

Федеральное агентство по образованию Российской Федерации

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО**

М.В. Сочава, Н.А. Хомицевич

**Испытание электрических машин
постоянного тока**

Учебное пособие

Санкт-Петербург
2018

УДК 621.313

Сочава М.В., Хомицевич Н.А.

Испытание электрических машин постоянного тока: Учебное пособие.
СПб.:2018 г. 106 с.

Учебное пособие предназначено для студентов Института Энергетики и Транспортных систем, изучающих курс «Электрические машины» по программе подготовки бакалавров по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и Электротехника».

В пособии кратко описаны методы испытания и способы опытного определения характеристик электрических машин постоянного тока. Приведены мнемонические и принципиальные электрические схемы учебных лабораторных установок для испытания электрических машин. Даны подробные рекомендации по обработке результатов испытаний и оформлению итогового отчета по лабораторной работе.

Глава I

Общие вопросы испытания электрических машин постоянного тока

1.1. Введение

Учебные испытания электрических машин представляют собой важный этап в процессе обучения студентов и цель их весьма обширна. Во время занятий в лаборатории студенты знакомятся с методами испытаний электрических машин, обучаются самостоятельно организовывать и подготавливать испытания, получают практические навыки по способам регулирования машин и качественному проведению самих испытаний, приобретают умение оформлять и анализировать результаты экспериментов в отношении свойств и характеристик испытуемых машин. При этом практически подтверждаются и закрепляются соответствующие разделы курса электрических машин.

Каждая учебная лабораторная работа испытаний электрических машин включает в себя несколько взаимосвязанных этапов: домашняя подготовка к лабораторной работе (изучение соответствующей литературы, определение диапазонов регулирования машины и предельных значений измеряемых величин, ознакомление с техникой эксперимента); организация и подготовка испытания на рабочем месте в лаборатории (подбор оборудования, аппаратуры и приборов, сборка и апробирование схемы); проведение испытания машины и контрольная обработка результатов испытания, оформление отчета и оценка полученных результатов.

Настоящее учебное пособие ставит своей целью максимально облегчить студенту работу по испытанию электрических машин постоянного тока (МПТ) на всех ее этапах. При этом особое внимание уделяется вопросам подготовки и проведения испытаний, а также обработке и оценке результатов.

В настоящей работе использовались материалы учебного пособия к лабораторным работам Иванова Ю.Я. и Нагаенко Г.П. «Испытание

электрических машин постоянного тока» и методических указаний к лабораторным работам Васильева Г.А., Иванова Ю.Я. и Нагаенко Г.П. «Испытание электрических машин постоянного тока».

1.2. Номинальные данные машины

Номинальным режимом работы машины называется режим, для работы в котором машина предназначена заводом-изготовителем. Основные данные этого режима, характеризующие некоторые эксплуатационные характеристики МПТ, указываются на ее заводском щитке и называются номинальными данными. Завод-изготовитель производит МПТ в соответствии с их назначением (генератор, двигатель) хотя в силу обратимости МПТ они могут работать как в генераторном, так и в двигательном режимах. Обычно на заводском щитке указываются номинальные значения мощности P_n , напряжения U_n , тока I_n , частоты вращения n_n и КПД η_n МПТ. Термин «номинальный» применяется также и к величинам не указанным на заводском щитке, но обеспечивающим номинальный режим работы (например, номинальный ток возбуждения $i_{вн}$, номинальный момент вращения M_n и т.п.).

1.3. Обозначения выводных зажимов и схемы соединения обмоток

Концы обмоток МПТ, используемых в лабораторных установках, выводятся на лабораторные стенды и имеют обозначения согласно ГОСТу 183-74.

Обмотки добавочных полюсов обычно подразделяются внутри МПТ на две секции и между ними включается обмотка якоря. Начало и конец этой общей якорной цепи имеют обозначения D_1 , D_2 . Начало и конец параллельной (шунтовой) обмотки возбуждения обозначаются $Ш_1$, $Ш_2$. Эта обмотка (особенно в крупных МПТ) может использоваться в качестве обмотки независимого возбуждения при питании ее от постороннего источника постоянного тока с напряжением примерно

равным U_n МПТ. Начало и конец последовательной (серийной) обмотки возбуждения обозначаются C_1, C_2 .

Обычно на корпусе МПТ стрелкой указывается направление вращения якоря, для которого МПТ выполнена заводом-изготовителем. Если такая стрелка отсутствует, то МПТ должна иметь «правое» направление вращения, т.е. по часовой стрелке, если смотреть на МПТ со стороны присоединения ее к рабочему механизму или первичному двигателю. Противоположное направление вращения называется «левым». На рис. 1.1 показаны схемы внешних соединений обмоток ДПТ при различных способах возбуждения и «правом» и «левом» направлении вращения.

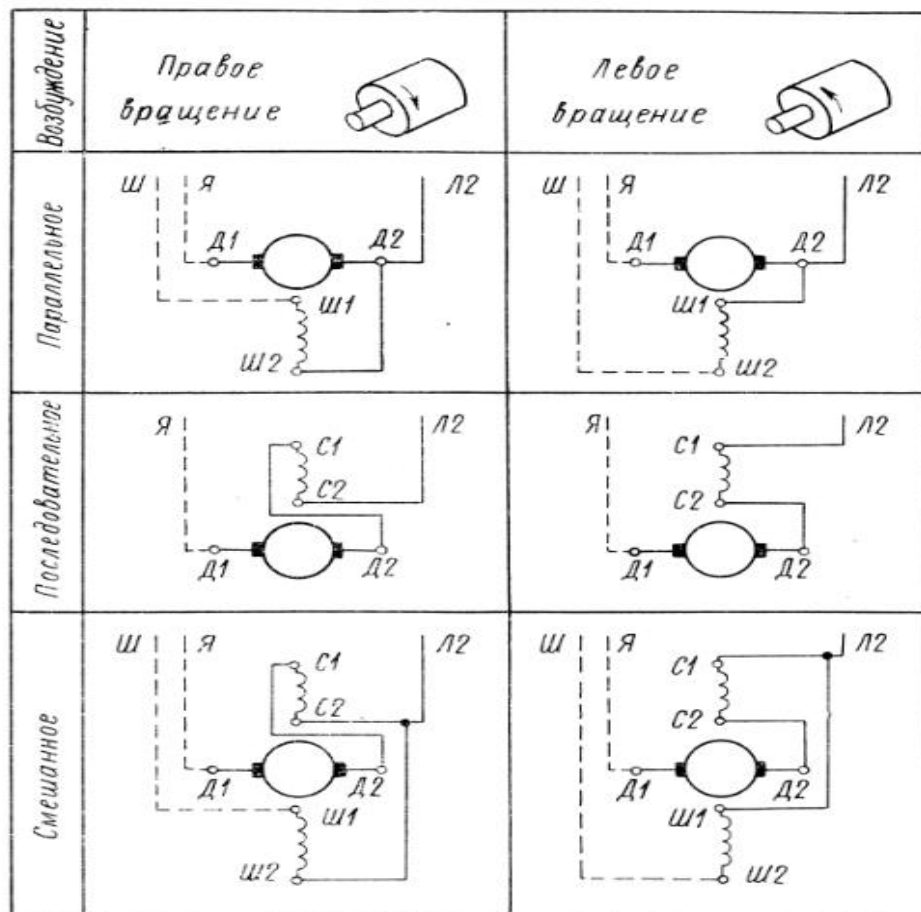


Рис.1.1. Схемы внешних соединений двигателя при различных способах возбуждения и направлениях вращения якоря

Пунктирными линиями на рис. 1.1 в схемах показаны цепи, в которые по необходимости следует подключить измерительную и регулировочную аппаратуру. На концах электрических цепей в схемах двигателя обозначена маркировка зажимов пускового реостата ($Я$, $Ш$, $Л_2$), к которым должны присоединяться эти цепи.

1.4. Измерение сопротивления обмоток

Наиболее распространенным способом измерения сопротивления обмоток МПТ является способ амперметра и вольтметра. При таком способе через обмотку пропускают постоянный ток и измеряют на ней падение напряжения.

На рис. 1.2 представлена схема для измерения сопротивления обмоток якоря и добавочных полюсов.

Так как сопротивления этих обмоток малы (для МПТ малой и средней мощности, используемых в учебной лаборатории электрических машин, они составляют менее 0,5 Ом), то питание следует производить от минимально возможного в лабораторных условиях напряжения. Сопротивление регулировочного реостата подбирается так, чтобы им можно было бы измерять ток в цепи в диапазоне (10 – 20)% от

номинального значения тока обмоток. По максимально возможному току в цепи выбирается амперметр. Вольтметр должен иметь малые пределы измерения, примерно (1,5 – 3,0) В. Для обеспечения необходимой точности измерений желательно использовать приборы класса не ниже 0,5. Вольтметр во время измерений подключается к обмоткам с помощью специальных изолированных щупов. Перед включением схемы сопротивление реостата должно быть установлено на максимальную величину.

