( $\nu = \nu_H$ ):

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

Экспериментальные данные занести в таблицу 5.3.

Таблица 5.3 – Внешняя характеристика тахогенератора при  $Z_H = R_H$  ( $Z_H = X_C$ ;  $Z_H = X_L$ )

$U, B$							
$I, mA$							
$Z_H, Ом$							
$R_H \quad L_H, C_H$							

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

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

5.2.8 Осуществить совмещение 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  $\Delta E_0$ .

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

- а) для холостого хода ( $Z_H = \infty$ );
- б) для активной нагрузки ( $R_H = 200, 500, 1000 \text{ Ом}$ ).

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  $n = n_H$ :

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

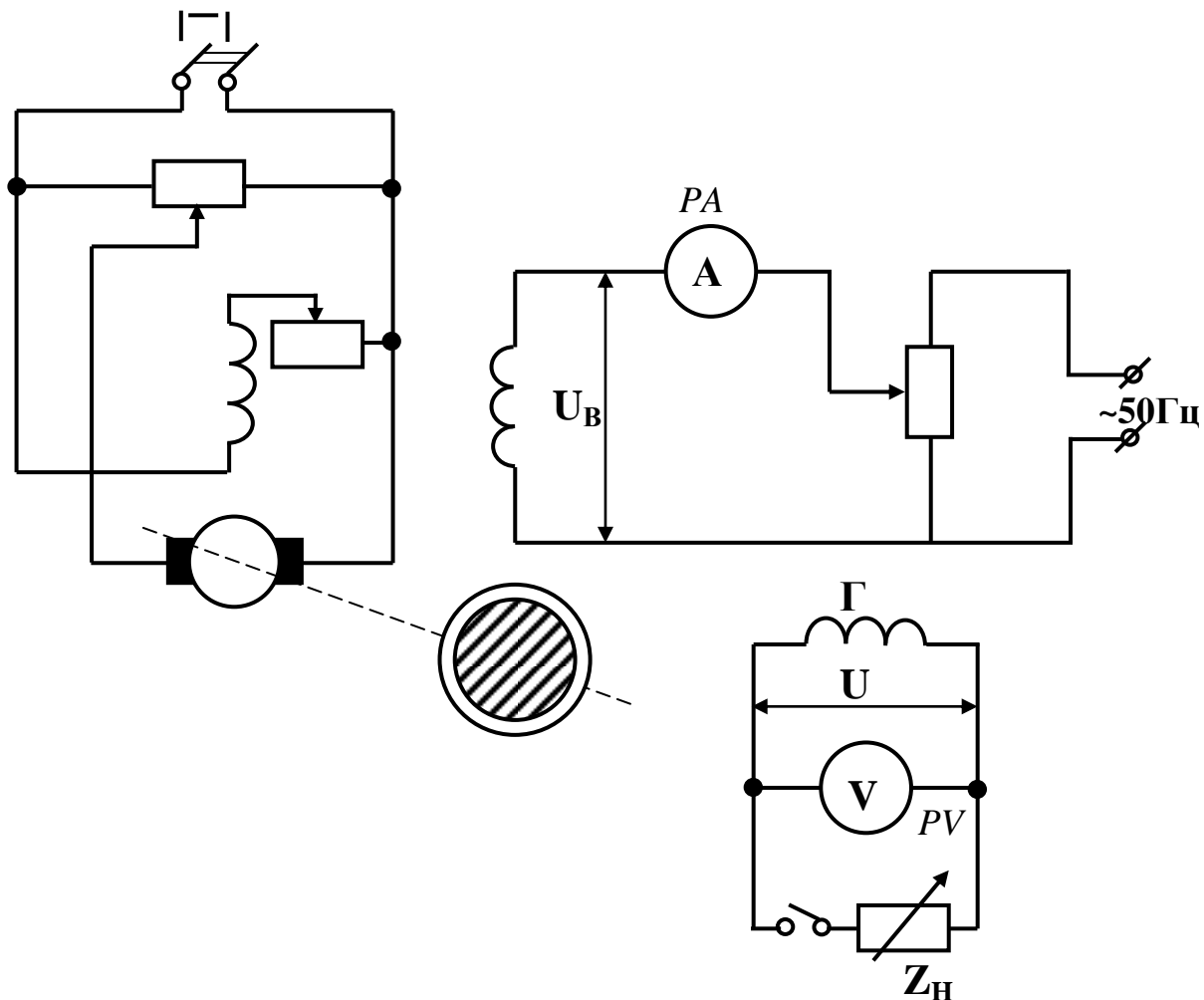


Рисунок 5.3 – Схема для испытания асинхронного тахогенератора

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.

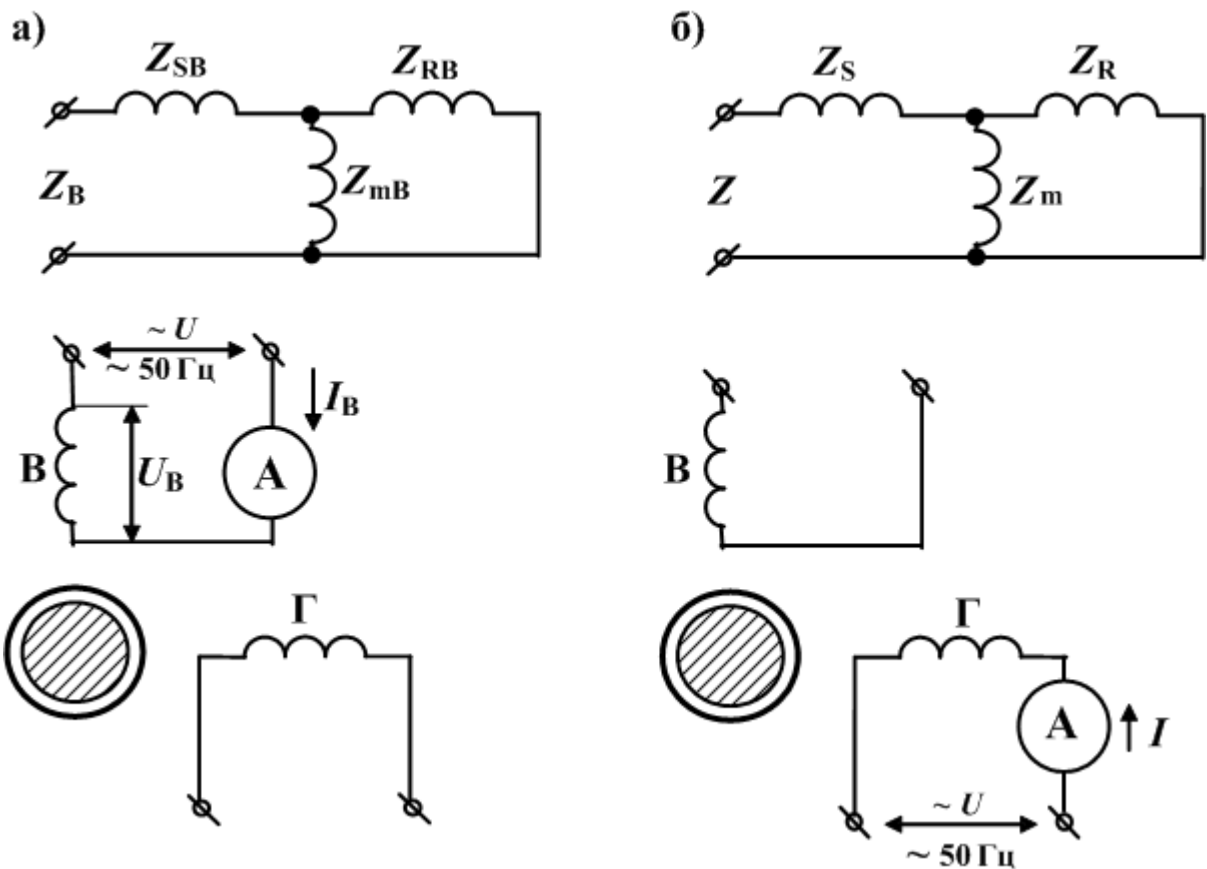
Мощность, потребляемая обмоткой возбуждения тахогенератора, измеряется ваттметром.

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:

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



а) полное сопротивление обмотки возбуждения  $Z_e = U_e / I_e$ ;

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 различных угловых положениях ротора в пределах одного оборота фиксируются максимальное и минимальное значение ЭДС генераторной обмотки. Максимальная величина измеренной ЭДС принимается за величину остаточной ЭДС тахогенератора. Переменная составляющая остаточной ЭДС определяется как разность между наибольшей и наименьшими величинами,  $B$ :

$$\Delta E_0 = E_{0, \text{макс}} - E_{0, \text{мин}} . \quad (5.10)$$

Выходные характеристики снимаются для двух режимов:

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

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 ( $\Delta U \leq 0,1 - 0,2 \%$ ). Внешний вид выходных характеристик показан на рисунке 5.5.

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).

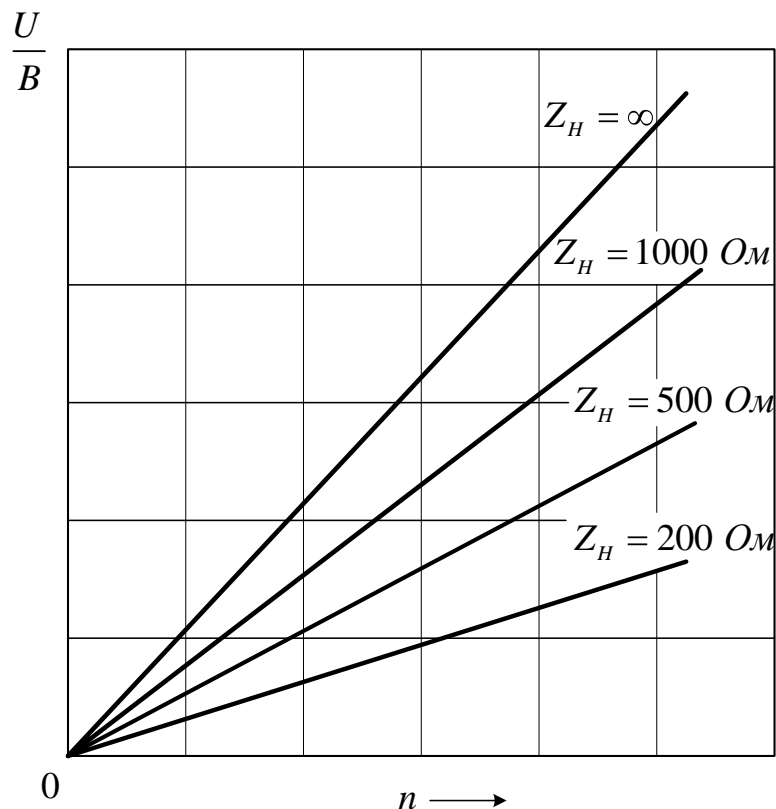


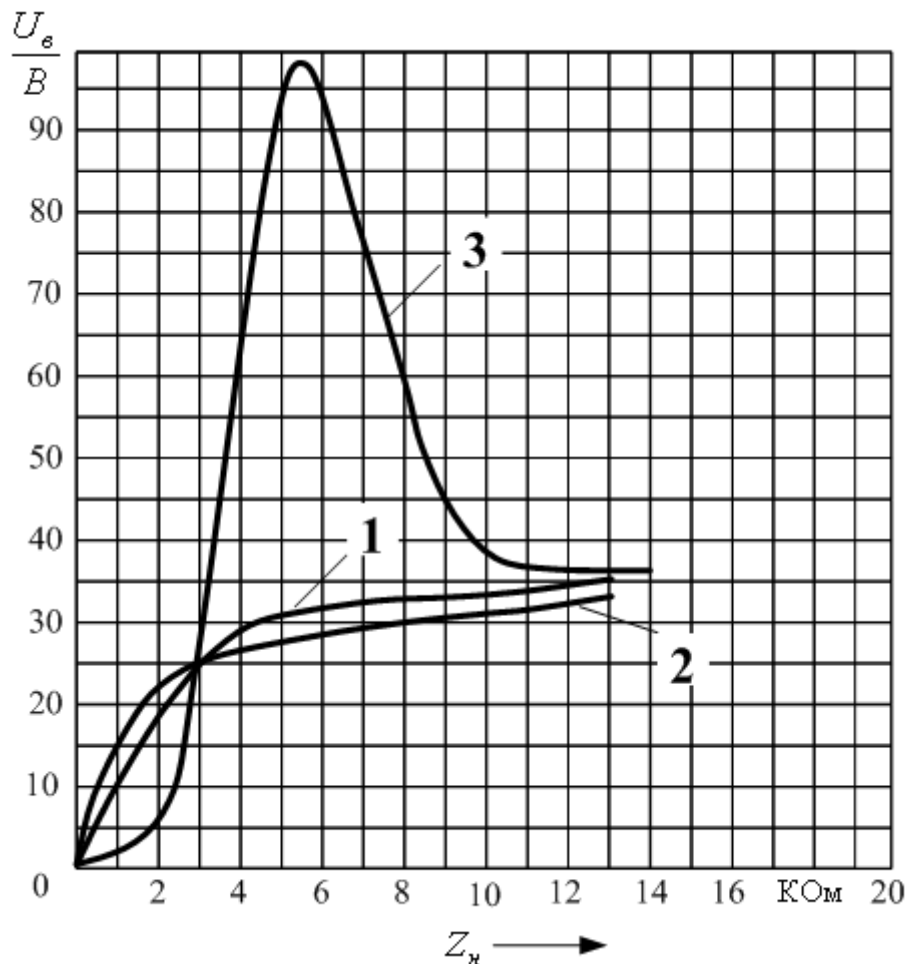
Рисунок 5.5 – Выходные характеристики асинхронного тахогенератора

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.

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 5.6) 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.





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

Рисунок 5.6 – Опытные внешние характеристики асинхронного ТГ  $U = f(Z_n)$  при  $n = \text{const}$  и  $U_e = \text{const} = U_{e.n.}$

5. При определении фазы выходного напряжения необходимо соединить обмотки тахогенератора по схеме рисунка 5.7 (а). Измерив три напряжения  $\dot{U}_B, \dot{U}, \dot{U}'$  следует построить треугольник напряжений (рисунок 5.7 (б)), из которого можно найти угол сдвига фаз  $\psi$  между  $\dot{U}$  и  $\dot{U}_B$ . Определяется этот угол при  $Z_n = \infty$ ;  $Z_n = R_n = 500, \text{ Ом}$  и  $Z_n = X_C = 500, \text{ Ом}$ .

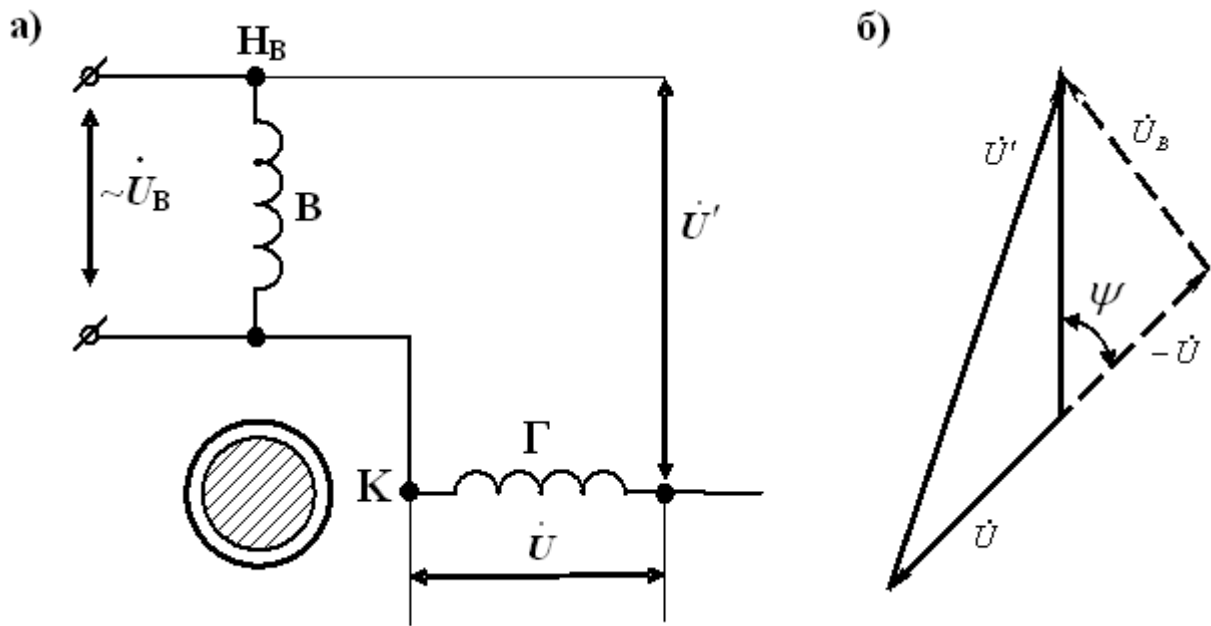


Рисунок 5.7 – К вопросу об измерении фазы выходного напряжения

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 5.4 и представить в виде графиков.