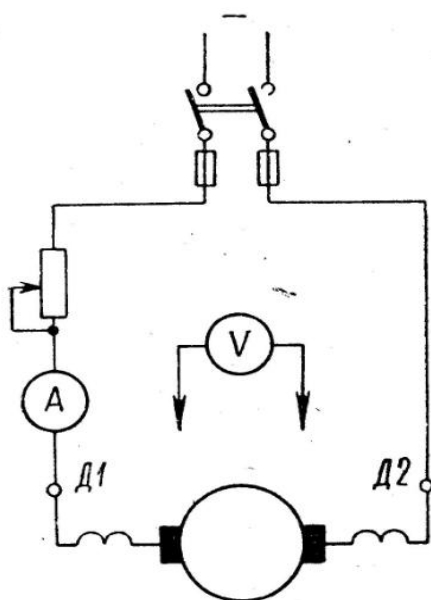


Рис. 2. Схема для измерения сопротивлений обмоток якоря и добавочных полюсов

Для измерения сопротивления обмотки якоря после включения схемы и установки

регулируемым реостатом выбранного значения тока наконечники щупов устанавливаются на коллекторные пластины, находящиеся под серединой щеток разной полярности.

Перед измерением сопротивления добавочных полюсов необходимо определить между какими выводными концами якорной цепи и щетками включены соответствующие секции обмотки добавочных полюсов. Для этого, при наличии тока в цепи якоря и добавочных полюсов, один щуп вольтметра подсоединяется к какому-либо выводу якорной цепи (например D_1), а другой – к токоподводящему проводу одной из щеток, и измеряется падение напряжения на этом участке цепи. Затем при том же токе измеряется падение напряжения между той же щеткой и другим выводным зажимом якорной цепи (D_2). Положение щупов, при котором было измерено меньшее падение напряжения, показывает вывод якорной цепи и щетку, между которыми включена одна из секций добавочных полюсов. При таком положении щупов производится измерение сопротивлений этой секции. Затем между щеткой другой полярности и другим выводом якорной цепи измеряют сопротивление второй секции добавочных полюсов.

Измерение сопротивлений последовательной и параллельной обмоток возбуждения выполняется по схеме, аналогичной рис. 1.2. Обмотка параллельного возбуждения обладает значительным сопротивлением (100 – 200) Ом. Поэтому при измерении ее сопротивления следует поменять измерительные приборы и регулировочный реостат. Их выбор производится исходя из номинального тока обмотки параллельного возбуждения.

Измерять сопротивления согласно ГОСТу 183-74 необходимо в холодном состоянии МПТ при температуре окружающей среды θ_0 , измеренной вблизи МПТ.

Сопротивление обмоток МПТ при учебных испытаниях можно определять по упрощенной формуле $r_0 = \frac{U}{I}$ без учета поправки на потребление тока вольтметром, собственное сопротивление которого, как правило, очень велико (несколько кОм).

Сопротивление обмоток обычно измеряется не менее чем при трех токах, а затем определяется его среднее значение r_{cp} . Это сопротивление каждой из обмоток необходимо привести к 75°C , так как ГОСТ 183-74 для обмоток с изоляцией классов А и В рекомендует пользоваться именно такими значениями сопротивлений при расчете характеристик, потерь и КПД. Для обмоток, выполненных из медного провода, приведение сопротивлений к 75°C производится по формуле:

$$r = r_{cp} \frac{235 + 75}{235 + \theta_0} = r_{cp} \frac{310}{235 + \theta_0} \quad (1.1)$$

При приведении обмотки добавочных полюсов под r_{cp} следует понимать сумму средних значений сопротивлений обеих секций.

Результаты опыта оформляются в виде табл. 1.1.

Таблица 1.1.

Измерение сопротивлений обмоток машины

Наименование обмотки	Измеренные величины		Расчетные величины		
	U	I	r_0	r_{cp}	r
	В	А	Ом		

1.5. Основные соотношения в машинах постоянного тока

Приведем некоторые соотношения, уравнения и зависимости, которыми в дальнейшем будем пользоваться при анализе свойств и характеристик МПТ.

Уравнение напряжения МПТ в зависимости от режима работы имеет вид:

для двигателя

$$U = E_a + I_a(R_a + R_d) + \Delta U_{щ}; \quad (1.2)$$

для генератора

$$U = E_a - I_a R_a - \Delta U_{щ}, \quad (1.3)$$

Где U – напряжение, подводимое к схеме испытания ДПТ или отдаваемое ГПТ; E_a – ЭДС в обмотке якоря; I_a – ток якоря; R_a – сопротивление всех обмоток, включенных последовательно в цепь якоря, $\Delta U_{щ} = 2В$ – падение напряжения в щеточном контакте. Так как $\Delta U_{щ}$ мало, то в уравнениях (1.2) и (1.3) им часто пренебрегают или же включают в R_a как некоторое эквивалентное сопротивление $r_{щ} = \frac{\Delta U_{щ}}{I_{ан}}$, где $I_{ан}$ – номинальный ток якоря МПТ.

ЭДС, индуктируемая в обмотке якоря результирующим потоком Φ_δ (поток в зазоре δ между якорем и индуктором), равна

$$E_a = C_e \Phi_\delta n \quad (1.4)$$

где n – частота вращения якоря, а C_e – некоторая постоянная для данной МПТ величина, зависящая от исполнения обмотки якоря.

Результирующий поток в МПТ создается результирующей МДС F_δ . Связь между потоком и МДС

$$\Phi_\delta = f(F_\delta) \quad (1.5)$$

представляет собой магнитную характеристику МПТ. Если магнитная система МПТ насыщена, то эта характеристика не линейна. Уровень насыщения определяется магнитными свойствами сталей, образующих магнитную систему МПТ.

Результирующая МДС F_{δ} обуславливается действием МДС обмоток параллельного F_n и последовательного F_c возбуждения, МДС продольной реакции якоря F_{ad} и размагничивающим действием поперечной реакции якоря ΔF_{aq} . При согласном действии МДС обмоток параллельного и последовательного возбуждения можно записать:

$$F_{\delta} = F_n + F_c \pm F_{ad} - \Delta F_{aq} \quad (1.6)$$

Знак МДС продольной реакции якоря определяется направлением сдвига щеток с линии геометрической нейтрали и режимом работы МПТ (генератор, двигатель). Так как в подавляющем большинстве случаев щетки в МПТ устанавливаются на геометрической нейтрали, то $F_{ad} = 0$. Размагничивающее действие поперечной реакции якоря имеет место в МПТ с насыщенной магнитной системой, и оно тем больше, чем сильнее насыщение. В первом приближении ΔF_{aq} можно считать пропорциональной току якоря. Приведенные выражения вполне достаточны для анализа основных характеристик генератора, так как его частота вращения определяется частотой вращения приводного двигателя и при рассмотрении характеристик, как правило, принимается постоянной.

Для анализа работы ДПТ необходимо учитывать ряд дополнительных соотношений, в частности, уравнение моментов.

$$M - M_{CT} = 2\pi J \frac{dn}{dt}, \quad (1.7)$$

где M – электромагнитный момент двигателя; M_{CT} – статический момент на валу двигателя; J – момент инерции всех вращающихся частей

двигателя и приводимого им во вращение механизма. При работе ДПТ в установившемся режиме ($n = \text{const}$) уравнение 1.7 принимает вид:

$$M = M_{CT}. \quad (1.8)$$

Электромагнитный момент M является движущим фактором и направлением действия этого момента определяется направление вращения двигателя. Этот момент обусловлен взаимодействием тока якоря с результирующим магнитным потоком и равен

$$M = C_M \Phi_\delta I_a, \quad (1.9)$$

где $C_M = \frac{1}{2\pi} C_e$.

Статический момент оказывает тормозящее действие на вал двигателя. Он складывается из полезного момента нагрузки M_2 и момента холостого хода M_0 :

$$M_{CT} = M_2 + M_0. \quad (1.10)$$

Полезный момент обусловлен механизмом, присоединенным к валу двигателя. В учебно-лабораторных испытаниях таким механизмом является электромагнитный тормоз. Создаваемый им момент определяется величиной тока в обмотке тормоза. Этот момент позволяет рассчитать полезную мощность, отдаваемую двигателем,

$$P_2 = 2\pi n M_2. \quad (1.11)$$

Момент M_0 обусловлен механическими, магнитными и добавочными потерями мощности ДПТ в режиме холостого хода. Этот момент относительно мал ($3 - 8\% M_n$) и им часто можно пренебречь.

Приведем еще несколько дополнительных выражений, характеризующих работу ДПТ. Из (1.2) и (1.4), введя в рассмотрение добавочное сопротивление r_d , включаемое последовательно в цепь якоря, пренебрегая падением напряжения в щеточном контакте, можно получить

$$n = \frac{U - I_a(R_a + R_d)}{C_e \Phi_\delta}, \quad (1.12)$$

$$I_a = \frac{U - C_e \Phi_\delta n}{R_a + R_d}. \quad (1.13)$$

Уравнение (1.12) в предположении $R_d = 0$ называется скоростной характеристикой ДПТ.

Из (1.8) и (1.9) следует, что в установившемся режиме работы ДПТ

$$I_a = \frac{M_{CT}}{C_M \Phi_\delta}, \quad (1.14)$$

т.е. ток якоря определяется величиной M_{CT} на валу ДПТ.

Все приведенные выражения записаны в системе СИ. При этом отдельные величины измеряются в следующих величинах: ЭДС, напряжение, ток и МДС в амперах; поток в веберах; частота вращения в оборотах в секунду; момент в ньютонметрах; мощность в ваттах.

На практике частота вращения часто измеряется в оборотах в минуту, а момент в килограммометрах ($1 \text{ кг}\cdot\text{м} = 9,81 \text{ Н}\cdot\text{м}$). В этом случае выражение (1.11) принимает вид:

$$P_2 = 1,028 M_2 n. \quad (1.15)$$

Глава 2

Двигатель параллельного возбуждения

Сразу оговоримся, что двигатель параллельного возбуждения при современных схемах питания (см. ниже) скорее является двигателем независимого возбуждения со слабой последовательной обмоткой, МДС которой не превышает 10% МДС основной обмотки возбуждения (параллельной). Эта обмотка называется стабилизирующей и о ее назначении будет сказано ниже. В промышленности, особенно в металлургии, двигатели параллельного возбуждения практически не используются в силу специфики своих характеристик, о которых также будет сказано ниже. В современных мощных машинах постоянного тока применяется исключительно независимое возбуждение (за исключением машин последовательного возбуждения). Только в тяговых двигателях, в которых необходимо создавать большие пусковые моменты, используются помимо параллельной мощные последовательные обмотки возбуждения, приближая по своим характеристикам двигатели смешанного возбуждения к двигателям последовательного возбуждения. Такого типа двигатели применяются на всех видах электрического транспорта.

В данной главе мы остановимся на рассмотрении только двигателей параллельного возбуждения и особенностях его характеристик.

2.1. Основные зависимости и типы характеристик.

Основными характеристиками двигателя параллельного возбуждения (в дальнейшем ДПрВ) являются следующие:

1. *Рабочие характеристики* – это зависимости частоты вращения n , тока якоря I_a , полезного момента на валу M_2 , подводимой мощности P_1 и КПД η от полезной (отдаваемой приводному механизму) механической мощности P_2 . При этом напряжение, подведенное от сети к двигателю U и ток возбуждения в параллельной обмотке i_g должны быть

равны номинальным значениям, а добавочное сопротивление в цепи якоря R_D должно быть равно нулю. Заметим, что номинальное значение тока возбуждения i_{en} может быть определено только опытным путем. Для этого нагружают ДПрВ при $U = U_n$ и $n = n_f$ до тока якоря $I_a = I_{an}$. Ток i_e , который при этом получится, принимают за i_{en} . То же самое относится и к моменту M_2 на валу двигателя. При всех номинальных электрических величинах $M_2 = M_{2n}$. Использую краткую форму записи, рабочие характеристики можно представить в виде: $M_2, I_a, n, P_1, \eta = f(P_2)$ при $U = U_n, i_e = i_{en}$.

2. *Механические характеристики* – это зависимости $n = f(M_2)$ при $U = \text{const}, i_e = \text{const}, R_D = \text{const}$. При этом целесообразно рассмотреть еще зависимость $\eta = f(M_2)$, поскольку увеличение R_D приводит к возрастанию потерь в цепи якоря ДПрВ и тем самым к снижению КПД. Так как напряжение, ток возбуждения и добавочное сопротивление могут принимать любые значения, то с целью наиболее полного исследования свойств ДПрВ обычно рассматривают три семейства механических характеристик. В каждом семействе полагают, что две какие-либо величины принимают значения, которые они имеют при номинальном режиме рабочей характеристики, а третья величина может принимать различные значения, но неизменные для каждой характеристики этого семейства. Поэтому в дальнейшем будем рассматривать механические характеристики n и $\eta = f(M_2)$ при: а) $U = U_n, i_e = i_{en}$ и различных значениях R_D ; б) $i_e = i_{en}, R_D = 0$ и различных значениях U ; в) $U = U_n, R_D = 0$ и различных значениях i_e . Отметим, что механическая характеристика, полностью соответствующая рабочей характеристике, называется естественной. Все остальные – искусственные.

3. *Регулировочная характеристика* – представляет собой зависимость $i_e = f(M_2)$ при $U = U_n, n = n_n, R_D = 0$. При этом также целесообразно рассмотреть зависимости $I_a, \eta = f(M_2)$.

4. *Нагрузочные характеристики* представляют собой зависимости, которые иллюстрируют свойства двигателя в отношении регулирования его частоты вращения при неизменной нагрузке. Обычно рассматривается два вида зависимостей: а) $n = f(U_a)$ при $M_2 = \text{const}$ и $i_g = \text{const}$; б) $n = f(i_g)$ при $M_2 = \text{const}$ и $U_a = U_n$, причем под U_a понимается напряжение, измеренное непосредственно на зажимах якорной цепи ДПрВ. Здесь также целесообразно проанализировать зависимости $I_a, \eta = f(U_a)$ и $I_a, \eta = f(i_g)$.

2.2. Компоновка испытательного стенда и схема испытаний двигателя параллельного возбуждения.

Компоновка испытательного стенда ДПрВ приведена на рис.2.1.

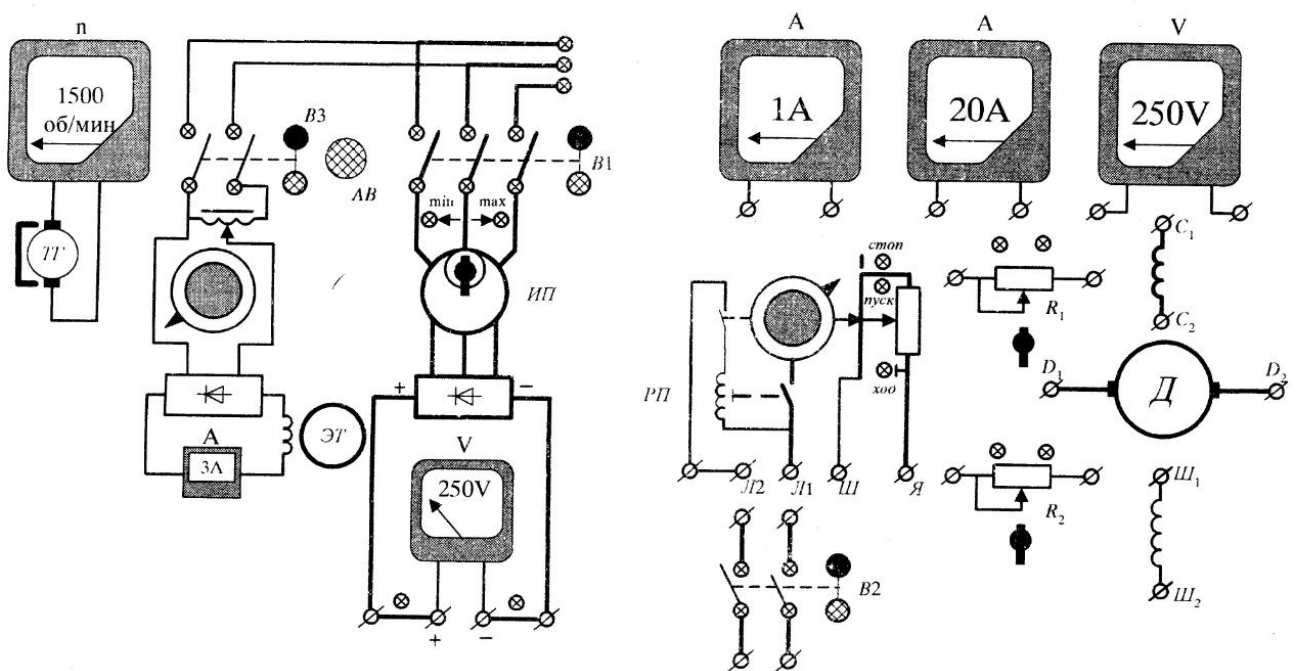


Рис.2.1. Стенд двигателя параллельного возбуждения

Схема стенда включает в себя регулируемый источник питания (*ИП*), обмотки испытуемой машины ($D_1 - D_2$, $C_1 - C_2$, $Ш_1 - Ш_2$), пусковой реостат (*РП*), регулировочные взаимозаменяемые сопротивления (R_1 и R_2), измерительные приборы и выключатели $B1$, $B2$, $B3$. Одно из сопротивлений может, например, использоваться в цепи возбуждения двигателя (в качестве R_B), другое – в цепи якоря (как R_D). Иногда вместо расположенного на стенде R_B используется настольный реостат. Схема питания электромагнитного тормоза (*ЭТ*) собрана полностью.

Отметим некоторые особенности подключения элементов стенда. После подачи трехфазного напряжения из сети загораются три сигнальные лампы и напряжение подается к выключателям $B1$ и $B3$ *ИП* и *ЭТ* соответственно. Включение $B1$ возможно только в положении «min» (горит левая сигнальная лампочка). После включения $B1$, регулируя *ИП*, можно получить требуемое выпрямленное напряжение на выходе, контролируемое вольтметром. После включения $B3$, регулируя напряжение, можно изменять ток в цепи *ЭТ*, и тем самым регулировать величину нагрузочного момента M_2 .