Из сравнения выходных характеристик тахогенератора  $u = f(v)$  при  $Z_n = \infty$  и  $R_n = 500 \text{ Ом}$  в о.е., где  $u = U/U_n$  и данных таблицы 5.4 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 5.4 – Данные опыта

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

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 в настоящей лабораторной работе не проводится.

На рисунке 5.6 представлены внешние характеристики асинхронного ТГ при различном характере нагрузки и постоянной частоте вращения. Из рисунка видно, что при активной и индуктивной нагрузках зависимости  $U = f(Z_H)$

почти одинаковы, а именно, в обоих случаях при уменьшении сопротивления внешней цепи (увеличении нагрузки) выходное напряжение снижается.

В случае емкостной нагрузки 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 ТГ 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 неодинаковой магнитной проводимостью сердечников статоров и неравномерной толщиной стенки ротора, несовершенством изготовления, конструкцией обмоток и другими причинами. Остаточная ЭДС складывается из постоянной  $E_o$  и переменной  $\Delta E_o$  составляющих. Величина постоянной составляющей зависит главным образом от качества магнитной системы и обмоток, а переменной – от качества ротора.

При малых частотах вращения, когда величины полезной выходной ЭДС и остаточной ЭДС соизмеримы, симметричность выходной характеристики нарушается при изменении направления вращения ротора, 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 постоянную составляющую остаточной ЭДС, размещая обмотки ТГ на разных статорах, а также применяя различные компенсационные устройства.

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

## **5.5 Контрольные вопросы**

5.5.1 Конструкция асинхронного ТГ. Где располагаются обмотки возбуждения и генераторная?

5.5.2 Какие материалы предпочтительнее использовать при изготовлении полого ротора ТГ и почему?

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

5.5.4 Что такое амплитудная погрешность?

5.5.5 Что такое фазовая погрешность?

5.5.6 Способы уменьшения погрешностей асинхронного тахогенератора?

5.5.7 С какой частотой изменяется выходное напряжение тахогенератора?

Ответ объяснить.

5.5.8 Из каких материалов изготавливают полый ротор асинхронного тахогенератора?

5.5.9 Что такое остаточная ЭДС и какими причинами она вызывается?

5.5.10 Способы уменьшения остаточной ЭДС?

5.5.11 Влияние характера нагрузки на крутизну выходной характеристики.

5.5.12 Влияние поворота ротора относительно статора на величину остаточной ЭДС. Объясните физику явления.

5.5.13 Влияние характера нагрузки на фазу выходного напряжения.

5.5.14 Назначение тахогенератора в системах автоматического управления.

5.5.15 В каких устройствах требуется тахогенератор более высокой точности?

## 6 Лабораторная работа № 3. Испытание сельсинов

### 6.1 Общие сведения, конструкция и принцип действия

Задача по осуществлению синхронизации вращения или поворота различных осей механизмов, находящихся на расстоянии друг от друга, чаще всего решается с помощью электрических систем синхронной связи.

Системой синхронной связи называется такая электрическая связь, которая обеспечивает одновременный поворот или одновременное синхронное вращение двух или нескольких механически не связанных между собой осей механизмов. На практике получили распространение два вида систем синхронной связи: синхронного вращения («электрического вала») и синхронного поворота («передачи угла»). Системы «электрического вала» чаще осуществляются с помощью трехфазных асинхронных машин с фазным ротором. Мощность используемых в системе двигателей определяется величиной моментов сопротивления, которыми нагружены синхронизирующиеся оси. Для дистанционного управления, регулирования и контроля обычно используются системы синхронной «передачи угла» и осуществляются, как правило, с помощью небольших индукционных электрических машин, получивших название сельсинов (от слова *selsin* – самосинхронизирующийся).

Сельсины делятся на трехфазные и однофазные в зависимости от числа фаз первичной обмотки (обмотки возбуждения) и числа фаз питающей сети. Трехфазные сельсины, конструктивно не отличающиеся от асинхронных микромашин с фазным ротором, не нашли широкого применения вследствие малой устойчивости и неравенства синхронизирующих моментов при повороте ротора по направлению вращения поля статора и против него.

В подавляющем большинстве систем синхронной «передачи угла» в настоящее время используются однофазные сельсины, имеющие однофазную обмотку возбуждения и трехфазную обмотку синхронизации.

В системах автоматики используются две системы синхронной связи: индикаторная и трансформаторная. Индикаторная применяется там, где момент

сопротивления на ведомой оси имеет небольшое значение или совсем отсутствует (ось нагружена стрелкой, шкалой и т.п.). В индикаторной схеме синхронной связи принимающий сельсин самостоятельно обрабатывает задаваемый сельсином-датчиком угол.

Вторая схема – трансформаторная схема синхронной связи – применяется там, где на ведомой оси имеется значительный момент сопротивления. В трансформаторной схеме принимающий сельсин обрабатывает задаваемый датчиком угол не самостоятельно, а с помощью механически и электрически связанного с ним исполнительного двигателя.

## **6.2 Контактные сельсины**

По конструкции однофазные сельсины делятся на контактные и бесконтактные. В контактных сельсинах одна из обмоток (обмотка возбуждения или обмотка синхронизации) располагается на вращающемся роторе. Электрическая связь с этой обмоткой осуществляется с помощью скользящих контактов – колец и щеток (рисунок 6.1). По своему устройству контактные сельсины практически не отличаются от обычных трехфазных синхронных машин малой мощности. Они могут быть явнополюсной конструкции (чаще всего такими бывают индикаторные сельсины) и неявнополюсной конструкции (чаще – трансформаторные сельсины).

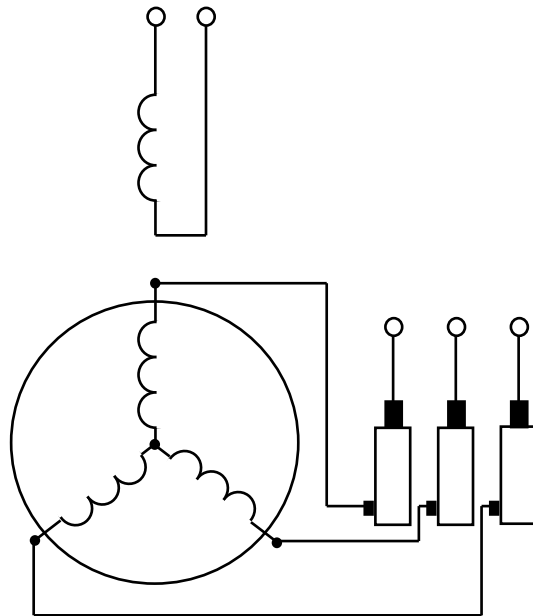


Рисунок 6.1 – Электрическая схема контактного сельсина

Внешний вид обычного контактного сельсина представлен на рисунке 6.2, где под цифрами 1 и 3 показаны подшипниковые щиты; 2 – статор; 4 – ротор; 5 – контактные кольца; 6 – подшипник; 7 – траверса; C1, C2, C3 – выходы концов обмотки синхронизации; P1, P2 – выходы концов обмотки возбуждения.

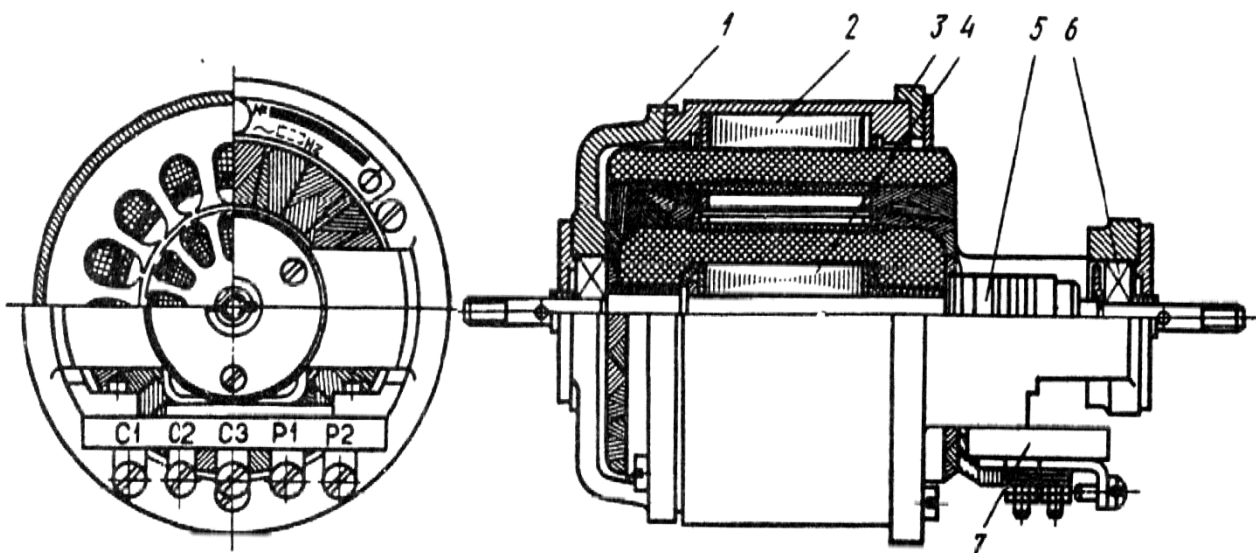


Рисунок 6.2 – Контактный сельсин с неявнополюсным ротором



В явнополюсных сельсинах на явно выраженных полюсах статора (или ротора) располагается сосредоточенная однофазная обмотка возбуждения; в неявнополюсных конструкциях – однофазная обмотка возбуждения распределенная и располагается в полузакрытых пазах статора (или ротора). Трехфазная обмотка синхронизации всегда выполняется распределенной и располагается в пазах, соответственно, ротора или статора. Трехфазная обмотка синхронизации соединяется, как правило, в звезду. Магнитное поле сельсина – переменное, поэтому с целью уменьшения потерь от вихревых токов сердечники статора и ротора выполняются шихтованными из изолированных листов электротехнической стали.

Большим недостатком контактных сельсинов, ограничивающим их применение в схемах синхронной связи, является наличие скользящих контактов, переходное сопротивление которых может значительно изменяться. С целью увеличения надежности контакта и уменьшения его переходного сопротивления кольца и щетки обычно выполняются из сплавов серебра. Величину переходного сопротивления можно уменьшить, а его стабильность можно повысить также путем увеличения силы нажатия щеток на кольца. Однако при этом увеличивается момент трения щеток о кольца и, следовательно, увеличивается статическая погрешность, особенно в индикаторных схемах синхронной связи. От места расположения обмоток зависит число контактных пар (колец и щеток): в сельсинах с обмоткой возбуждения на роторе – две контактные пары, а в сельсинах с обмоткой синхронизации на роторе – три контактные пары.

В целях повышения качества работы систем синхронной связи российскими учеными А.Г. Иосифьяном и Д.В. Свечарником была предложена конструкция сельсинов, не имеющих скользящих контактов, которые получили название бесконтактных сельсинов.

### 6.3 Бесконтактные сельсины конструкции Иосифьяна – Свечарника

Бесконтактные сельсины, как и контактные, имеют две обмотки: однофазную обмотку возбуждения и трехфазную обмотку синхронизации. Обе обмотки неподвижны и располагаются на статоре. На рисунке 6.3 показана конструкция бесконтактного сельсина, основными элементами которого являются: 1- статор, 2 - ротор, 3 - тороиды, 4 - внешний магнитопровод, 5 - обмотка возбуждения, 6 - обмотка синхронизации, 7 - корпус, 8 - подшипниковые щиты.

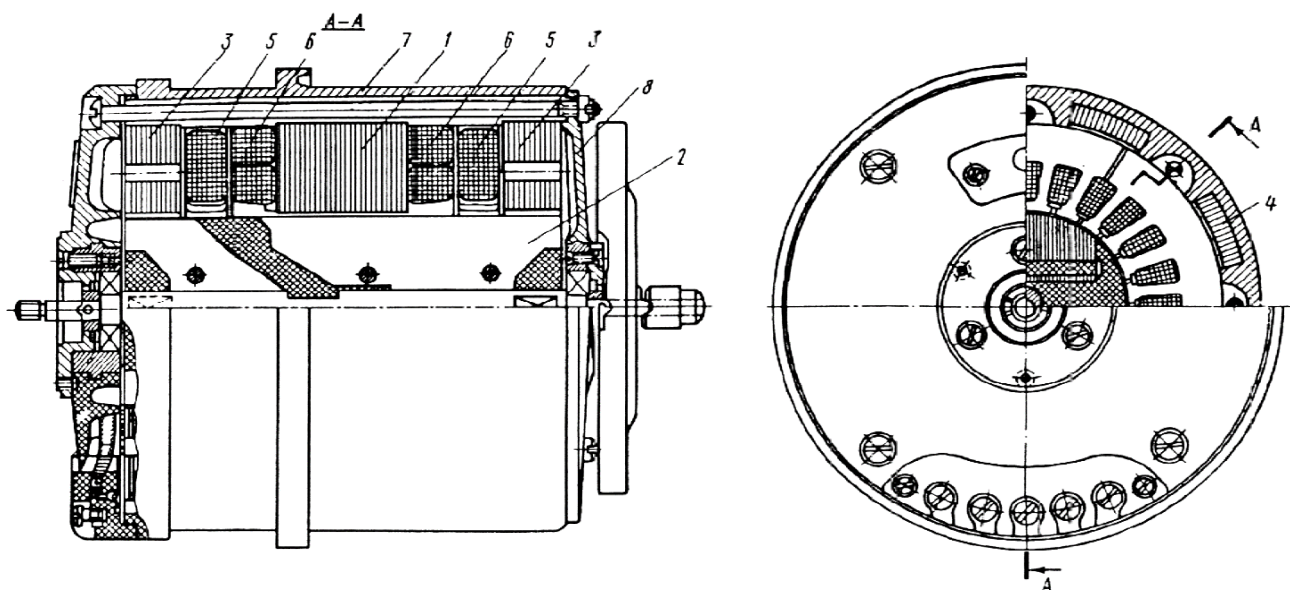


Рисунок 6.3 – Бесконтактный сельсин конструкции Иосифьяна – Свечарника

Неявнополюсный сердечник статора бесконтактного сельсина набирается из изолированных листов электротехнической стали. В его пазах располагается трехфазная обмотка синхронизации, соединенная в звезду.

Ротор бесконтактного сельсина имеет два полюса, разделенных немагнитным промежутком. Полюса ротора набираются из изолированных листов электротехнической стали, располагающихся в аксиальном направлении и укрепляющихся на оси посредством заливки немагнитным материалом (чаще всего алюминием), который является основным крепящим материалом ротора.

Тороиды также шихтованные и имеют форму колец. К наружной цилиндрической поверхности тороидов примыкают стержни внешнего магнитопрово-

да 4 (рисунок 6.3), набранные из изолированных листов стали, и располагающиеся в аксиальных пазах корпуса. В торцевой части корпус сочленяется с крышками – подшипниковыми щитами.

Однофазная обмотка возбуждения бесконтактного сельсина выполняется в виде двух катушек, имеющих форму колец. Катушки обмотки возбуждения располагаются неподвижно между лобовыми частями обмотки статора и тороидами.

Чтобы понять принцип действия бесконтактного сельсина, необходимо проследить путь его основного магнитного потока, который создается переменным током обмотки возбуждения. Начнем с правой части ротора. Пусть в данный момент времени поток направлен справа налево (рисунок 6.4). Для того, чтобы замкнуться вокруг создающих его катушек обмоток возбуждения, потоку необходимо пройти из правого полюса ротора в левый. Однако, между полюсами ротора имеется большой немагнитный промежуток, который оказывает потоку большое сопротивление. Вследствие этого поток устремляется в обход этого промежутка – через воздушный зазор между правым полюсом ротора и статора, а затем по зубцам, спинке статора и воздушному зазору между статором и левым полюсом ротора попадает в левый полюс ротора. Далее поток через воздушный зазор проходит в левый тороид, из которого попадает в стержни внешнего магнитопровода, правый тороид и, пройдя через воздушный зазор между правым тороидом и ротором, замыкается в правом полюсе ротора. Проходя по статору, переменный магнитный поток обмотки возбуждения пересекает витки обмотки синхронизации и наводит в ней ЭДС. Таким образом выполняется условие, необходимое для работы сельсина – наличие магнитной связи двух обмоток.

Величина магнитной связи обмотки возбуждения с той или иной фазой обмотки синхронизации зависит от углового положения ротора. Отсутствие скользящих контактов значительно увеличивает надежность работы и стабильность характеристик бесконтактных сельсинов по сравнению с контактными. Разницы между работой контактных и бесконтактных сельсинов в схемах синхронной связи нет.