При сборке схемы для обеспечения требуемого направления вращения машины необходимо выполнить требования:

- (+) источника питания соединить с зажимом *Л1* пускового реостата,
- зажим *Я* пускового реостата соединить с зажимом D_1 ,
- D_2 с C_1 ,
- Зажим *Ш* пускового реостата с $Ш_1$.

РП также снабжен системой сигнальных лампочек: «стоп», «пуск», «ход», которая позволяет контролировать процесс пуска.

Включение всех выключателей осуществляется черными кнопками, отключение – красными.

Схема испытаний ДПрВ приведена на рис. 2.2.

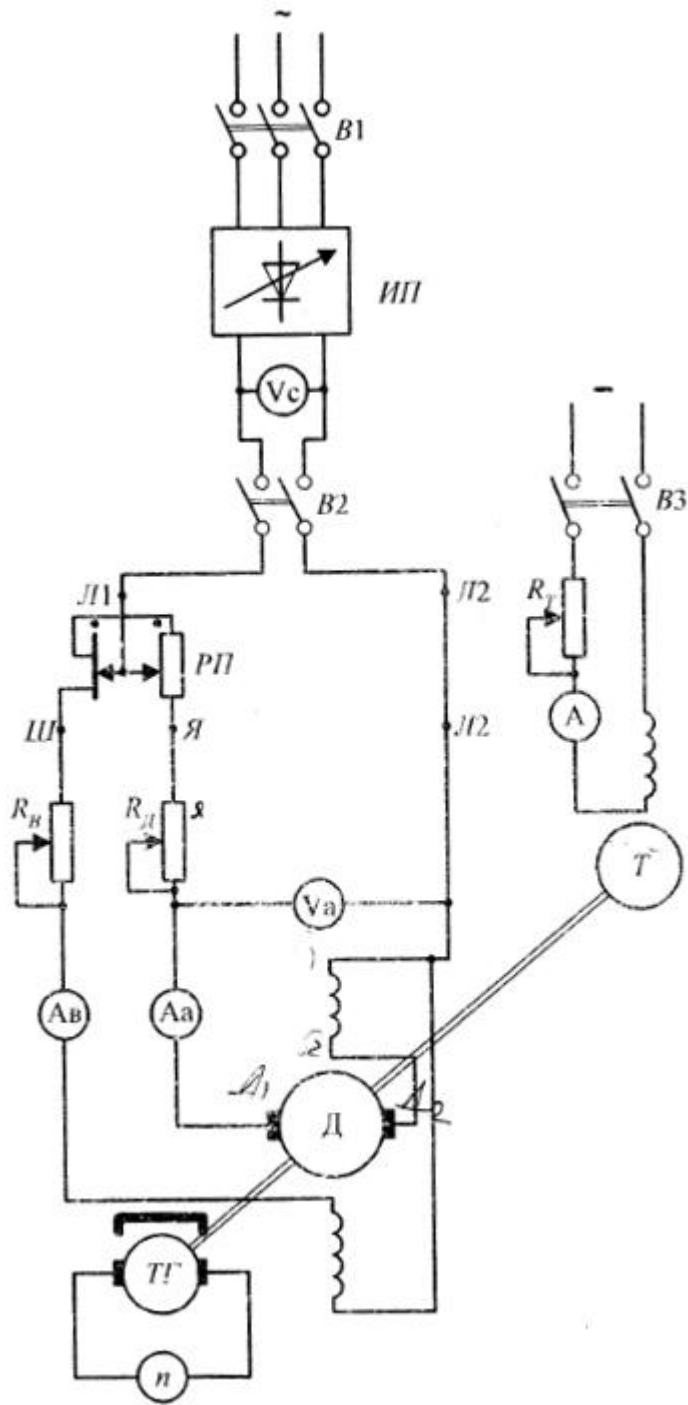


Рис.2.2. Схема испытания двигателя параллельного возбуждения

2.3. Пуск в ход двигателя параллельного возбуждения

При сборке схемы испытаний ДПрВ (см. рис. 2.2) необходимо проверить правильность включения стабилизирующей обмотки ($C_1 - C_2$). Как известно из теории электрических машин, ее назначение – компенсация поперечной размагничивающей реакции якоря ΔF_{aq} и падения напряжения в цепи якоря. Подключение этой обмотки, по которой протекает ток якоря I_a , должно быть всегда согласным с основной обмоткой возбуждения, т.е. чтобы магнитные потоки обмоток ($\Phi_1 - \Phi_2$) и ($C_1 - C_2$) совпадали по направлению. Подключение этих обмоток зависит как от режима работы МПТ, так и от направления вращения. На рис. 1.1 приведены схемы подключения обмоток возбуждения для разных типов МПТ и разных направлений вращения. Для МПТ с последовательной обмоткой возбуждения ($C_1 - C_2$) надо рассматривать режим работы (генератор – двигатель) и направление вращения, причем направление вращения всегда определяется со стороны вала МПТ. После окончательной сборки схемы испытаний ДПрВ осуществляется его пуск. Для этого включается выключатель VI и на $ИП$ подается переменное трехфазное напряжение. Регулируя напряжение $ИП$ добиваются, чтобы на вольтметре V_c установилось U_n ДПрВ. При этом пусковой реостат должен находиться в положении «стоп», о чем информирует соответствующая сигнальная лампочка. Затем $ПР$ переводится в положение «пуск» и путем вращения его рукоятки доводится до положения «ход», означаящем конец пуска.

Перед пуском ДПрВ необходимо установить ток возбуждения на его максимально возможное значение $i_e = i_{e_{max}}$. Напомним, что согласно теории МПТ, электромагнитный момент, развиваемый двигателем

$$M = C_M \Phi_\delta I_a, \quad (2.1)$$

где C_M – некоторая постоянная, Φ_δ – основной магнитный поток в зазоре, I_a – ток якоря.

Из (2.1) следует, что для получения максимально возможного пускового момента необходимо иметь максимальный поток Φ_δ , что и обеспечивается условием $i_\delta = i_{\delta \max}$.

Кроме того, пренебрегая падением напряжения в якорной цепи ДПрВ, можно написать

$$n \approx \frac{U_c}{C_e \Phi_\delta}, \quad (2.2)$$

где U_c – напряжение сети, C_e – некоторая постоянная.

Из (2.2) видно, что чем больше Φ_δ , тем меньше частота вращения двигателя n .

Таким образом, увеличивая i_δ до $i_{\delta \max}$, удастся добиться максимального пускового момента при относительно низкой частоте вращения разгона.

Пуск двигателя осуществляется при $R_d = 0$. Включение тормоза возможно только при крайнем левом положении ручки регулирования тормозного момента.

2.4. Рабочие характеристики

Как уже ранее отмечалось, рабочие характеристики ДПрВ это зависимости $n, I_a, M_2, P_1, \eta = f(P_2)$ при $U = U_n, i_\delta = i_{\delta n}, R_d = 0$. Если $R_d = 0$, то вольтметры V_c и V_a должны показывать одинаковые напряжения (рис. 2.2).

Перед началом эксперимента необходимо согласно формуле $P_2 = 1,028 M_2 \eta$, зная номинальную мощность на валу двигателя P_{2n} и номинальную частоту вращения n_i , определить номинальный момент M_n

Однако при этом не определяется номинальный ток возбуждения $i_{вн}$. Для того чтобы найти его значение следует при $U = U_n$ добиться чтобы ток $I_a = I_n$, а $n = n_n$. Тогда при этих условиях момент $M_2 = M_n$, а ток $i_g = i_{вн}$. Очевидно, что нагрузка двигателя до номинального режима осуществляется с помощью электромагнитного тормоза («Т» на рис.2.2), а регулирование частоты вращения n до n_n путем изменения тока i_g двигателя.

После установки номинального режима осуществляется снятие рабочей характеристики. По вольтметру V_c (рис.2.2) поддерживается $U_c = U_n$. По амперметру A_B контролируется условие $i_g = i_{вн}$. В номинальном режиме и во всех последующих измеряются ток I_a , момент M_2 , частота вращения n . Затем ДПрВ нагружают до момента $M_2 = 1,2M_n$, и после этого разгружают с интервалами приблизительно $0,2M_2$ до $M_2 = 0$, когда выключатель цепи тормоза B_3 (рис.2.2) должен быть отключен.

Расчетные величины определяются по формулам:

$$P_1 = U_n (I_a + i_g) \quad (2.3)$$

$$P_2 = 1,028M_2n \quad (2.4)$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\% \quad (2.5)$$

В выражениях (2.3 – 2.5) напряжение подставляется в Вольтах, токи в Амперах, мощности в Ваттах, момент в килограммометрах, частота вращения в об/мин.

Следует отметить, что механическая характеристика ДПрВ $n = f(M_2)$ жесткая, т.е. с возрастанием момента M_2 частота вращения n

изменяется незначительно. Поэтому при проведении эксперимента необходимо особенно тщательно измерять n .

По окончании эксперимента должны быть построены рабочие характеристики ДПрВ, приблизительный вид которых изображен на рис. 2.3.

Из полученных характеристик для полезной мощности $P_2 = P_{2н}$, указанной на щитке двигателя, определяют номинальные значения $M_{2н}$, I_n , $P_{1н}$, n_n , η_n .

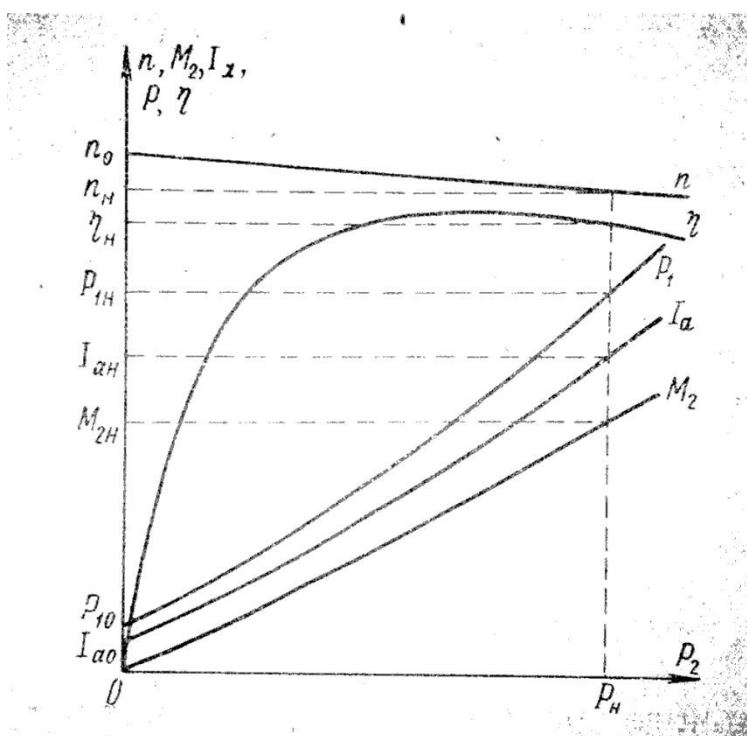


Рис.2.3. Рабочие характеристики двигателя

Следует обратить внимание на зависимость $\eta = f(P_2)$. Дело в том, что эта зависимость интенсивно нарастает с ростом мощности P_2 , достигает максимума, а затем снижается. Как известно из теории электрических машин, максимум КПД достигается при такой мощности P_2 , при которой постоянные потери мощности, не зависящие от нагрузки становятся равными переменным, определяемым квадратом тока якоря и его сопротивлением. К постоянным потерям можно отнести потери

магнитные, зависящие от потока, (поскольку вследствие действия стабилизирующей обмотки поток в зазоре остается практически постоянным) и механические, вследствие жесткости механической характеристики ДПрВ, т.е. практически постоянства частоты вращения. При некотором токе I_a электрические потери, равные $I_a^2 R_a$ сравниваются с постоянными и при соответствующей этому току мощности P_2 будет достигнут максимум КПД. Обычно как машины постоянного тока, так и переменного тока проектируются так, чтобы максимум КПД достигался при мощности примерно равной $0,75I_n$.

Вследствие приблизительного постоянства магнитного потока ДПрВ с увеличением мощности P_2 и тока I_a будет происходить снижение частоты вращения n главным образом из-за увеличения падения напряжения на сопротивлении якорной цепи R_a . Поскольку у ДПрВ R_a невелико, то и уменьшение n будет незначительно (жесткая характеристика). Жесткость характеристики определяется соотношением

$$\Delta n = \frac{n_0 - n_n}{n_n}, \quad (2.6)$$

где n_0 – частота вращения при холостом ходе ($M_2 = 0$).

2.5. Механические характеристики

Механические характеристики ДПрВ это зависимости $n, \eta = f(M_2)$ при $U = \text{const}$, $i_s = \text{const}$, $R_d = \text{const}$. Опыт по определению этих характеристик проводится во многом аналогично опыту определения рабочих характеристик. Некоторые особенности представляет только настройка условий снятия характеристик.

Перед снятием механической характеристики при $R_d \neq 0$ необходимо установить номинальный режим работы двигателя с

полностью выведенным добавочным сопротивлением ($R_d = 0$). Затем, постепенно увеличивая R_d и поддерживая $U_c = U_n$, $i_g = i_{gn}$, $M_2 = M_n$, довести частоту вращения до $n \approx 0,5n_n$. Установив таким образом сопротивление R_d и оставив в дальнейшем его неизменным, снимают механическую характеристику аналогично рабочей. При этом помимо измерения U_c , i_g , I_a , M_2 и n необходимо измерять напряжение непосредственно на зажимах якоря U_a .

Снятие механических характеристик при $U < U_n$ и $i_g < i_{gn}$ при $R_d = 0$ не представляет затруднений. Установив первоначально номинальный режим, снижают либо U_c (обычно до $0,8U_n$), либо (обычно до $0,8i_{gn}$) и, поддерживая эти величины постоянными, снимают характеристики аналогично рабочим. Очевидно, что при снижении U_c надо поддерживать $i_g = i_{gn}$, а при снижении $i_g - U_c = U_n$.

Во всех трех опытах нагрузочный момент M_2 изменяют в диапазоне от $1,2M_{2n}$ до $M_2 = 0$ ступенями примерно $0,2M_n$.

Все расчеты P_1 , P_2 , и η производятся по формулам (2.3 – 2.5). Кроме того, в опыте с $R_d \neq 0$ необходимо определить это сопротивление, которое можно вычислить по формуле

$$R_d = \frac{U_c - U_a}{I_a}, \quad (2.7)$$

После обработки данных измерений на график наносятся зависимости $n, \eta = f(M_2)$. Сюда же целесообразно поместить аналогичные зависимости, полученные из рабочих характеристик. Приблизительный вид механических характеристик показан на рис. 2.4.

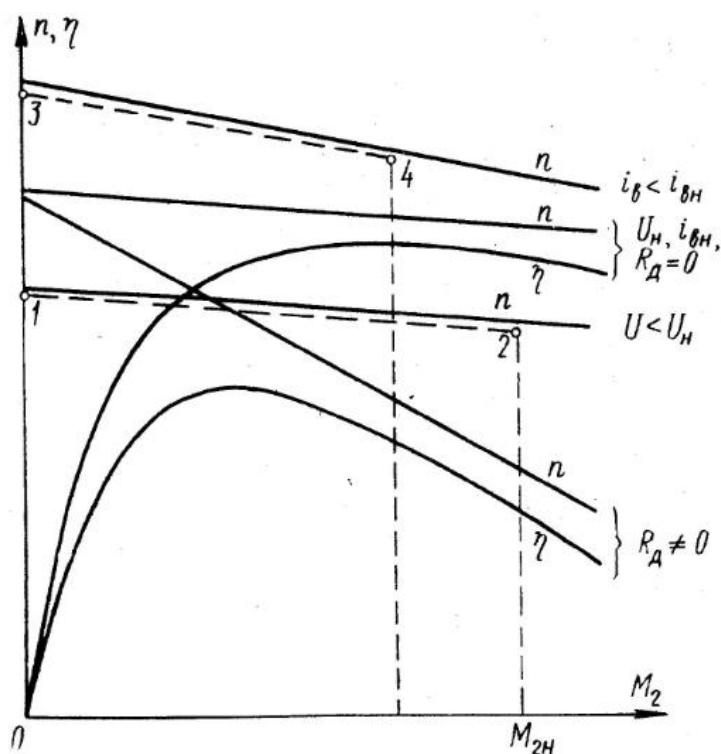


Рис.2.4. Механические характеристики двигателя

Вид механических характеристик $n = f(M_2)$ ДПрВ и их взаимное расположение можно объяснить, исходя из уравнения

$$n = \frac{U - \frac{M_0}{C_M \Phi_\delta} (R_a + R_D)}{C_e \Phi_\delta} - \frac{M_2 (R_a + R_D)}{C_e C_M \Phi_\delta^2} \quad (2.8)$$

Из (2.8) следует, что зависимости $n = f(M_2)$ при неизменном потоке машины (наличия стабилизирующей обмотки) являются прямыми линиями. При этом первый член уравнения определяет частоту вращения машины при холостом ходе, а второй – показывает изменение n с увеличением нагрузки, т.е. определяет наклон механических характеристик. Кривая КПД при $R_D \neq 0$ расположена ниже соответствующей кривой для естественной характеристики за счет потерь в добавочном сопротивлении. Так как потери на R_D зависят от квадрата

тока якоря, то равенство постоянных и переменных потерь наступает при меньших нагрузках, и поэтому максимум КПД достигается при меньших моментах M_2 .