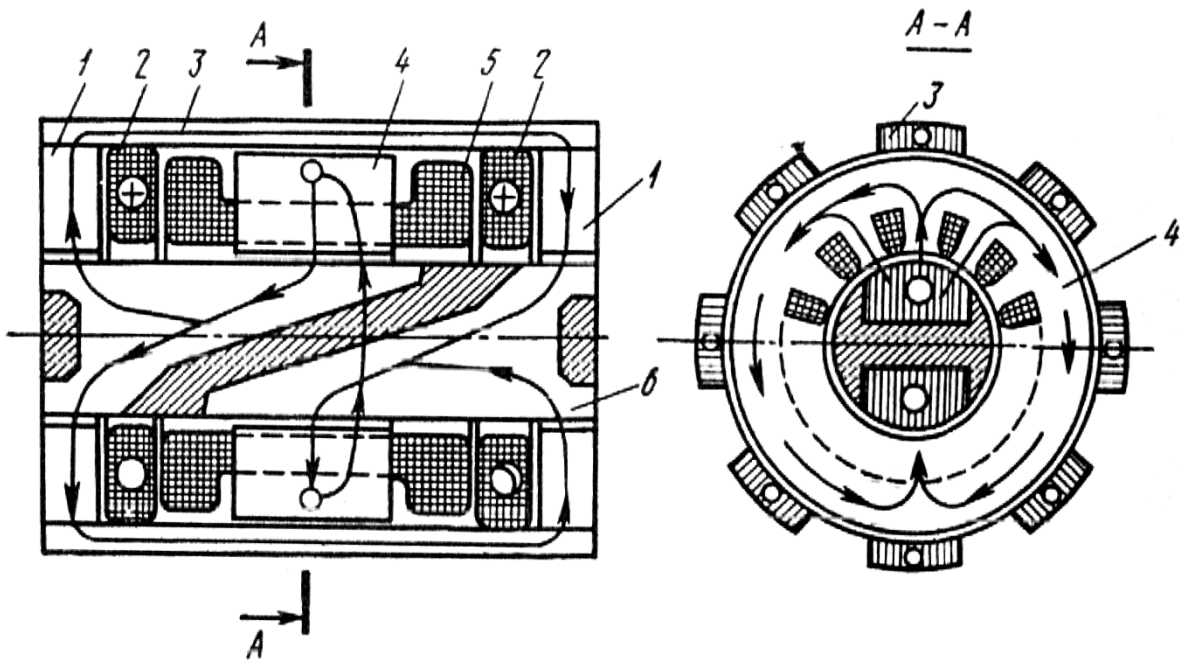


Рисунок 6.4 – К принципу действия сельсина конструкции Иосифьяна – Свечарника

К недостаткам бесконтактных сельсинов относится сложность их конструкции, а, следовательно, повышенная стоимость и низкий коэффициент мощности, обусловленный наличием на пути магнитного потока большого магнитного сопротивления (четыре воздушных зазора, магнитопровод и др.).

#### 6.4 Бесконтактные сельсины с кольцевым трансформатором

Бесконтактные сельсины с кольцевыми трансформаторами состоят из двух частей: машинной и трансформаторной, связанных только электрически (рисунок 6.5). Машинная часть не отличается от контактного сельсина. На статоре 1 расположена трехфазная обмотка синхронизации 2, на роторе 3 – обмотка возбуждения 4 (иногда и демпферная). Трансформаторная часть представляет собой двухобмоточный кольцевой трансформатор. Обмотки статора 5 с ферромагнитным сердечником 6 и ротора 7 с ферромагнитным сердечником 8 выполнены в виде сосредоточенных катушек, магнитные оси которых совпадают с направлением вала. Вследствие концентричного расположения при повороте ротора взаимоиндуктивность обмоток не меняется. При подаче на зажи-

мы статорной обмотки трансформатора переменного однофазного напряжения с его роторной обмотки снимается неизменное по амплитуде вторичное напряжение, и по проводам подается на обмотку возбуждения машинной части. Таким образом удается устранить скользящие контакты.

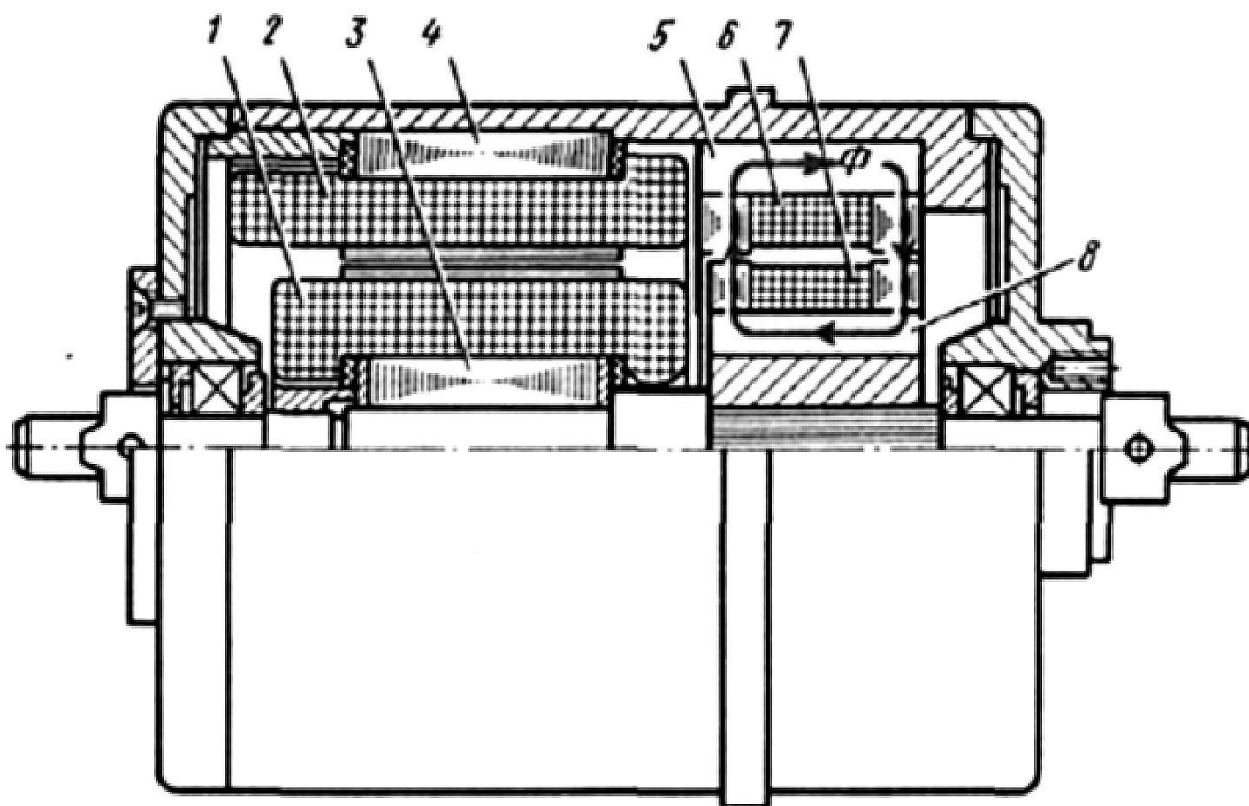


Рисунок 6.5 – Устройство бесконтактного сельсина с кольцевым трансформатором

Существует конструкция бесконтактного сельсина с кольцевым трансформатором, у которого ротор выполняется неявнополюсным. В пазах ротора располагается двух- или трехфазная обмотка. В случае выполнения двухфазной обмотки одна из фаз является обмоткой возбуждения, другая закорачивается накоротко и является демпферной обмоткой. При выполнении трехфазной обмотки две фазы соединяются параллельно и являются обмоткой возбуждения, оставшаяся фаза закорачивается накоротко и является демпферной обмоткой.

К недостаткам бесконтактных сельсинов с кольцевым трансформатором можно отнести большую мощность возбуждения по сравнению с контактными,

за счет двукратной передачи энергии через воздушный зазор (в трансформаторной и машинной частях). Из-за наличия трансформаторной части длина бесконтактного сельсина больше, соответственно более сложная конструкция и несколько выше стоимость. Однако недостатки этих сельсинов компенсирует высокая надежность. Кроме того, бесконтактные сельсины имеют меньший момент трения на валу, чем контактные.

### 6.5 Индикаторная схема синхронной связи

Простейшая схема состоит из двух одинаковых сельсинов и линии связи между ними (рисунок 6.6). Один из сельсинов является датчиком Д, другой – приемником П. Поворотом ротора сельсина-датчика задается тот или иной угол, ротор сельсина-приемника при этом следует за ротором датчика, обрабатывая заданный угол.

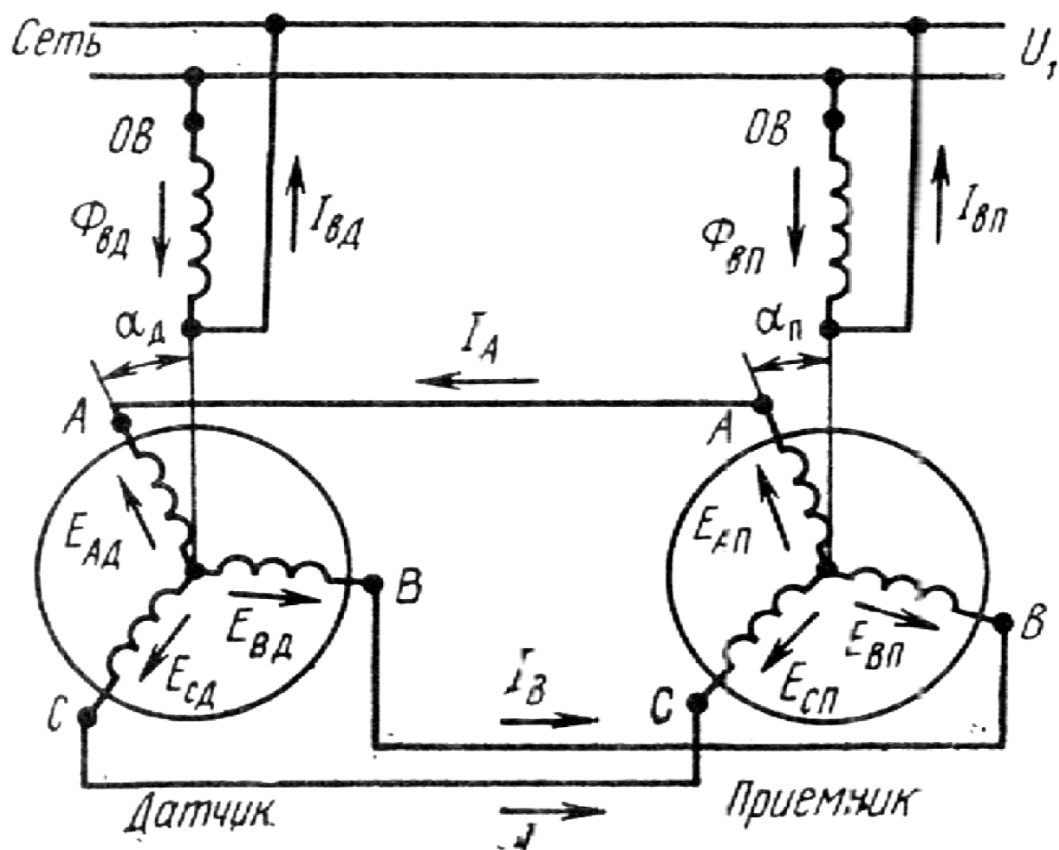


Рисунок 6.6 – Электрическая схема индикаторной системы синхронной связи

При работе сельсинов в индикаторной схеме синхронной связи обмотки возбуждения (ОВ) обоих сельсинов подключаются к одной и той же однофаз-

ной сети переменного тока. Концы фаз трехфазных обмоток синхронизации сельсина-приемника и сельсина-датчика соединяются друг с другом линиями связи. Переменные токи  $I_{ВД}$  и  $I_{ВП}$ , проходящие по однофазным ОВ сельсинов, создают в каждом из них пульсирующие магнитные потоки  $\Phi_{ВД}$  и  $\Phi_{ВП}$ , которые индуцируют в соответствующих фазах обмоток синхронизации сельсинов ЭДС –  $E_{АД}, E_{ВД}, E_{СД}$  для датчика и  $E_{АП}, E_{ВП}, E_{СП}$  для приемника. Величина ЭДС той или иной фазы обмотки синхронизации зависит от углового положения этой фазы по отношению к ОВ. Если роторы сельсина-приемника и сельсина-датчика имеют одинаковое угловое положение, то в соединенных между собой линиями связи фазах обмоток синхронизации сельсина-приемника и сельсина-датчика наводятся одинаковые ЭДС, которые взаимно уравновешивают друг друга и токи в фазах обмоток синхронизации и линиях связи отсутствует. Такое положение сельсинов называется согласованным.

При повороте ротора сельсина-датчика на некоторый угол  $\alpha_D$  сельсины выходят из согласованного положения, в результате равенство фазных ЭДС нарушается и в обмотках синхронизации и линиях связи возникнут уравнительные токи –  $I_A, I_B, I_C$ . Возникшие токи, протекая по обмоткам синхронизации сельсинов создают свои магнитные потоки, которые взаимодействуют с магнитными потоками ОВ, и в результате возникают вращающие моменты, которые стремятся повернуть роторы сельсина-приемника и сельсина-датчика в согласованное положение. Так как ротор датчика бывает обычно заторможен, а ротор приемника свободен, то под действием вращающего момента ротор приемника поворачивается до тех пор, пока не придет в согласованное с ротором датчика положение, т.е. повернется на угол  $\alpha_{П} \approx \alpha_D$ . Таким образом, с помощью индикаторной схемы синхронной связи осуществляется дистанционная передача угла.

В данной лабораторной работе необходимо провести исследование простейшей системы синхронной связи (рисунок 6.6). Однако в схемах автоматики часто встречаются более сложные системы, в которых от одного датчика работают несколько (до 30 и более) приемников (рисунок 6.7). Количество сельсинов-приемников ограничивается мощностью примененного сельсина-датчика, поэтому в таких системах в качестве датчика используются мощные сельсины.

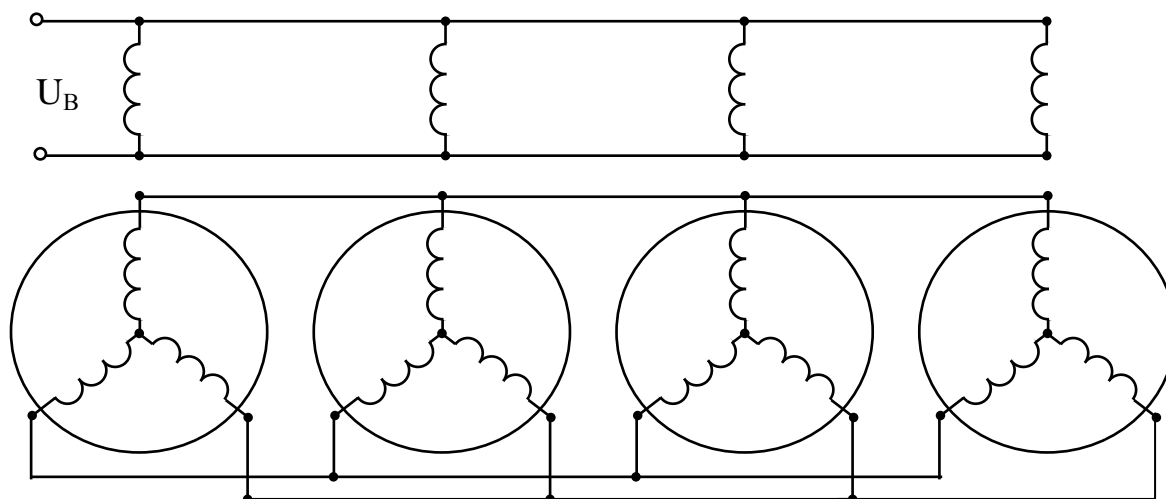


Рисунок 6.7 – Электрическая схема индикаторной системы синхронной связи с одним датчиком и тремя приемниками

Факторы, влияющие на точность работы сельсинов в индикаторных схемах синхронной связи:

1. Удельный синхронизирующий момент – момент, который создается сельсином-приемником при угле рассогласования в  $1$  град.
2. Момент трения приемника и момент сопротивления на его валу.
3. Сопротивление линии связи.
4. Магнитная и электрическая несимметрия – соответственно, неравенство магнитных сопротивлений сельсина на пути его потока возбуждения в различных положениях ротора и неравенство сопротивлений фаз обмоток синхронизации и соединяющих их проводов.
5. Количество сельсинов-приемников, подключенных к одному датчику.