2.6. Регулировочные характеристики

Это зависимости $I_a, i_e, \eta = f(M_2)$ при $U = U_n$, $n = n_n$ и $R_D = 0$. Опытное определение регулировочной характеристики начинается с установки нагрузки двигателя $M_2 = 1,2M_n$. При этом напряжение на двигателе с помощью ИР выставляется $U_c = U_n$ и в дальнейшем поддерживается постоянным. Равенство $n = n_n$ достигается

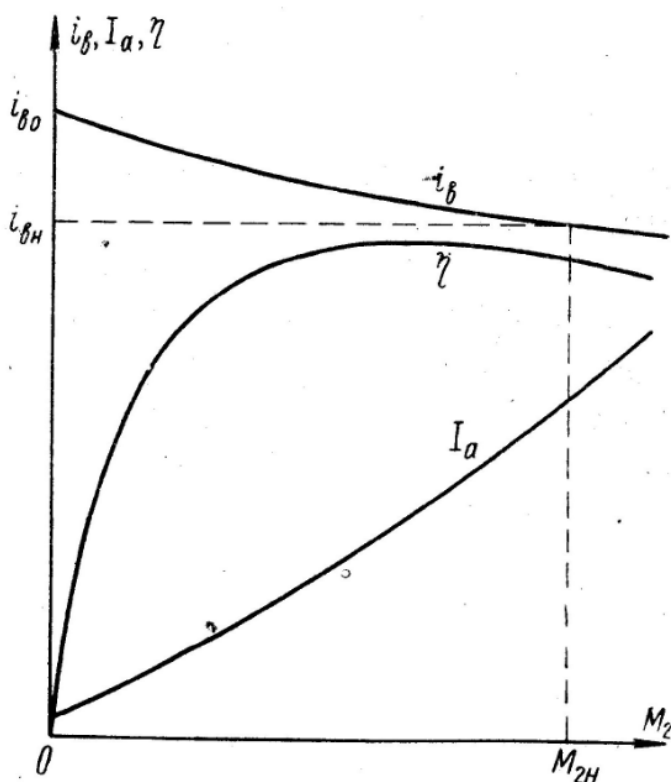


Рис.2.5. Регулировочные характеристики двигателя

регулированием тока i_e . Затем снижают момент M_2 до $M_2 = 0$ ступенями примерно $0,2M_n$ поддерживая в каждой точке $n = n_n$ изменением тока возбуждения. В процессе опыта измеряют U_c , n , M_2 , I_a , i_e . Рассчитывают по формулам (2.3 – 2.5) мощности P_1 , P_2 и КПД η . На график рис. 2.5 наносят зависимости $i_e, I_a, \eta = f(M_2)$.

Вид зависимости $i_e = f(M_2)$ можно объяснить тем, что с увеличением нагрузки растет ток I_a , и

тогда согласно выражению

$$n = \frac{U - I_a R_a}{C_e \Phi_\delta} \quad (2.9)$$

при неизменном потоке Φ_δ из-за падения напряжения $I_a R_a$ частота вращения n будет уменьшаться. Очевидно, что для ее увеличения необходимо снизить поток Φ_δ , т.е. уменьшить ток i_δ . По данным опыта можно определить изменение тока возбуждения для поддержания номинальной частоты вращения n_n при изменении нагрузки двигателя от номинальной до нуля

$$\Delta i_\delta = \frac{i_{\delta 0} - i_{\delta n}}{i_{\delta n}}. \quad (2.10)$$

Зависимость $i_\delta = f(M_2)$ обращена выпуклостью вниз. Это обусловлено тем, что по мере уменьшения потока магнитная система двигателя становится менее насыщенной. Поэтому для одинакового изменения потока требуется меньшее изменение тока возбуждения.

Для тока якоря можно записать

$$I_a = \frac{M_0 + M_2}{C_M \Phi_\delta} \quad (2.11)$$

Отсюда следует, что из-за уменьшения Φ_δ ток I_a должен расти несколько быстрее, чем M_2 .

Зависимость $\eta = f(M_2)$ имеет практически такой же вид, что и соответствующая кривая рабочих характеристик, поскольку при $n = \text{const}$ момент M_2 и полезная мощность на валу пропорциональны друг другу.

2.7. Нагрузочные характеристики

Обычно рассматриваются два вида нагрузочных характеристик:

1. $n, I_a, \eta = f(U_a)$ при $M_2 = \text{const}$ и $i_g = i_{вн}$;
2. $n, I_a, \eta = f(i_g)$ при $M_2 = \text{const}$ и $U_a = U_n$.

Эти характеристики обычно снимаются для каждого способа регулирования частоты вращения как при нагрузке двигателя, так и в режиме холостого хода ($M_2 = 0$). К сожалению, конструкция стенда (рис. 2.1) и сама схема испытаний (рис.2.2) не позволяют проводить исследования при $M_2 = 0$ (в частности, это обусловлено измерительными приборами). Поэтому в дальнейшем будем рассматривать нагрузочные характеристики с наперед заданным моментом $M_2 \neq 0$.

2.7.1. Нагрузочные характеристики ДПрВ при регулировании его частоты вращения путем изменения добавочного сопротивления в цепи якоря R_d .

В начале опыта устанавливается номинальный режим двигателя при $R_d = 0$. Затем, увеличивая R_d , снижают тем самым напряжение U_a на зажимах якоря двигателя и момент M_2 , пропорциональный частоте вращения. С помощью ЭТ (см. рис. 2.1) добиваются, чтобы момент M_2 стал бы равным M_n . Так, постепенно снижая U_a , увеличивая R_d в каждой точке добиваются равенства $M_2 = M_n$. Для получения более менее приемлемых характеристик целесообразно увеличивать R_d таким образом, чтобы n изменялась бы в интервале 100 об/мин, учитывая, что для испытуемого ДПрВ $n_n = 1000$ об/мин.

В процессе испытания производятся измерения: $\eta = U_n = \text{const}$, $M_2 = M_n = \text{const}$, $i_g = i_n = \text{const}$, U_a , n . Расчеты P_1 , P_2 , η производятся по формулам (2.3 – 2.5), а сопротивления R_d – по формуле (2.7).

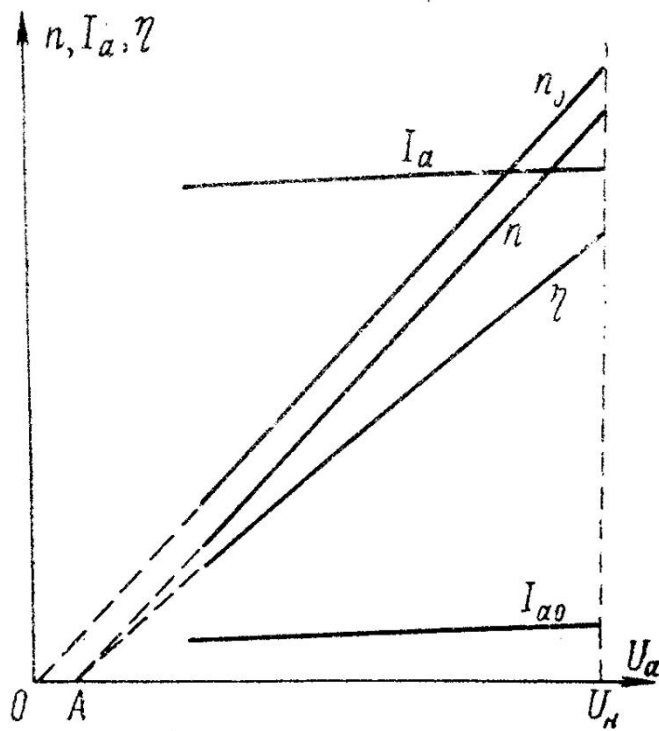


Рис.2.6. Нагрузочные характеристики при регулировании частоты вращения двигателя реостатом в цепи якоря

напряжения U_a . Поэтому с изменением U_a ток якоря I_a остается практически постоянным. Некоторое уменьшение I_a при малых значениях U_a объясняется уменьшением потерь в стали сердечника якоря и механических потерь при снижении n .

Наибольший интерес представляет зависимость $n = f(U_a)$. Частота вращения якоря n в случае нагрузочной характеристики определяется из выражения (2.9), $U = U_a = U_{сн} - I_a R_D$ — напряжение на выводных зажимах якорной цепи двигателя. Отсюда следует, что частота вращения n будет изменяться практически линейно при изменении U_a , т.е. зависимость $n = f(U_a)$ будет линейной. Эта линия отсекает на оси абсцисс при $n = 0$ некоторый отрезок, который из уравнения напряжения двигателя $U_a = E_a + I_a R_a$ получается равным $U_a = I_a R_a$

После обработки результатов на соответствующий график наносятся зависимости $n, I_a, \eta = f(U_a)$ (рис. 2.6).

Нетрудно показать, что при $M_2 = M_n$, вследствие постоянства потока Φ_δ ($i_s = i_n$ и стабилизирующая обмотка) ток якоря ДПрВ, следуя известному выражению $M = C_M \Phi_\delta I_a$, должен оставаться неизменным, т.е. быть независимым от

(т.к. при $n = 0$ $E_a = 0$). Это напряжение называют напряжением трогания (U_{aTp}).