6. Небаланс ротора приемника, шкалы или стрелки и время успокоения – время, необходимое для остановки сельсина-приемника после максимального рассогласования (на угол  $179 \text{ град}$  или  $181 \text{ град}$ ).

7. Напряжение и частота питающей сети.

### **6.6 Трансформаторная схема синхронной связи**

Простейшая трансформаторная схема синхронной связи состоит из двух сельсинов – приемника и датчика, усилителя и исполнительного двигателя, механически связанного с осью ротора сельсина-приемника (рисунок 6.8). На обмотку возбуждения сельсина-датчика подается однофазное напряжение. Ток возбуждения создает пульсирующее магнитное поле, которое, сцепляясь с обмоткой синхронизации датчика, индуцирует в ее фазах ЭДС –  $E_{AD}$ ,  $E_{BD}$ ,  $E_{CD}$ . Так как обмотка синхронизации датчика соединена линией связи с обмоткой синхронизации сельсина-приемника, то по обеим обмоткам и линиям связи протекут токи –  $I_A$ ,  $I_B$ ,  $I_C$ . Эти токи, протекая по фазам обмотки синхронизации приемника, создают в его магнитной цепи пульсирующие магнитные потоки –  $\Phi_{AP}$ ,  $\Phi_{BP}$ ,  $\Phi_{CP}$ , направленные по осям фаз обмотки синхронизации приемника. Потоки фаз приемника, складываясь, образуют результирующий магнитный поток  $\Phi_{II}$  обмотки синхронизации приемника, направленный под некоторым (зависящим от угла рассогласования) углом к выходной обмотке приемника («обмотки возбуждения»). Поток  $\Phi_{II}$ , пульсируя с частотой сети, наводит в выходной однофазной обмотке приемника ЭДС – выходное напряжение приемника.

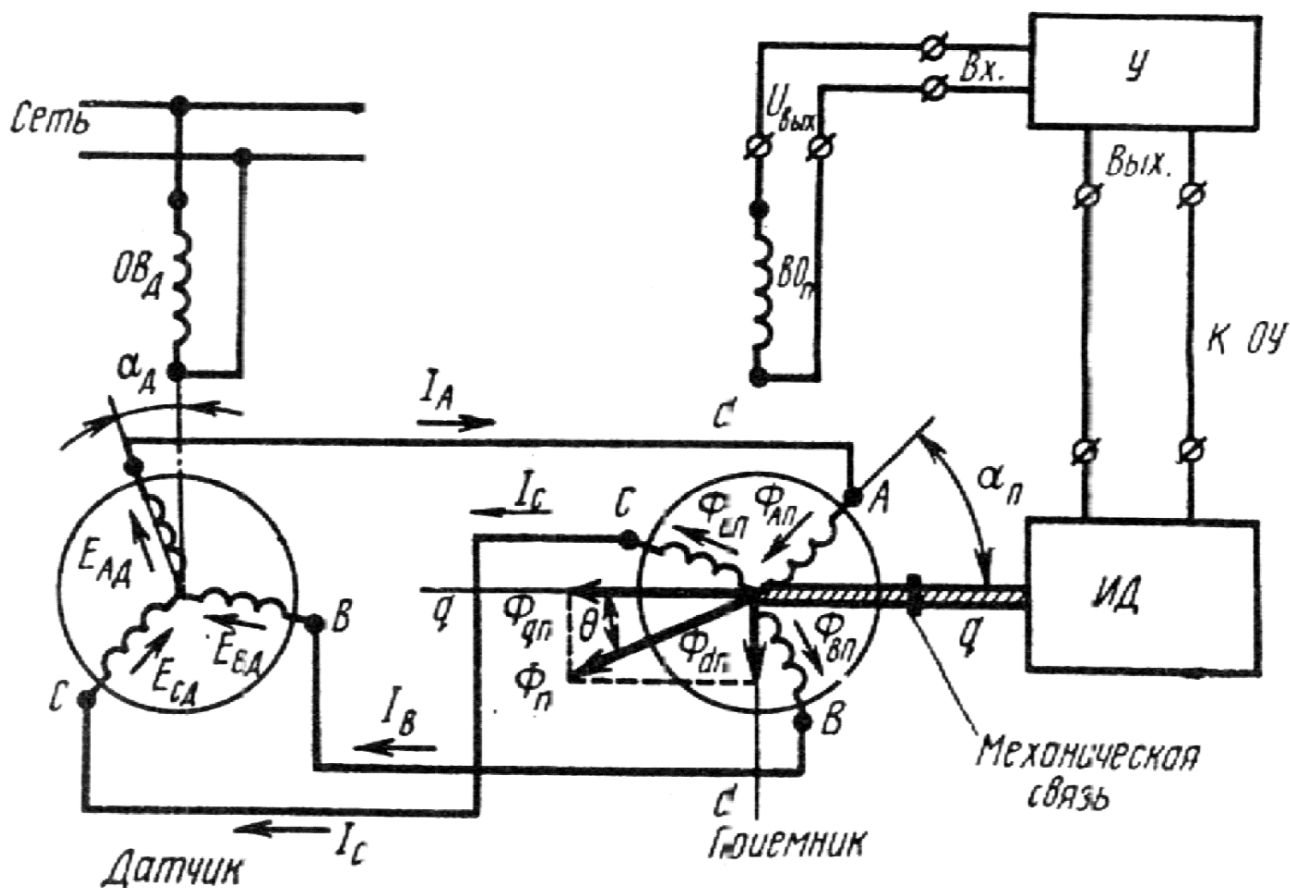


Рисунок 6.8 – Электрическая схема трансформаторной системы синхронной связи

Направление магнитного потока обмотки синхронизации приемника – его основного потока – зависит от взаимного положения роторов приемника и датчика. При повороте ротора датчика на угол  $\alpha_D$  и заторможенном роторе приемника синхронно с ротором датчика на тот же угол повернется магнитное поле приемника. Одновременно изменяется по закону синуса выходное напряжение приемника.

Согласованным положением сельсинов в трансформаторной схеме синхронной связи называется положение, при котором выходное напряжение сельсина-приемника равно нулю. В этом положении соединенные между собой фазы обмоток синхронизации датчика и приемника (в отличие от согласованного положения сельсинов в индикаторной схеме) не занимают одинакового положения по отношению к соответствующим обмоткам возбуждения. Положение

обмотки синхронизации датчика отличается от положения обмотки синхронизации приемника на угол  $90 \text{ град}$ .

Принцип действия трансформаторной схемы синхронной связи состоит в следующем: при повороте ротора сельсина-датчика на некоторый угол  $\alpha_D$  в сельсине-приемнике на тот же угол повернется магнитный поток, создаваемый обмоткой синхронизации, и на выходной обмотке сельсина-приемника, а, следовательно, и на входе усилителя  $У$ , (рисунок 6.8), появляется напряжение. Это напряжение после преобразования усилителем подается на обмотку управления исполнительного двигателя ИД, ротор которого начинает вращаться, поворачивая при этом ротор сельсина-приемника в сторону поворота ротора сельсина-датчика. Роторы двигателя и приемника вращаются до тех пор, пока ротор приемника не повернется на заданный датчиком угол  $\alpha_D$  и сельсины не придут в согласованное положение, при котором выходное напряжение сельсина-приемника, а также напряжение на выходе усилителя и на обмотке управления исполнительного двигателя равны нулю и система неподвижна.

Факторы, определяющие точность работы сельсинов в трансформаторной схеме синхронной связи:

1. Величина остаточного напряжения – напряжение на выходной обмотке приемника в согласованном положении.
2. Удельное выходное напряжение – напряжение при угле рассогласования в  $1 \text{ град}$ .
3. Удельная выходная мощность – мощность, которую может отдать выходная обмотка приемника при угле рассогласования в  $1 \text{ град}$ .

Остальные факторы те же, что и у индикаторного сельсина.

## 6.7 Задание

6.7.1 Ознакомиться с конструкцией контактных и бесконтактных сельсинов.

6.7.2 Провести исследование работы сельсинов в индикаторном режиме:

а) снять кривую ошибок  $\Delta\alpha = f(\alpha)$ , определить величину удельного синхронизирующего момента  $M_{УД}$  и время успокоения сельсина-приемника  $t_y$ ;

б) определить критический угол рассогласования сельсина – при работе без демпфера, ознакомиться конструкцией демпфера;

в) снять зависимости величины синхронизирующего момента  $M$ , токов в линии связи  $I_A, I_B, I_C$ , мощностей  $P_{ВП}, P_{ВД}$  и токов  $I_{ВП}$  и  $I_{ВД}$  возбуждения приемника и датчика от угла рассогласования  $\alpha$ .

6.7.3 Провести исследование работы сельсинов в трансформаторном режиме работы:

а) определить величину остаточного напряжения и ошибку асимметрии;

б) снять кривую ошибок  $\Delta\alpha = f(\alpha)$ ;

в) снять зависимости выходного напряжения сельсина-приемника, токов в линии связи, мощности и тока возбуждения датчика от угла рассогласования при различных сопротивлениях нагрузки  $R_n = 500 \text{ Ом}$  и  $R_n = \infty$ .

## 6.8 Расчеты и построения

6.8.1 Вычертить эскиз бесконтактного сельсина конструкции Иосифьяна – Свечарника в продольном разрезе, показав стрелками одну из магнитных силовых линий.

6.8.2 Построить на отдельном графике кривые ошибок сельсина-приемника в индикаторном и трансформаторном режимах  $\Delta\alpha = f(\alpha)$ .

6.8.3 Построить зависимости  $M, I_{ВП}, I_{ВД}, P_{ВП}, P_{ВД}, I_A, I_B, I_C = f(\alpha)$  для индикаторного режима работы.

6.8.4 Построить зависимости  $U_{ВЫХ}$ ,  $I_A$ ,  $I_B$ ,  $I_C$ ,  $P_{ВД}$ ,  $I_{ВД} = f(\alpha)$  при  $R_H = 500 \text{ Ом}$  и  $U_{ВЫХ} = f(\alpha)$  при  $R_H = \infty$  для трансформаторного режима работы.

6.8.5 Рассчитать удельную выходную мощность  $P_{ВЫХ \text{ уд}}$  и удельное выходное напряжение  $U_{ВЫХ \text{ уд}}$  сельсина-приемника в трансформаторном режиме.

### **6.9 Пояснения и указания к работе. Исследование работы сельсина в индикаторном режиме**

Кривая ошибок  $\Delta\alpha = f(\alpha)$  снимается при включении сельсинов по схеме, показанной на рисунке 6.9. На лабораторном стенде выводы, помеченные как P1, P2, P3, необходимо соединить через амперметр. Обмотку напряжения ваттметра необходимо подключить к выводам, помеченным U-U, а токовую обмотку ваттметра соединить последовательно с амперметром и подсоединить к выводам А-А. На обмотки возбуждения приемника и датчика подать номинальное напряжение, подключив данные обмотки к однофазной сети переменного тока. Перед началом опыта необходимо проверить, совпадает ли нуль шкалы датчика с нулевым показанием стрелки приемника. Если этого совпадения нет, то необходимо сельсин-приемник или датчик повернуть в стойке корпусов до совпадения нулей. Для снятия кривой ошибок задают поворот ротора датчика на углы от 0 до 360 град через каждые 10 град, при этом записываются углы поворота роторов приемника и датчика. Разность между показаниями приемника и датчика, выраженная в градусах, дает погрешность системы. Знак погрешности определяется исходя из того, что алгебраическая сумма – показание приемника плюс погрешность – должна равняться показанию датчика -  $\alpha_D = \alpha_{П} + \Delta\alpha$ .

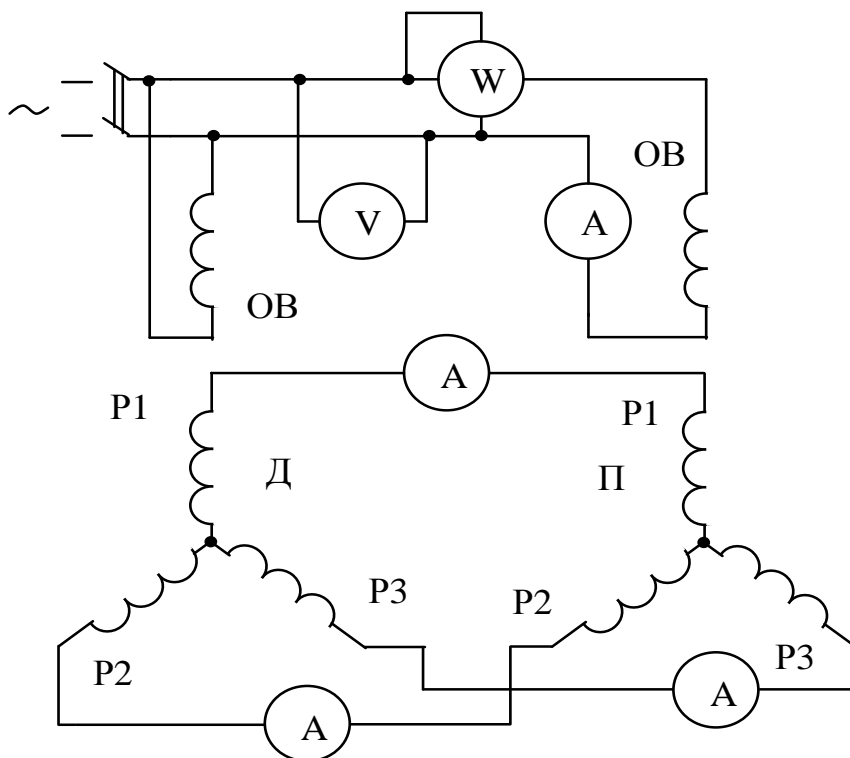


Рисунок 6.9 – Схема включения сельсинов в индикаторном режиме работы

Для повышения точности проводимого опыта кривую ошибок желательно снимать дважды: при вращении ротора датчика по часовой стрелке и против часовой стрелки. Именно таким образом определяется погрешность сельсинов на заводах-изготовителях. Кривая ошибок имеет характерный вид ломанной кривой (рисунок 6.10). Данные опыта заносятся в таблицу 6.1.

Таблица 6.1 – Экспериментальные данные кривой ошибок

По часовой стрелке			Против часовой стрелки		
$\alpha_{д}, град$	$\alpha_{п}, град$	$\Delta\alpha, град$	$\alpha_{д}, град$	$\alpha_{п}, град$	$\Delta\alpha, град$
0			0		
10			10		
20			20		
.....			.....		
360			360		



Рисунок 6.10 – Кривая ошибок сельсина-приемника

Точность сельсина определяется как полусумма абсолютных значений максимальных положительной и отрицательной погрешностей. В зависимости от величины погрешности индикаторные сельсины разделяются на три класса точности: I класс имеет погрешность от 0 до 0,75 град; II класс – от 0,75 до 1,5 град; III класс – от 1,5 до 2,5 град.

Определение удельного синхронизирующего момента производится по той же схеме, что и в предыдущем опыте. В экспериментальных установках синхронизирующий момент сельсина обычно определяется с помощью шкива и нити с грузом или динамометра. На оси сельсина-приемника укрепляется шкив. Вокруг шкива наматывается нить, на которую подвешивается груз или динамометр. Ротор датчика закрепляется в нулевом положении. Ротор сельсина-приемника согласовывается с ротором сельсина-датчика (при согласовании нить с грузом снимается). Посредством груза, подвешенного на нити, или динамометра, ротор приемника выводится из согласованного положения. Стрелка

приемника показывает угол рассогласования. Произведение веса груза на радиус шкива в месте прохождения нити дает величину синхронизирующего момента,  $H \cdot м$ :

$$M = \text{Вес} \cdot R \cdot 10^{-3}. \quad (6.1)$$

Удельный синхронизирующий момент определяется делением синхронизирующего момента при углах рассогласования *5 град* или *10 град* соответственно на *5 град* или *10 град*. Для более точного определения удельного синхронизирующего момента измерение необходимо провести 2-4 раза, путем рассогласования сельсинов в обе стороны от нулевого положения. Во время опыта напряжение возбуждения приемника и датчика должно оставаться постоянным, равным номинальному. Данные опыта заносятся в таблицу 6.2.

Таблица 6.2 – Определение удельного синхронизирующего момента

	Масса, $г$	Вес, $H$	$R$ , $мм$	$M$ , $H \cdot м$	$M_{уд}$ , $H \cdot м / град$
<i>5 град</i>					
<i>10 град</i>					

Для определения времени успокоения сельсина-приемника приемник и датчик устанавливаются так, чтобы в согласованном положении нулю шкалы датчика соответствовало нулевое положение стрелки приемника. Ротор датчика закрепляется. Выключается напряжение питания. Стрелка приемника устанавливается на *179* или *181 град*. Резким движением рубильника система включается на номинальное напряжение и одновременно пускается секундомер. Отсчет времени прекращается при полной остановке колебаний ротора сельсина-приемника. Для точного определения времени успокоения опыт нужно проделать 2-4 раза. Данные опыта заносятся в таблицу 6.3.