Снижение КПД при уменьшении U_a объясняется возрастанием потерь на сопротивлении R_d . Поскольку обычно $R_d \gg R_a$, то сопротивление R_a слабо влияет на КПД, и снижение КПД происходит пропорционально увеличению R_d т.е. пропорционально зависимости $n = f(U_a)$, и следовательно, по примерно линейному закону

2.7.2. Нагрузочные характеристики ДПрВ при регулировании его частоты вращения путем изменения тока возбуждения.

В начале опыта устанавливают с помощью ИР напряжение $U_c = U_{сн}$ и в дальнейшем поддерживают его постоянным. Сопротивление R_d устанавливают в положение $R_d = 0$. С помощью ЭТ добиваются нагрузочного момента $M_2 = (0,7 - 0,8)M_n$ и в процессе проведения опыта оставляют его неизменным, т.е. при изменении частоты вращения момент M_2 с помощью ЭТ доводят до первоначально принятого значения.

Опыт начинают с максимального значения тока возбуждения (сопротивление в цепи возбуждения $R_e = 0$). Затем снижают ток i_e через равные интервалы (примерно 0,1А), поддерживая в каждой точке принятый момент M_2 . При этом снижение i_e следует производить монотонно в одном направлении во избежание влияния гистерезиса на точность эксперимента. Измеряют $U_c = U_{сн}$, $M_2 = (0,7 - 0,8)M_n$, i_e , I_a , n . Опыт проводят до тех пор, пока частота вращения n не достигнет уровня $(1,4 - 1,5)n_n$. Все расчеты проводятся по формулам (2.3 - 2.5). После обработки данных на график (рис. 2.7) наносят зависимости $n, I_a, \eta = f(i_e)$. К сожалению, как уже отмечалось в разделе 2.2.1, не удается снять аналогичные характеристики при $M_2 = 0$.

Вид нагрузочных характеристик, изображенных на рис. 2.7, можно понять следующим образом. Как следует из выражения $I_a = \frac{M_{CT}}{C_M \Phi_\delta}$ с

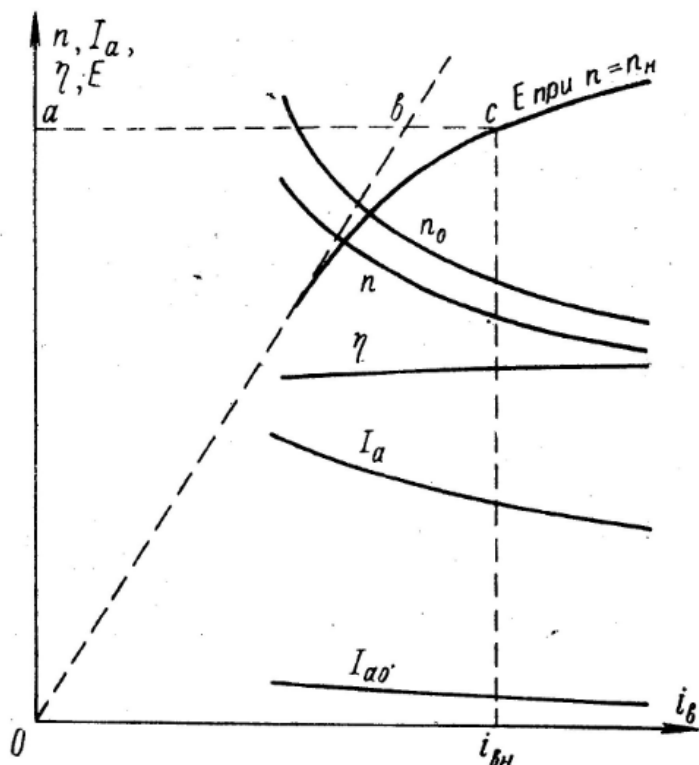


Рис.2.7. Нагрузочные характеристики при регулировании частоты вращения двигателя током возбуждения и характеристика холостого хода

уменьшением тока i_δ , а, следовательно, и потока Φ_δ , чтобы момент M_2 оставался неизменным ток I_a должен возрасть. Поскольку в первом приближении $n \approx \frac{U}{C_e \Phi_\delta}$, с уменьшением Φ_δ частота вращения возрастает. При этом некоторое увеличение падения напряжения $I_a R_a$ несравнимо меньше по отношению к $U_{сн}$,

практически не сказывается на виде кривой $n = f(i_\delta)$. КПД двигателя при данном способе регулирования получается достаточно высоким, поскольку определяется потерями в обмотке якоря относительно небольшими вследствие малости R_a , малыми потерями в обмотке возбуждения, а также небольшими магнитными и механическими потерями. Некоторое снижение КПД при малых i_δ обусловлено возрастанием потерь в обмотке якоря вследствие роста тока I_a и механических потерь из-за увеличения частоты вращения n .

2.8 Оценка результатов испытаний.

По завершении обработки результатов испытаний следует произвести их оценку. Для этого:

1. Сопоставить номинальные данные, полученные из рабочих характеристик, со щитковыми данными ДПрВ и оценить в процентах степень их отклонения, принимая за базовые щитковые данные двигателя.

2. Отметить изменение частоты вращения Δn по естественной и искусственным механическим характеристикам.

3. Указать изменение тока возбуждения Δi_e при переходе от режима холостого хода до режима номинальной нагрузки.

Глава 3.

Двигатель последовательного возбуждения

3.1. Основные характеристики двигателей последовательного возбуждения.

Основные характеристики двигателей последовательного возбуждения включают в себя:

1. *Рабочие характеристики*, в которые входят зависимости изменения частоты вращения n , тока I , полезного момента M_2 , подводимой мощности P_1 и КПД η от полезной мощности P_2 на валу двигателя. При этом напряжение на двигателе устанавливается номинальным, а сопротивление в цепи якоря $R_D = 0$. Сопротивление $R_{ш} = \infty$. Иными словами, рабочие характеристики это зависимости $n, I, M_2, P_1, \eta = f(P_2)$ при $U = U_n$ и $R_D = 0$.

2. *Механические характеристики* представляют собой зависимости $n = f(P_2)$ при $U = \text{const}$, $R_D = \text{const}$ и $R_{ш} = \text{const}$, где $R_{ш}$ – сопротивление, включаемое параллельно либо обмотке якоря, либо обмотке возбуждения ДПСВ. Обычно при этом рассматриваются также и зависимости $n = f(M_2)$. Так как в принципе U, R_D и $R_{ш}$ могут принимать любые значения, то обычно исследуют три семейства характеристик: а) при $U = U_n, R_{ш} = \infty$ (без шунтирования обмоток) и различных значениях R_D ; б) при $R_D = 0$ и различных значениях $R_{ш}$, включаемых параллельно либо обмотке якоря, либо обмотке возбуждения. Еще, как и в главе 2, отметим, что механическая характеристика полностью соответствующая снятию рабочей характеристики ($U = U_n, R_D = 0, R_{ш} = \infty$), называется естественной.

3. Нагрузочные характеристики это зависимости, которые показывают свойства двигателя в отношении регулирования его частоты вращения при неизменной нагрузке. Обычно рассматривают два вида зависимостей при $M_2 = \text{const}$: а) $n = f(U_a)$ без шунтирования обмоток двигателя, где U_a – напряжение на зажимах якоря двигателя; б) $n = f(K_{ш})$ при поочередном шунтировании якоря и возбуждения.

Коэффициент шунтирования $K_{ш}$ зависит от величины шунтирующего сопротивления $R_{ш}$ и определяется как отношение тока возбуждения I_e к току якоря I_a , т.е. $K_{ш} = I_e/I_a$. При снятии нагрузочных характеристик рассматривают также зависимости КПД в функции соответственно или U_a , или $K_{ш}$.

4. *Регулировочная характеристика*, представляющая зависимость $U = f(M_2)$ при $n = \text{const}$ для ДПсВ не является основной эксплуатационной характеристикой, поскольку эти двигатели не используются в устройствах, требующих поддержания постоянной частоты вращения при изменении нагрузки. Поэтому данная характеристика здесь не рассматривается.

3.2. Компоновка испытательного стенда и схема испытаний двигателя последовательного возбуждения.

Схема стенда (рис.3.1) включает в себя регулируемый источник питания (*ИП*), обмотки испытуемой машины ($D_1 - D_2, C_1 - C_2$), пусковой реостат (*ПР*), регулируемые сопротивления ($R_{шв}, R$), измерительные приборы и выключатели $B1, B2, B3, B4$. Сопротивление $R_{шв}$ используется только для шунтирования обмотки возбуждения, сопротивление R – как шунтирующее цепь якоря или как добавочное сопротивление. Выключатель $B4$ используется как при шунтировании обмотки возбуждения, так и при шунтировании обмотки якоря. Для обеспечения требуемого направления вращения машины при сборке рабочей схемы нужно выполнить следующие действия:

- (+) источника питания соединить с *Л1* пускового реостата,

- зажим $Я$ пускового реостата с зажимом D_1 ,
- D_2 с C_2 .

Для рационального использования аппаратуры и рабочего времени рекомендуется собирать схему для трех блоков опытов:

- для проведения опытов с добавочным сопротивлением в цепи якоря,
- для опытов с шунтированием обмотки возбуждения,
- для опытов с шунтированием обмотки якоря.