Таблица 6.3 – Время успокоения сельсина приемника

	179 град			181 град		
Время успокоения, сек						

Определение критического угла рассогласования приемника проводится только на установке с бесконтактными сельсинами. Для проведения этого опыта с сельсина-приемника снимается демпфер. Ротор датчика закрепляется в нулевом положении. Схема соединения та же, что и в предыдущем опыте. Поворотом стрелки приемника достигается рассогласование на некоторый небольшой (от 1 до 4 град) угол. Затем стрелка отпускается и ротор приемника успокаивается – приходит в согласованное положение. Минимальный угол рассогласования, при котором ротор, будучи отпущен, не успокаивается, а начинает вращаться – входит в асинхронный режим, называется критическим углом рассогласования. Опыт по определению критического угла следует начинать при рассогласовании на 1 или 2 град, увеличивая угол рассогласования каждый раз на 1 град. Останавливать вращающийся ротор нужно путем отключения питающего напряжения. Нельзя останавливать ротор сельсина-приемника под напряжением путем захвата стрелки. Это может привести либо к ранению руки, либо к поломке стрелки. Не следует также допускать длительной работы сельсина в асинхронном режиме, так как это ведет к перегреву обмоток и механическому износу подшипников. После опыта демпфер необходимо поставить на место. Результат опыта записывается в виде:  $\alpha_{\text{КРИТ}} = \dots \text{град}$ .

Определение зависимости синхронизирующего момента, токов в линии связи, мощности и токов, потребляемых приемником и датчиком, от угла рассогласования проводится по той же схеме опыта. Напряжение возбуждения сельсина-датчика и сельсина-приемника в течение всего опыта должно оставаться постоянным, равным номинальному. До начала опыта сельсины необходимо согласовать на нуле шкалы. Первая запись показаний приборов производится в согласованном положении. Затем с помощью шкива и нити с грузом или динамометром задается угол рассогласования в пределах от 0 до 180 град

через каждые 15 или 20 *град* и производится запись показаний приборов и величины веса груза (момента). Необходимо зафиксировать угол рассогласования, который соответствует максимальному моменту. Во время определения максимального момента, а также при снятии кривой момента после ее прохода через максимум необходимо двумя пальцами руки ограничивать разбег стрелки. При углах рассогласования от 30 до 180 *град* для избежания перегрева сельсинов все испытания следует проводить максимально быстро. Все величины, относящиеся к датчику или приемнику, определяются при соответствующем положении ключа №3 (ключ в положении Д – датчик, в положении П – приемник). Данные опыта заносятся в таблицу 6.4. Примерный вид экспериментальных кривых представлен на рисунке 6.11.

Таблица 6.4 – Зависимости синхронизирующего момента, токов в линии связи, мощности и токов от угла рассогласования

$\alpha$ , <i>град</i>	$G$ , <i>кг</i>	$M$ , <i>Н·м</i>	$I_{ВП}$ , <i>А</i>	$P_{ВП}$ , <i>Вт</i>	$I_{ВД}$ , <i>А</i>	$P_{ВД}$ , <i>Вт</i>	$I_A$ , <i>А</i>	$I_B$ , <i>А</i>	$I_C$ , <i>А</i>	$\cos\varphi$
0										
20										
40										
.....										
360										

Коэффициент мощности:

$$\cos\varphi = \frac{P_{ВД}}{U \cdot I_{ВД}}. \quad (6.2)$$

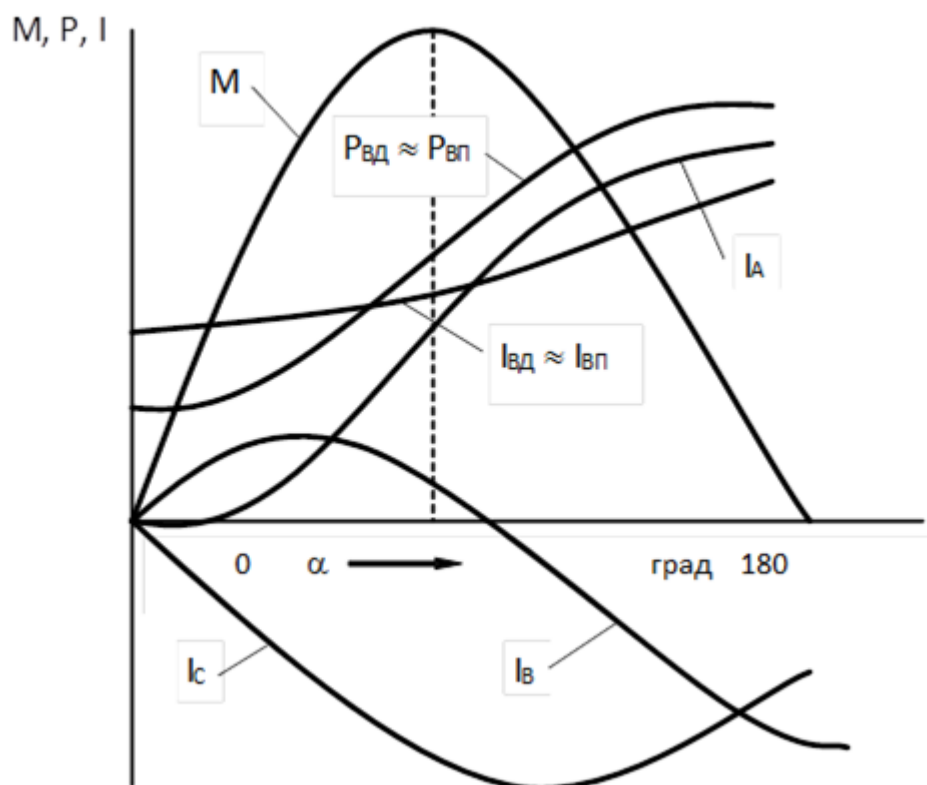


Рисунок 6.11 – Зависимости синхронизирующего момента, токов в линии связи, мощности и токов возбуждения от угла рассогласования

### 6.10 Исследование работы сельсинов в трансформаторном режиме

Для исследование работы сельсинов в трансформаторном режиме собирается схема (рисунок 6.12), которая получается из индикаторной схемы путем отключения обмотки возбуждения приемника от питающей сети и подключения ее к вольтметру или осциллографу с большими входными сопротивлениями. Обмотка возбуждения сельсина-датчика подключается к однофазной сети с номинальным напряжением и частотой. В работе необходимо определить остаточное напряжение, ошибку асимметрии и точность сельсинов.

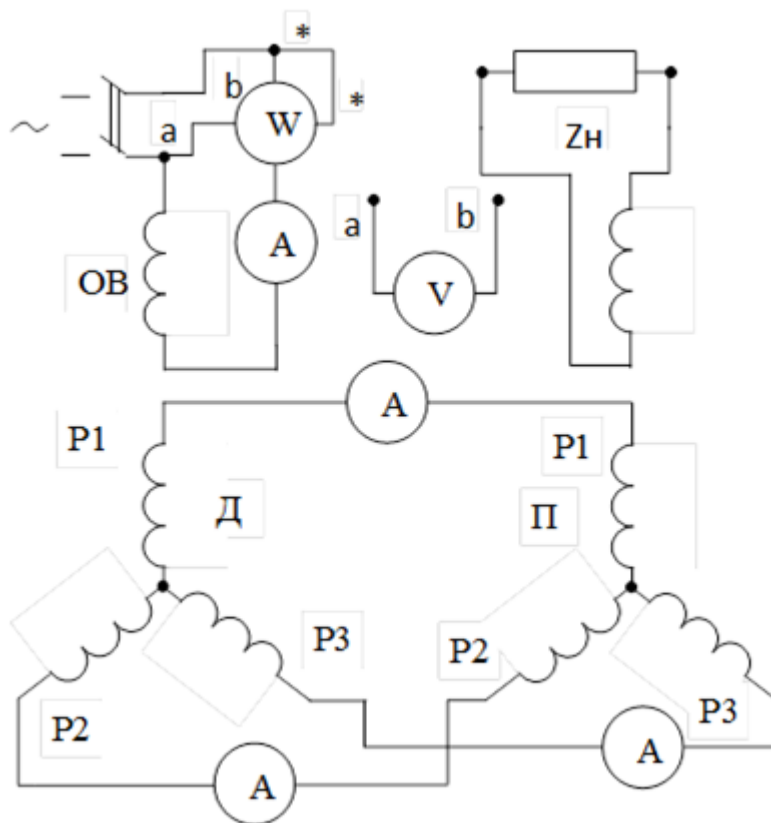


Рисунок 6.12 – Схема включения сельсинов в трансформаторном режиме работы

В начале работы необходимо определить остаточное напряжение. Для этого ротор сельсина-датчика фиксируется в неподвижном положении, а ротор сельсина-приемника поворачивается до тех пор, пока вольтметр, подключенный к обмотке возбуждения (в данном случае она является выходной) приемника, не покажет минимального напряжения.

Для определения ошибки асимметрии корпус сельсина-приемника фиксируется в стойке в таком положении, при котором нулю шкалы датчика и нулю стрелки приемника соответствует минимум выходного напряжения. Затем с помощью стрелки ротор приемника поворачивается на  $180 \text{ град}$ . Если в этом положении ротора выходное напряжение сельсина-приемника снова будет минимальным сельсин не имеет асимметрии. В случае наличия асимметрии ротор приходится поворачивать на некоторый угол в ту или иную сторону от  $180 \text{ град}$  с тем, чтобы добиться минимального напряжения. Величина этого угла, выраженная в градусах, и дает ошибку асимметрии.

Точность сельсинов в трансформаторном режиме работы определяется следующим образом. Ротор сельсина-датчика выставляется на нуле шкалы. Корпус сельсина-приемника фиксируется в стойке в таком положении, при котором нулевому положению стрелки приемника соответствует минимальное выходное напряжение. Затем ротор датчика поворачивается на угол  $20 \text{ град}$  и фиксируется. Стрелка приемника вместе с ротором поворачивается также на  $20 \text{ град}$ . В этом положении снова должен быть минимум выходного напряжения. Если его нет, то он достигается поворотом ротора приемника в ту или иную сторону от  $20 \text{ град}$ . Отклонение стрелки от  $20 \text{ град}$  дает величину погрешности сельсина-приемника в данном положении. Знак погрешности определяется точно так же, как и у сельсинов в индикаторном режиме работы. Повторяя вышеописанное через каждые  $20 \text{ град}$  в диапазоне от 0 до  $360 \text{ град}$ , получим зависимость погрешности от угла поворота  $\Delta\alpha = f(\alpha)$ . Внешний вид этой зависимости тоже имеет вид ломанной кривой. Для более точного определения погрешности следует пользоваться катодным осциллографом, который позволяет лучше фиксировать минимум выходного напряжения. Точность сельсина определяется аналогично определению точности сельсина в индикаторном режиме. В зависимости от величины погрешности трансформаторные сельсины делятся на три класса точности: I класс имеет погрешность не более  $0.25 \text{ град}$ ; II класс – не более  $0.5 \text{ град}$ ; III класс – не более  $0.75 \text{ град}$ .

Следующий опыт выполняется на той же схеме соединения сельсинов. Ротор сельсина-датчика закрепляется в нулевом положении. Ротор сельсина-приемника фиксируется в положении, при котором выходное напряжение минимально. В этом положении записывается первое показание приборов. Затем ротор приемника поворачивается на  $5, 10, 20, 40$  и т.д. до  $360 \text{ град}$  через каждые  $20 \text{ град}$  от первоначального положения, и в каждом из положений записывается показание приборов. Опыт проводится дважды:

1. При сопротивлении нагрузки  $R_H = \infty$ .
2. При сопротивлении нагрузки  $R_H = 500 \text{ Ом}$  где  $R_H$  – сопротивление, подключаемое к выходной обмотке приемника.

Ток в линии связи измеряется только во втором случае. Для измерения выходного напряжения необходимо использовать высокоомный вольтметр. Все необходимые данные следует записать в таблицу 6.5.

Таблица 6.5 – Зависимости токов, мощностей и выходного напряжения от угла рассогласования

$R_H = 500 \text{ Ом}$							$R_H = \infty$			
$\alpha,$ <i>град</i>	$I_{ВД},$ <i>A</i>	$P_{ВД},$ <i>Вт</i>	$I_A,$ <i>A</i>	$I_B,$ <i>A</i>	$I_C,$ <i>A</i>	$U_{ВЫХ},$ <i>B</i>	$\alpha,$ <i>град</i>	$I_{ВД},$ <i>A</i>	$P_{ВД},$ <i>Вт</i>	$U_{ВЫХ},$ <i>B</i>
0							0			
20							20			
...							...			
360							360			

Примерный вид экспериментальных характеристик показан на рисунках 6.13 – 6.15.

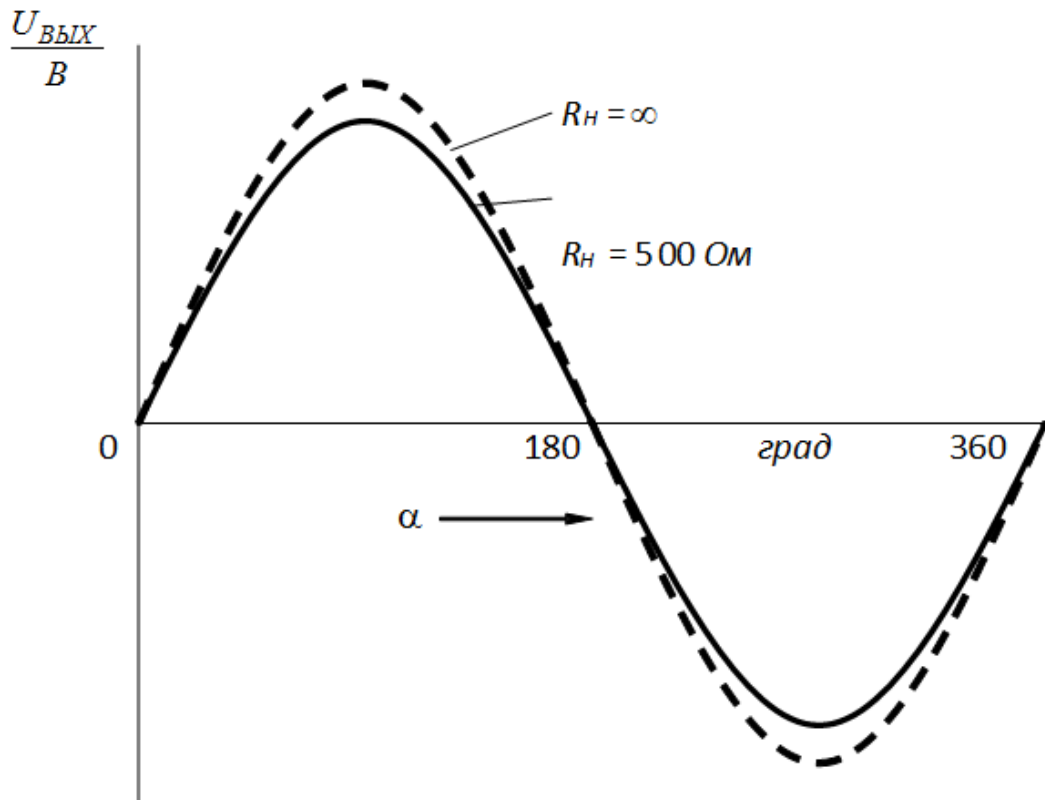


Рисунок 6.13 – Зависимости выходного напряжения сельсина-приемника от угла рассогласования при разных величинах нагрузки

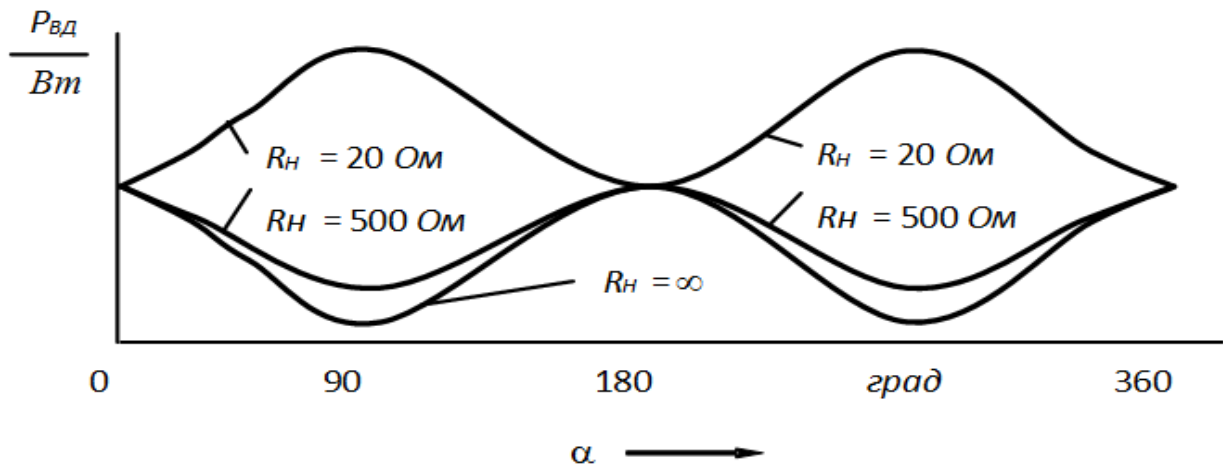


Рисунок 6.14 – Зависимости потребляемой мощности возбуждения сельсина-датчика от угла рассогласования при разных величинах нагрузки

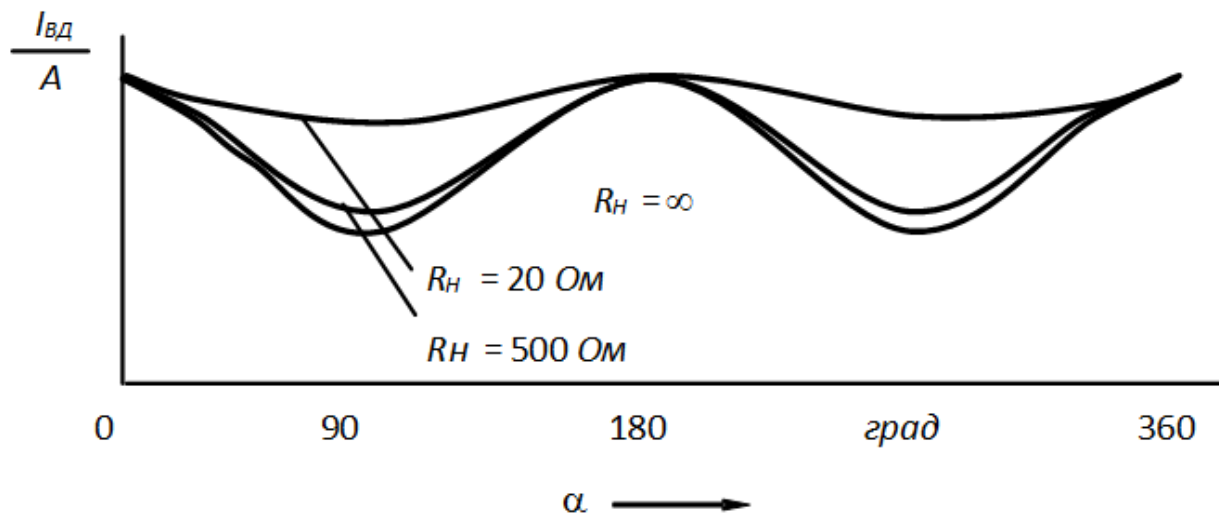


Рисунок 6.15 – Зависимости токов возбуждения сельсина-датчика от угла рассогласования при разных величинах нагрузки

После окончания экспериментов необходимо определить удельное выходное напряжение  $U_{ВЫХ\ УД}$  и удельную выходную мощность  $P_{ВЫХ\ УД}$ , которые определяются путем деления  $U_{ВЫХ}$  и  $P_{ВЫХ}$ , полученных при угле рассогласования 5 или 10 град соответственно на 5 или на 10 град.

### 6.11 Анализ результатов исследований

Погрешность сельсина-приемника, работающего в индикаторном режиме, зависит от целого ряда факторов. При выполнении данной лабораторной работы напряжение и частота питающей сети поддерживаются постоянными, сопротивление линии связи, вследствие малой ее длины, близко к нулю, от датчика работает только один приемник, ротор сельсина-приемника статически отбалансирован. Это значит, что перечисленные факторы не влияют в данном случае на величину погрешности синхронной передачи. Удельный синхронизирующий момент во время эксперимента не изменяется по величине.

Характер кривой ошибок  $\Delta\alpha = f(\alpha)$  (рисунок 6.10) определяется в основном магнитной и электрической несимметрией, а также моментом трения. Из-за момента трения кривые ошибок в индикаторном режиме при вращении



сельсинов в различных направлениях (по и против часовой стрелки) отличаются друг от друга. Момент трения может существенно увеличивать статическую погрешность особенно в контактных сельсинах.

Электрическая несимметрия ощущается больше всего в контактных сельсинах с обмоткой синхронизации на роторе. В этом случае, вследствие непостоянства величины переходных сопротивлений скользящих контактов, активные сопротивления фаз обмоток синхронизации не остаются постоянными, что приводит к погрешностям как в индикаторной, так и в трансформаторной схеме синхронной связи. В бесконтактных сельсинах электрическая несимметрия возникает за счет неравенства собственных сопротивлений обмоток и линии связи. Однако величины сопротивлений обмоток контролируются заводом-изготовителем, поэтому они примерно одинаковы. Поэтому небольшое отличие собственных сопротивлений обмоток фаз синхронизации не может привести к ощутимым погрешностям в синхронной передаче.

К значительным погрешностям в системах синхронной связи, как индикаторных, так и трансформаторных, приводит магнитная несимметрия, которая возникает, во-первых, за счет неодинаковой магнитной проводимости сердечников статора (или ротора) в различных радиальных направлениях из-за неравенства сопротивлений стали, наличия короткозамкнутых контуров и т.п., во-вторых, за счет неравенства величин воздушного зазора, который на практике трудно выполнить равномерным из-за наличия поля допусков на обработку деталей и, в-третьих, за счет зубчатости статора (ротора).

Магнитная несимметрия, возникающая за счет первых двух причин, приводит к погрешностям неопределенного характера. Эти погрешности по-разному влияют на форму кривой ошибок. Магнитная несимметрия, возникающая по третьей причине, приводит к появлению зубцовых гармоник (в кривой момента индикаторных сельсинов и в кривой ЭДС трансформаторных сельсинов). Погрешности от зубцовых гармоник обычно имеют периодичность, равную (или кратную) числу зубцов статора (ротора). С целью уменьшения зубцовых гармоник выполняется скос пазов статора или полюсов ротора сельсинов на одно зубцовое деление. Однако это не приводит к полному устранению зуб-

цовых гармоник, во первых, из-за неточности скоса, что, как правило, имеет место на практике, во-вторых, из-за неравномерности воздушного зазора в аксиальном и различных радиальных направлениях и, в-третьих, из-за наличия торцевых потоков – потоков выпучивания.

Зубцовые гармоники в сельсинах с явно выраженными полюсами могут быть значительно уменьшены за счет правильного выбора величины полюсной дуги. В индикаторных сельсинах фактическая дуга  $b_{\Pi}'$  полюса должна быть примерно равна (чуть меньше) целому числу  $N$  зубцовых делений  $t_Z$ :  $b_{\Pi}' = N \cdot t_Z$ .

В трансформаторных сельсинах фактическая дуга полюса должны быть примерно равна (чуть меньше):  $b_{\Pi}' = (N + 0.5) \cdot t_Z$ .

Однако, несмотря на принятие всех вышеперечисленных мер, зубцовые гармоники в сельсинах полностью устранить не удается и они, как правило, влияют на величину погрешности сельсинов.

Время успокоения сельсина-приемника и критический угол рассогласования сельсинов зависят, во-первых, от соотношения активного и индуктивного сопротивлений обмоток синхронизации, во-вторых, от момента инерции ротора. Чем больше активное сопротивление, меньше индуктивное сопротивление и момент инерции ротора, тем меньше время успокоения сельсинов и больше критический угол рассогласования. Однако увеличение активного и уменьшение индуктивного сопротивления, как правило, приводят к уменьшению удельного синхронизирующего момента сельсина. Именно поэтому, с целью уменьшения времени успокоения, сельсины снабжаются обычно специальными демпферами – электромагнитными или механическими.

Наибольшее распространение имеют два способа гашения колебаний: внутреннее электромагнитное демпфирование с помощью специальных короткозамкнутых контуров, размещаемых вдоль поперечной оси сельсина, и внешнее демпфирование — магнитоэлектрическое и механическое. Следует также отметить, что на характер затухания колебаний ротора приемника оказывает

влияние момент трения в подшипниках и между контактными кольцами и щетками.

Время затухания при некотором начальном малом угле рассогласования вычисляется по следующей формуле:

$$t_{\text{зат}} = \frac{\ln \left[ 1 + \frac{\theta_o}{2\theta_{TP}} \left( 1 - e^{-\nu} \right) \right]}{\lambda}, \quad (6.3)$$

где  $\theta_o$  – начальный угол рассогласования;

$\theta_{TP} = \frac{M_{TP}}{m}$  – зона нечувствительности, определяемая моментом сухого

трения и удельным синхронизирующим моментом;

$\nu = e^{-\pi\lambda/\nu_o}$  – декремент затухания колебаний;

$\nu_o = \sqrt{m/J_p}$  – угловая скорость свободных колебаний;

$J_p$  – момент инерции ротора;

$\lambda = \left( \sigma_D + T_{D1} \right) / (2J_p)$  – коэффициент затухания колебаний, обусловленный внутренним демпфированием и внешним магнитоэлектрическим демпфером;

$T_D, T_{D1}$  – постоянные внутреннего и внешнего демпфирования.

Для выяснения физической природы внутреннего демпфирования рассмотрим режим малых качаний ротора приемника около согласованного положения. В этом случае трехфазную обмотку синхронизации можно заменить фазой  $q$  (рисунок 6.16). При качаниях ротора приемника его магнитный поток возбуждения пересекает витки обмотки синхронизации и наводит в ней кроме трансформаторной ЭДС еще ЭДС вращения, величина которой пропорциональна угловой скорости ротора. Частота ЭДС вращения равна частоте сети. Под действием этой ЭДС в поперечном контуре сельсина возникают добавочные токи. Эти токи индуцируют в короткозамкнутых контурах датчика и приемника токи, что приводит к превращению электромагнитной энергии, запасенной в контуре  $q$  за счет вращения ротора, в тепло, выделяемое в короткозамкнутых контурах. Нетрудно видеть, что в создании демпферного момента

короткозамкнутые контуры датчика и приемника выполняют одинаковую роль.

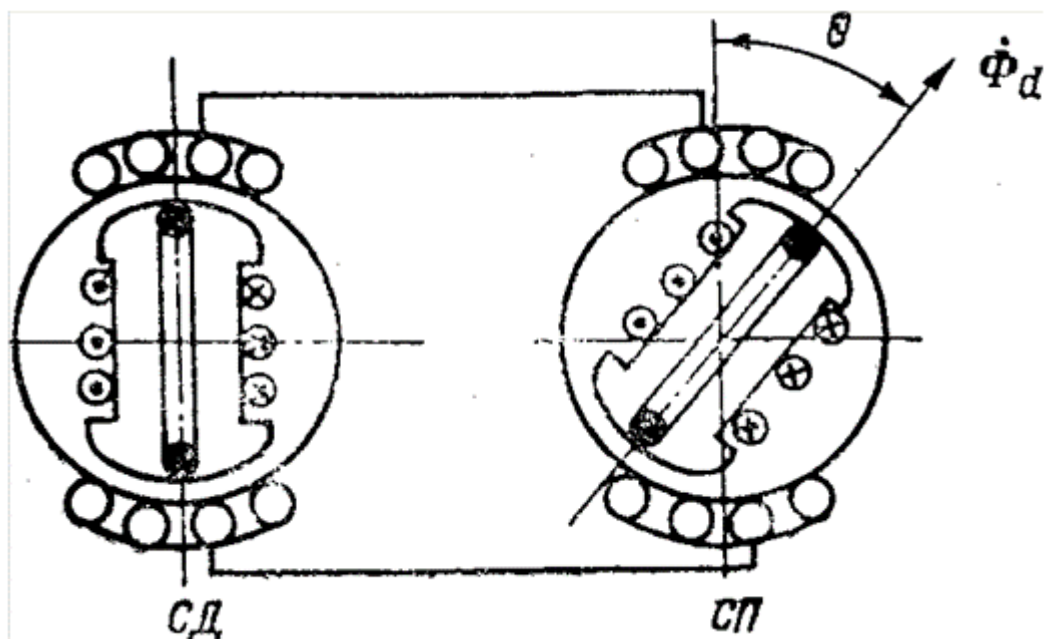


Рисунок 6.16 – К пояснению физической природы внутреннего демпфирования сельсинов

С увеличением частоты сети за счет роста индуктивных сопротивлений эффективность внутреннего демпфирования резко падает, поэтому в синхронных передачах на повышенных частотах дополнительно применяют внешние демпферные устройства.

Зависимость синхронизирующего момента от угла рассогласования сельсинов близка к синусоиде (рисунок 6.11). Если при выводе этой зависимости пренебречь разностью магнитных проводимостей по продольной и поперечной осям сельсина, а также влиянием токов обмотки синхронизации на поток сельсина и ток обмотки возбуждения, то эта зависимость становится чисто синусоидальной.

В реальных сельсинах всегда имеет место влияние токов обмотки синхронизации на поток сельсина и ток обмотки возбуждения. Кроме того, у большинства сельсинов, работающих в индикаторной системе синхронной связи, магнитные сопротивления по продольной и поперечной осям неравны. Это приводит к тому, что кривая зависимости  $M = f(\alpha)$  отклоняется от синусоиды. Обычно у явнополусных сельсинов максимум кривой смещается в сторону

меньших углов (угол  $\alpha$  меньше  $90$  град), а в неявнополюсных сельсинов – в сторону больших углов (угол  $\alpha$  больше  $90$  град).

В индикаторном режиме при увеличении угла рассогласования наблюдается увеличение мощностей и токов, потребляемых сельсинами из сети (рисунок 6.11). Это объясняется тем, что при увеличении угла рассогласования увеличивается неравенство фазных ЭДС датчика и приемника, соответственно увеличиваются уравнивающие токи в обмотках синхронизации. Увеличение уравнивающих токов ведет к увеличению токов в обмотках возбуждения приемника и датчика, а также к увеличению потребляемых из сети мощностей, аналогично тому, как это имеет место в первичных обмотках трансформаторов при увеличении тока во вторичных обмотках. Токи обмоток синхронизации как в индикаторном, так и в трансформаторном режимах изменяются при увеличении угла рассогласования по синусоидальному закону.

Выходное напряжение сельсина-приемника в трансформаторном режиме изменяется по закону синуса от угла рассогласования (рисунок 6.13). Это объясняется тем, что по закону синуса изменяется потокосцепление выходной обмотки с потоком, создаваемым токами обмотки синхронизации сельсина-приемника. Величина выходного напряжения зависит от сопротивления нагрузки точно также, как вторичное напряжение любого трансформатора. Чем меньше сопротивление нагрузки, тем больше ток выходной обмотки, тем больше падение напряжения на внутренних сопротивлениях обмоток сельсинов и меньше выходное напряжение.

Выходная мощность сельсина-приемника в трансформаторном режиме зависит от величины сопротивления нагрузки: при  $R_n = \infty$  она равна нулю; при уменьшении  $R_n$  до определенного значения она растет, а затем падает, как у любого трансформатора.

Характер изменения мощности  $P_{ВД}$  и  $I_{ВД}$ , потребляемых сельсином-датчиком из сети в трансформаторном режиме при изменении угла рассогласования  $\alpha$ , зависит от ряда факторов: величины и характера нагрузки на выходной обмотке приемника; конструкции сельсина-приемника – наличия или отсут-

вия явно выраженных полюсов. На рисунках 6.14, 6.15 представлены эти зависимости, анализируя которые, нетрудно заметить, что токи и мощности, потребляемые датчиком в трансформаторном режиме, изменяются при изменении угла рассогласования примерно по синусоидальному закону. Причем при угле  $\alpha$  равным нулю и  $180$  град мощность  $P_{ВД}$  и ток  $I_{ВД}$  не зависят от характера нагрузки. Это объясняется тем, что выходное напряжение сельсина-приемника в этом случае равно нулю и ток в выходной обмотке отсутствует.

## 6.12 Контрольные вопросы

6.12.1 Что называется электрической системой синхронной связи?

6.12.2 Какие системы синхронной связи применяются на практике и с помощью каких электрических машин они осуществляются?

6.12.3 Объясните конструкцию контактных сельсинов. Укажите их недостатки.

6.12.4 Объясните конструкции бесконтактных сельсинов. Укажите их недостатки.

6.12.5 Через какие элементы (последовательно) проходит силовая линия основного магнитного потока в бесконтактном сельсине.

6.12.6 Каков принцип действия индикаторной системы синхронной связи?

6.12.7 От каких факторов зависит точность работы сельсинов в индикаторной системе синхронной связи.

6.12.8 Каков принцип действия трансформаторной системы синхронной связи?

6.12.9 От каких факторов зависит точность работы сельсинов в трансформаторной системе синхронной связи.

6.12.10 На какие классы разделяются индикаторные и трансформаторные сельсины по точности?

6.12.11 Что называется:

а) Удельным синхронизирующим моментом? От чего он зависит?

б) Удельным выходным напряжением? Как они определяются?

6.12.12. Как определяются:

а) Время успокоения сельсинов? От чего зависит его величина?

б) Критический угол рассогласования?

6.12.13 Как определяется погрешность сельсинов в индикаторном и трансформаторном режимах?

## **7 Лабораторная работа № 4. Испытание исполнительного двигателя постоянного тока**

### **7.1 Общие сведения**

Цель настоящей работы состоит в исследовании свойств исполнительного двигателя постоянного тока (ИДПТ). В качестве ИДПТ могут использоваться коллекторные электрические машины постоянного тока с возбуждением либо от постоянного магнита, либо с помощью обмотки, расположенной на явно выраженных неподвижных полюсах (независимое возбуждение). Подробно данные электрические машины были рассмотрены в разделе 4.

Несмотря на ряд существенных недостатков, связанных с наличием скользящего контакта между щеткой и коллектором, ИДПТ широко используются в системах автоматического управления, регулирования и контроля, поскольку обладают и рядом положительных качеств, в частности такими как: плавное, широкое и экономичное регулирование частоты вращения; практическое отсутствие ограничений на максимальную и минимальную частоту вращения; большие пусковые моменты; хорошая линейность механических, а при якорном управлении и регулировочных характеристик.

Как и любые исполнительные двигатели, эти имеют две обмотки: обмотку возбуждения и обмотку управления. При этом напряжение управления может подаваться либо на обмотку якоря, либо на обмотку возбуждения. По-

этому различают якорное и полюсное управление. В данной лабораторной работе необходимо произвести испытание ИДПТ при полюсном управлении.

## 7.2 Задание

7.2.1 Ознакомиться с конструкцией ИДПТ и его техническими данными. Записать паспортные данные электрических машин и измерительных приборов. Номинальные данные: двигатель СЛ-261 ( $n = 3600$  об/мин,  $P_2 = 24$  Вт,  $U_n = 110$  В,  $I_n = 0,53$  А), генератор СЛ-221А ( $P_2 = 13$  Вт,  $U_n = 110$  В,  $I_n = 0,35$  А).

7.2.2 Собрать схему (рисунок 7.1) для снятия характеристик ИДПТ.

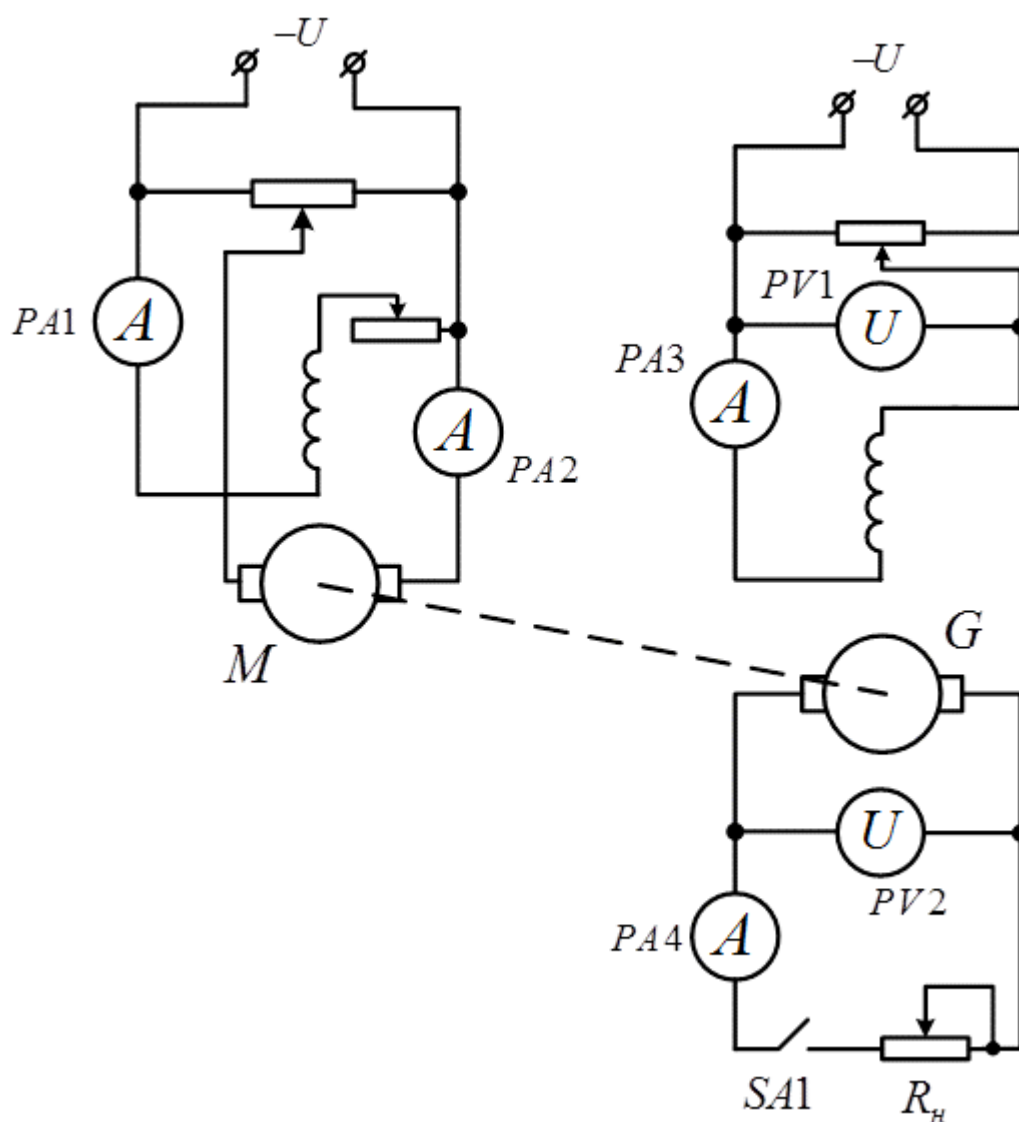


Рисунок 7.1 – Схема для проведения опыта



### 7.2.3 Снять и построить рабочие характеристики ИДПТ

$$n, M, I_a, P_1, \eta = f(P_2) \text{ при } U = U_n = const \text{ и } I_e = I_{en} = const$$

Рабочие характеристики двигателя снимают при номинальном токе возбуждения и номинальном напряжении якоря двигателя. Опытное определение рабочих характеристик начинают с установки номинального режима работы двигателя. Для этого после пуска двигателя включают выключатель SA1 и регулируя сопротивление  $R_n$  (ток якоря генератора), нагружают двигатель до номинальной нагрузки на валу  $P_{2n}$ , затем, уменьшая сопротивлением ток в обмотке возбуждения двигателя, доводят его частоту вращения при номинальном напряжении двигателя до номинальной  $n_n$ .

После установки номинального режима работы определяется номинальный ток возбуждения двигателя  $I_{en}$ , который в процессе испытания поддерживается постоянным. Затем двигатель нагружают, в качестве нагрузки используя генератор постоянного тока (рисунок 7.1). Ток якоря двигателя увеличивают до  $1,25 \cdot I_n$  путем изменения нагрузки на валу двигателя, что достигается регулированием нагрузочного сопротивления в цепи генератора  $R_n$ . Затем, изменяя нагрузочное сопротивление  $R_n$ , снижают ток якоря  $I_a$  примерно с одинаковыми интервалами, фиксируя показания приборов. Учитывая, что снимаемые зависимости нелинейны, необходимо снять 5-7 точек характеристики. Данные измерений и расчета заносят в таблицу 7.1.

Таблица 7.1 – Рабочие характеристики

№ опы та	Измеренные величины					Расчетные величины						
	Двигатель			Генератор		Генератор			Двигатель			
	$I_a$	$I_e$	$n$	$U_G$	$I_G$	$P_{2G}$	$P_{2G}^*$	$\eta_G$	$P_1$	$P_2$	$\eta$	$M$
mA	mA	об/мин	B	mA	Bm	o.e.	%	Bm	Bm	%	H·m	

По данным таблицы 7.1 строят рабочие характеристики ИДПТ. Вид этих характеристик показан на рисунке 7.2.

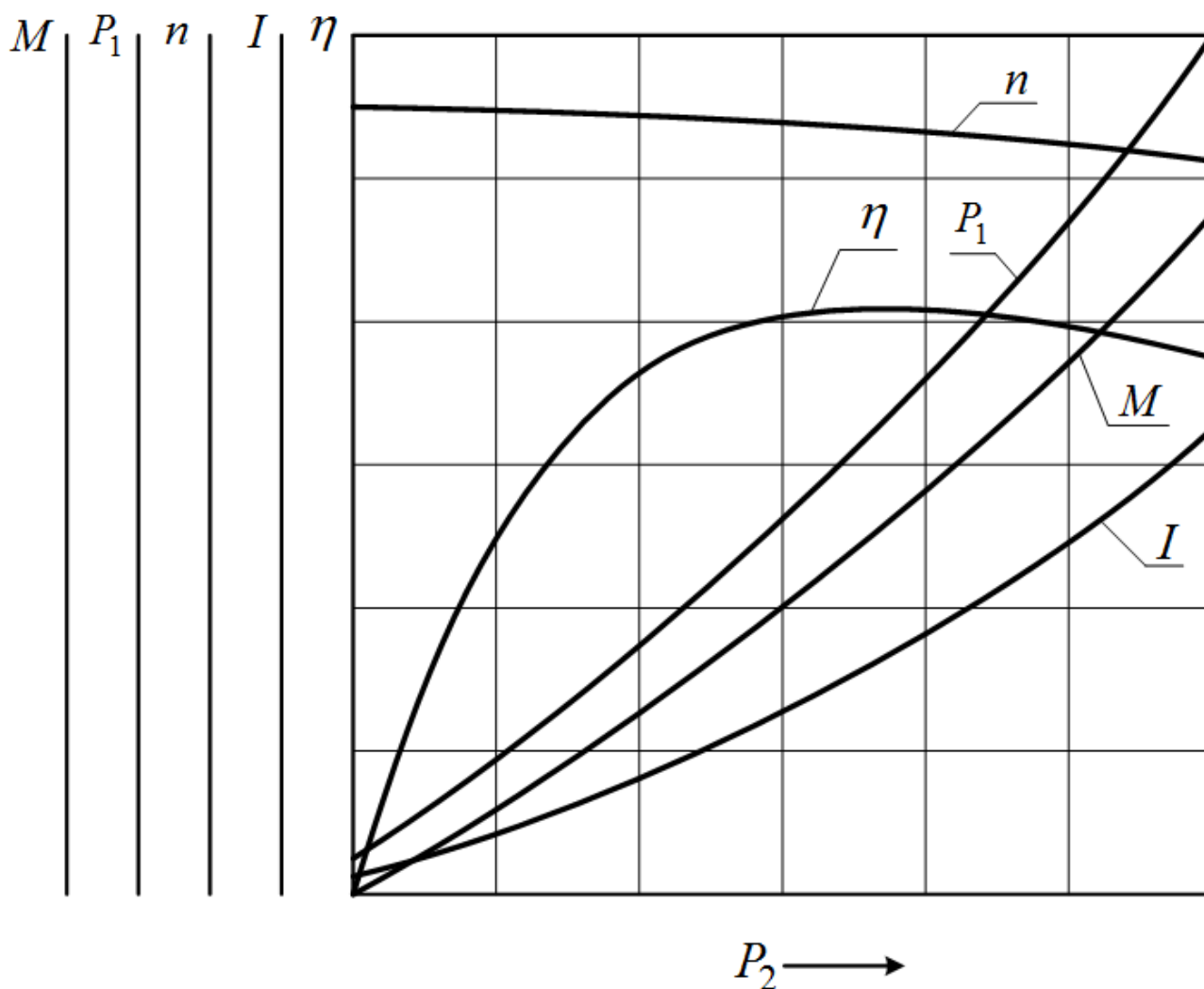


Рисунок 7.2 – Рабочие характеристики ИДПТ

По номинальному току двигателя  $I_n$ , взятого из паспортных данных, по рабочим характеристикам определяют номинальные данные двигателя:  $P_{2n}$ ,  $n_n$ ,  $\eta_n$  и сравнивают их значения с паспортными данными двигателя.

#### 7.2.4 Снять и построить регулировочные характеристики ИДПТ $n = f(I_a)$

при :  $U = U_n = const$ .

а) при  $I_a = 0,25 \cdot I_n$ ;

б) при  $I_a = 0,5 \cdot I_n$ ;

в) при  $I_a = I_n$ .

Для снятия регулировочных характеристик используют ту же испытательную установку (рисунок 7.1), что и в предыдущем опыте. Изменение тока якоря двигателя осуществляют за счет изменения нагрузки на валу. Результаты измерений заносят в таблицу 7.2.

Таблица 7.2 – Регулировочная характеристика

№ опыта	$I_a = 0,25 \cdot I_n$		$I_a = 0,5 \cdot I_n$		$I_a = I_n$	
	$I_e$	$n$	$I_e$	$n$	$I_e$	$n$
	<i>mA</i>	<i>об/мин</i>	<i>mA</i>	<i>об/мин</i>	<i>mA</i>	<i>об/мин</i>

### 7.2.5 Снять и построить зависимости

$$I_e, P_2, I_a = f(M) \text{ при } U = U_n \text{ и } n = n_n$$

Опытное определение этих характеристик начинают с установки нагрузки двигателя, при которой  $I_a = 1,2 \cdot I_n$ . Затем, изменяя сопротивление нагрузки в цепи генератора  $R_n$ , уменьшают ток двигателя до минимального его значения и снимают 5-7 опытных точек характеристики, поддерживая неизменными входное напряжение и частоту вращения. Результаты эксперимента заносят в таблицу 7.3.

Таблица 7.3 – Регулировочная характеристика

№ опыта	Данные измерений				Результаты вычислений			
	$I_e$	$I_a$	$I_\Gamma$	$U_\Gamma$	$P_{2\Gamma}$	$\eta_\Gamma$	$P_2$	$M$
	<i>mA</i>	<i>mA</i>	<i>mA</i>	<i>B</i>	<i>Bm</i>	<i>%</i>	<i>Bm</i>	<i>H·m</i>

По данным таблиц 7.2 и 7.3 строят регулировочные характеристики и зависимости  $I_e, P_2, I_a = f(M)$ . Вид этих характеристик приведен на рисунках 7.3 – 7.4.

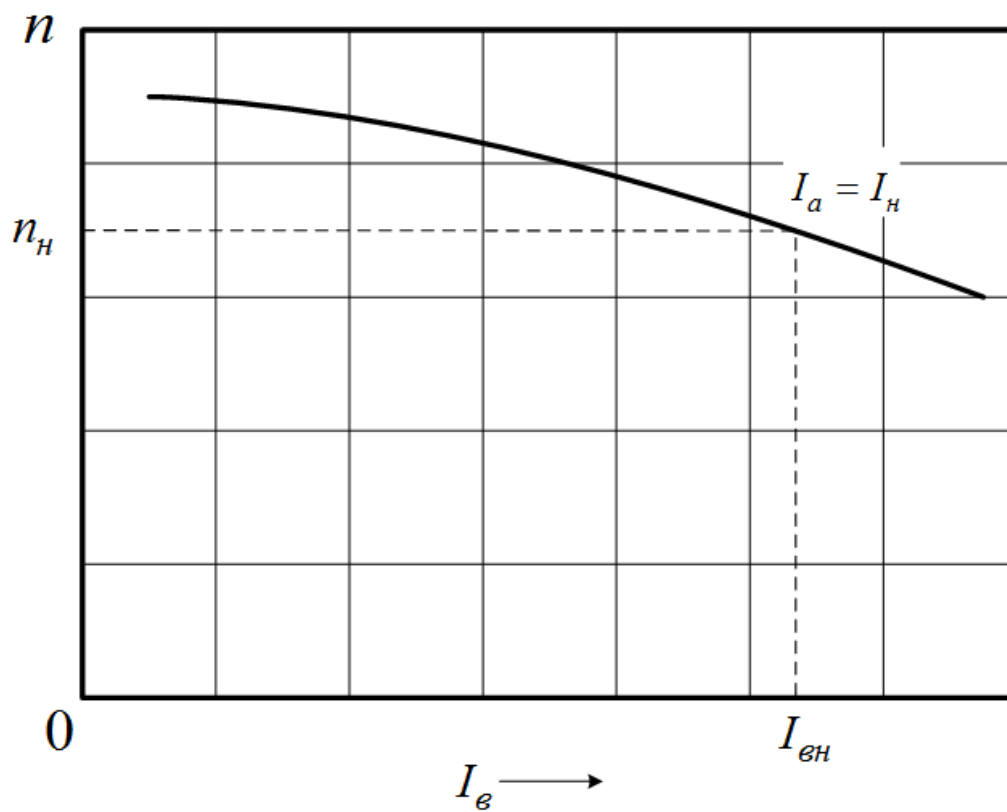


Рисунок 7.3 – Регулировочная характеристика

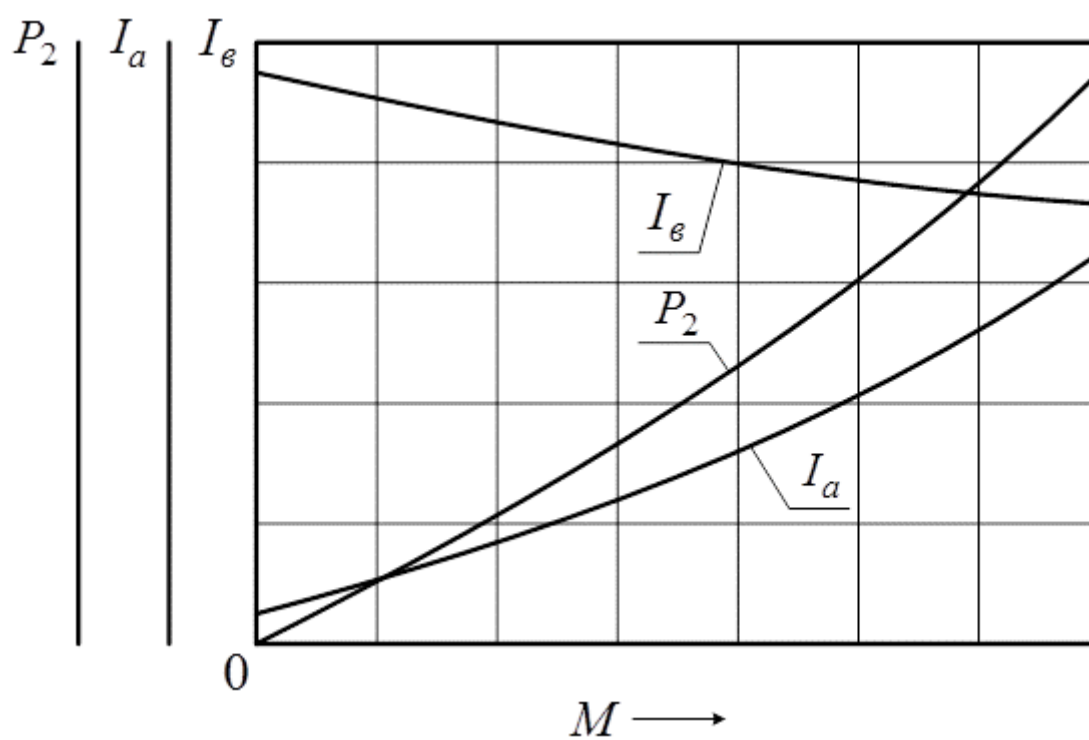


Рисунок 7.4 – Регулировочные характеристики

7.2.6 Определить размагничивающее действие поля якоря при номинальном токе двигателя

Для этого по данным таблицы 7.1 строят зависимость  $M = f(I)$  при  $U = U_n$  и  $I_g = I_{gn}$  и строят спрямленную характеристику  $M = f(I)$ , совпадающую с начальным прямолинейным участком первой характеристики (рисунок 7.5). Отношение моментов при номинальном токе двигателя оценивает изменение магнитного потока двигателя за счет размагничивающего действия поперечной составляющей поля якоря при номинальном режиме работы двигателя.

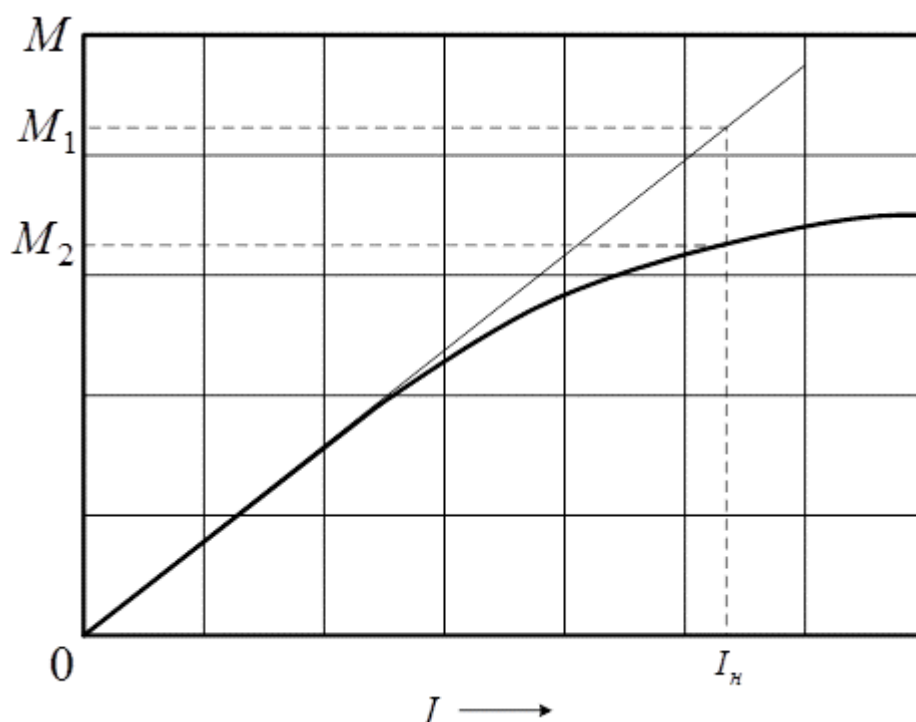


Рисунок 7.5 – Зависимость  $M = f(I)$

### 7.2.7 Расчетные формулы

Ток двигателя,  $mA$ :

$$I = I_a + I_g. \quad (7.1)$$

Угловая скорость вращения,  $\frac{рад}{мин}$ :

$$\omega = 2\pi \cdot n. \quad (7.2)$$

Полезная мощность генератора,  $Вт$  :

$$P_{2Г} = I_{Г} \cdot U_{Г}. \quad (7.3)$$

Полезная мощность генератора, *о.е.*:

$$P_{2Г}^* = P_{2Г} / P_{2нГ}. \quad (7.4)$$

Потребляемая мощность двигателя,  $Вт$  :

$$P_1 = I \cdot U. \quad (7.5)$$

Потребляемая мощность генератора,  $Вт$  :

$$P_{1Г} = P_{2Г} / \eta_{Г}, \quad (7.6)$$

где  $\eta_{Г}$  – КПД генератора (рисунок 7.6).

Полезная мощность двигателя,  $Вт$  :

$$P_2 = P_{1Г}. \quad (7.7)$$

Коэффициент полезного действия, *о.е.*:

$$\eta = P_2 / P_1. \quad (7.8)$$

Момент на валу двигателя,  $Н \cdot м$  :

$$M = P_2 / \omega = P_{2Г} / \omega \cdot \eta_{Г} = 60 \cdot U_{Г} \cdot I_{Г} / 2\pi \cdot n \cdot \eta_{Г} = 9,56 \cdot U_{Г} \cdot I_{Г} / n \cdot \eta_{Г}. \quad (7.9)$$

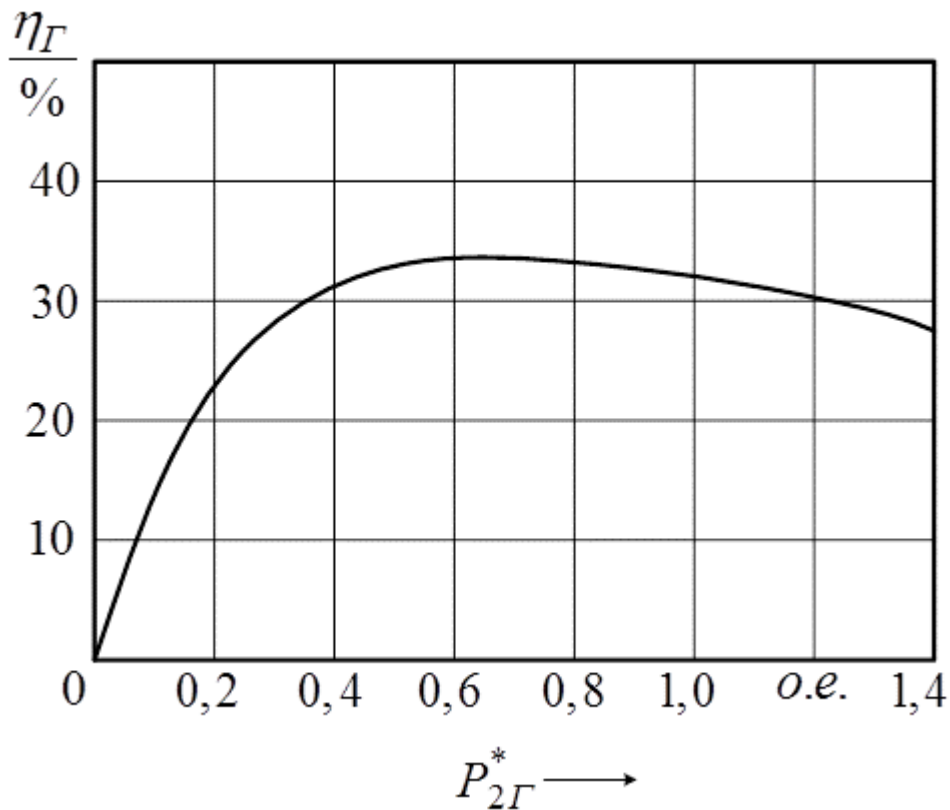


Рисунок 7.6 – Коэффициент полезного действия генератора

### 7.3 Контрольные вопросы

7.3.1 Конструкции ИДПТ. Назовите их достоинства и недостатки.

7.3.2 Якорное управление ИДПТ. Характеристики.

7.3.3 Полюсное управление ИДПТ. Характеристики.

7.3.4 Импульсное управление ИДПТ. Характеристики.

7.3.5 Объяснить вид рабочих характеристик.

7.3.6 Объяснить вид регулировочных характеристик при разных способах управления.

7.3.7 Объяснить вид механических характеристик при разных способах управления.

## Список использованных источников

1 Юферов, Ф. М. Электрические машины автоматических устройств [Текст]: учеб. для вузов / Ф. М. Юферов.- 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Высш. шк., 1988. - 479 с.

2 Хрущев, В. В. Электрические машины систем автоматики [Текст]: учеб. для вузов / В. В. Хрущев.- 2-е изд., перераб. и доп. - СПб. : Энергоатомиздат, 1985. - 365 с.

3 Кацман, М. М. Электрические машины автоматических систем [Текст]: учеб. для техникумов / М. М. Кацман, Ф. М. Юферов.- 2-е изд., перераб. и доп. - М. : Высш. шк., 1979. - 262 с.

4 Испытание электрических микромашин [Текст]: учеб. пособие / под ред. Н. В. Астахова.- 2-е изд., перераб. и доп. - М. : Высш. шк., 1984. - 272 с.

5 Потапов, Л. А. Измерение вращающих моментов и скоростей вращения микроэлектродвигателей [Текст] / Л. А. Потапов, Ф. М. Юферов. - М.: Энергия, 1974. - 128 с.

6 Падеев, А. С. Испытание тахогенераторов [Текст]: метод. указания к выполнению лаб. работ по курсу "Электрические машины систем автоматики" / А. С. Падеев, С. В. Митрофанов; М-во образования и науки Рос. Федерации, Федер. агентство по образованию, Гос. образоват. учреждение высш. проф. образования "Оренбург. гос. ун-т", Каф. электромеханики. - Оренбург: ОГУ, 2007. - 41 с.

7 Падеев А. С. Испытание тахогенераторов [Электронный ресурс] / Падеев А. С. - ГОУ ОГУ, 2006.

- URL: [http://artlib.osu.ru/web/books/metod\\_all/1277\\_20110809.pdf](http://artlib.osu.ru/web/books/metod_all/1277_20110809.pdf)

8 Гольдман, М. А. Методические указания к лабораторным работам по электрическим микромашинам [Текст] / М. А. Гольдман, В. М. Тулупов. - Оренбург : ОГУ, 1988. Ч. 2 : . - , 1988. - 35 с



## Приложение А (справочное)

### Технические данные тахогенераторов

Тахогенераторы постоянного тока типов 1,6 ТГП-2; 2,5 ТГП-4; ТГП-5; ТП20-6-0,5; ТП20-4-0,2 и ТП20-4-1 предназначены для использования в системах автоматического управления в качестве элементов (датчиков) обратной связи.

Таблица А1 – Основные технические данные и характеристики

Параметр	Тип тахогенератора постоянного тока					
	1,6 ТГП-2	2,5 ТГП-4	ТГП-5	ТП20-6- 0,5	ТП20-4- 0,2	ТП20-4- 1
Возбуждение	От постоянного магнита					
Номинальная крутизна изменения выходного напряжения, $mB / мин^{-1}$	2,5	4,0	4,0	6,0	4,0	4,0
Масса, кг, не более	0,025	0,09	0,09	0,05	0,05 0,065	0,05 0,065
Номинальная частота вращения, $мин^{-1}$	3000	3000	6000	3000	6000	3000
Класс точности	0,5	1,0	0,2	0,5	0,2	1,0
Температурный коэффициент выходного напряжения, % на 1 °С, не более	±0,04	±0,04	±0,04	±0,04	±0,04	±0,04
Пиковое значение пульсации выходного напряжения, %, не более	7,0	7,0	-	5,0	5,0	5,0
Режим работы	Продолжительный					
Масса, кг, не более	0,025	0,09	0,09	0,05	0,05 - 0,065	0,05 - 0,065

На рисунке А1 показан внешний вид тахогенератора ТП20-4-0,2.

Тахогенераторы ТМГ-30П и ТМГ-30 предназначены для работы в качестве датчиков в системах автоматического регулирования частоты вращения приводов различных стационарных установок. Они могут быть использованы также в качестве измерителей скорости вращения. Тахогенераторы ТМГ-30 и ТМГ-30П предназначены для работы в закрытых помещениях.

Таблица А2 – Технические данные тахогенераторов ТМГ-30, ТМГ-30П

Технические данные	Ед.изм.	ТМГ-30 У3	ТМГ-30 Т3	ТМГ-30П У3	ТМГ-30П Т3
Номинальная мощность	<i>Вт</i>	30	30	20	30
Крутизна выходного напряжения	<i>мВ/об / мин</i>	115+15%	57,5+15%	57,5+15%	30±15%
Номинальное сопротивление нагрузки	<i>кОм</i>	7,23+2%	1,76+2%	2,64+2%	4+2%
Номинальная частота вращения	<i>об/мин</i>	4000	4000	4000	4000
Напряжение возбуждения	<i>В</i>	110	110	Возбуждение от постоянных магнитов	
Номинальный ток возбуждения (в холодном состоянии)	<i>mA</i>	130+8	130+8	-	-
Нелинейность выходного напряжения	%	+1	+1	+1	+1
Асимметрия выходного напряжения	%	+2	+2	+2	+2
Пульсация выходного напряжения (при частоте вращения от 4000 до 50 об / мин)	%	5	5	5	5
Масса	<i>кг</i>	3,3	3,3	3,2	3,2

На рисунке А2 показан внешний вид тахогенератора ТМГ-30.



Рисунок А1 – Тахогенератор ТП20-4-0,2



Рисунок А2 – Тахогенератор ТМГ-30 У3

Тахогенератор ТГС-12Э-У1 представляет собой синхронный многополюсный генератор с возбуждением от постоянного магнита и предназначен для работы в качестве дистанционного датчика скорости на магистральных электровозах.

Номинальные данные:

1. Число и сопряжение фаз – 3.
2. Число полюсов – 12.
3. Номинальная частота вращения, *об / мин* – 1500.
4. Напряжение при номинальной частоте вращения, *В* – 60.
5. Крутизна выходного напряжения на холостом ходу,  $\frac{mB}{об / мин}$  – 40( $\pm 0,6$ ).
6. Нелинейность выходного напряжения в диапазоне частот вращения от 50 до 750 *об / мин*, % не более – 2,5.
7. Ток нагрузки при номинальной частоте вращения, *mA* не более – 30.
8. Масса, *кг*, не более – 3,5.
9. Изменения выходного напряжения тахогенератора не должно быть более – 0,015 % при изменении температуры окружающей среды на 1 °C.
10. Отклонение крутизны выходного напряжения при номинальной частоте вращения, не более – 1,5 %.

На рисунке А3 показан внешний вид тахогенератора ТГС-12Э-У1.



Рисунок А2 – Тахогенератор ТГС-12Э-У1