Замыкание $B1$ возможно только когда светится сигнальная лампочка $ИП$ « U_{min} ». Замыкание $B3$ возможно только при свечении лампочки « M_{2min} ». Положение движка $ПР$ определяют сигнальные лампы «стоп», «пуск», «ход». Отметим, что включение всех цепей схемы ДПСВ возможно только при максимальных величинах сопротивлений R и $R_{ув}$ (горят левые сигнальные лампочки). Включение $B2$ возможно только при положении $ПР$ «стоп». Выключатель $B4$ предназначен для поочередного подключения шунтирующих цепей обмоток якоря и возбуждения.

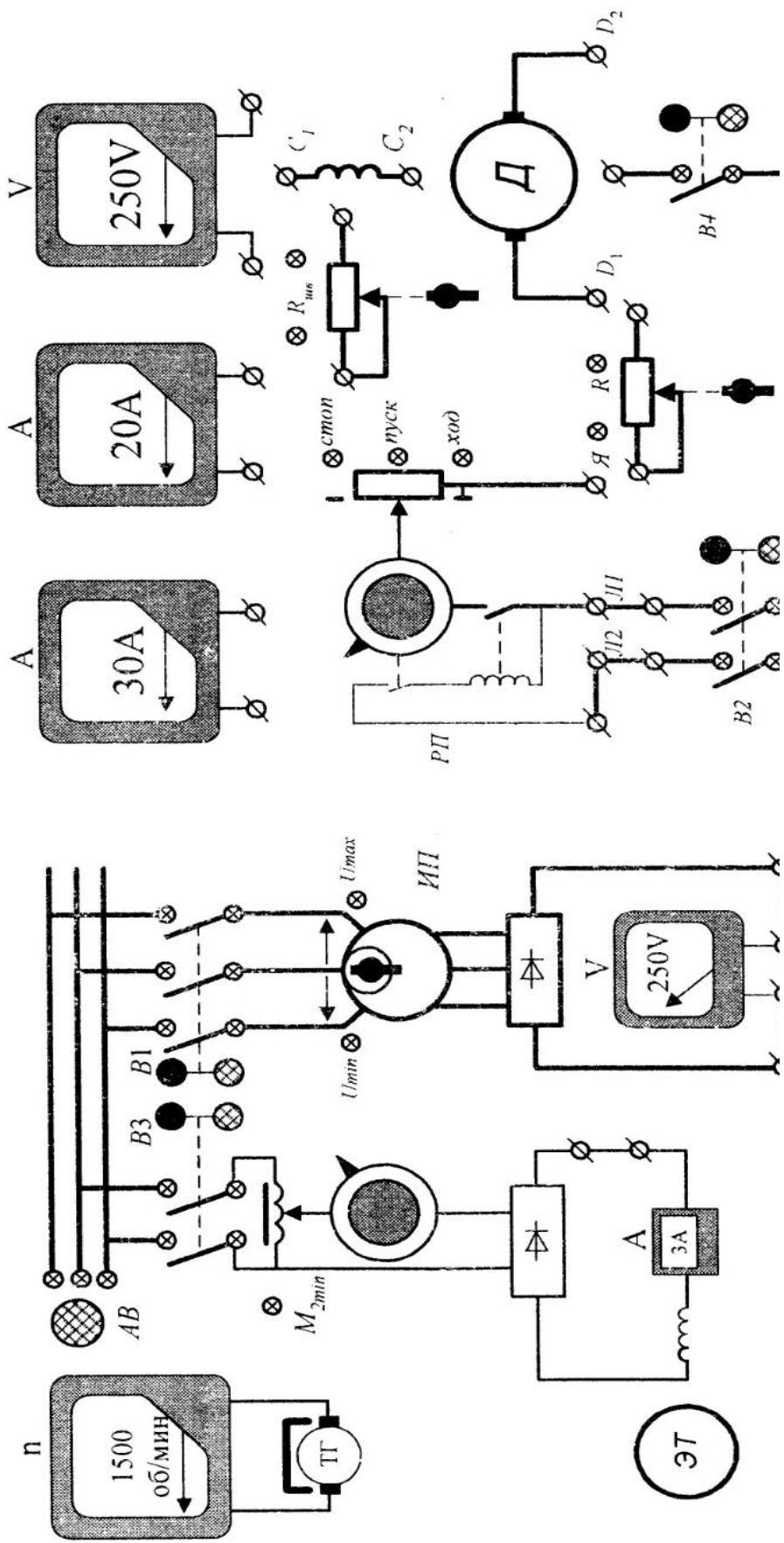


Рис.3.1. Стенд двигателя последовательного возбуждения

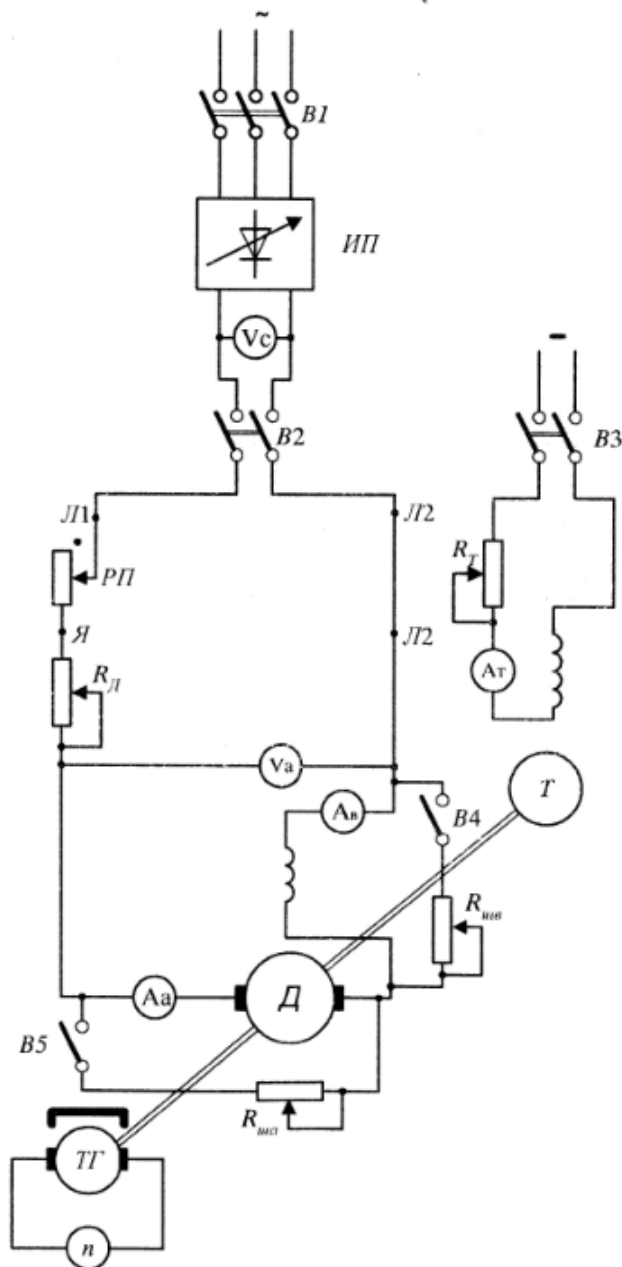


Рис. 3.2. Схема испытаний ДПсВ

Схема испытаний ДПсВ изображена на рис. 3.2.

Сразу отметим, что схема (рис. 3.2) не собирается полностью так, как это показано на рисунке. Это связано с тем, что на испытательном стенде (рис. 3.1) имеются лишь два амперметра, один из которых измеряет полный ток ДПсВ, а другой в поочередно шунтируемой цепи обмоток якоря и возбуждения. В обоих случаях включение шунтирующих цепей осуществляется выключателем B4 (см. рис. 3.1). Отметим, что сопротивление $R_{шв}$ должно иметь относительно малое сопротивление, поскольку оно шунтирует обмотку возбуждения также с малым сопротивлением. В тоже время, если $R_d = 0$, сопротивление $R_{шв}$ практически включается на напряжение U_c , и для ограничения тока в

шунтирующей цепи обмотки якоря оно должно иметь значительную, достаточно большую величину. Отметим также, что при шунтировании обмоток якоря и возбуждения приходится переключать приборы не только в основной цепи двигателя, но и в шунтирующих цепях, о чем будет сказано ниже.

3.3. Пуск в ход двигателя последовательного возбуждения.

ДПсВ имеет «мягкую» механическую характеристику и при нагрузочном моменте $M_2 = 0$ его частота вращения $n \rightarrow \infty$. Согласно рекомендациям теории электрических машин минимальная нагрузка ДПсВ не должна превышать мощности $P_2 = 0,25P_{2н}$. Следовательно, при такой мощности и соответствующем нагрузочном моменте M_2 должен осуществляться пуск двигателя. Отметим особенности пуска ДПсВ при компоновочной схеме (рис. 3.1). Напряжение на зажимы $Л1 - Л2$ пускового реостата $ПР$ в его исходном положении «стоп» может быть подано только при соблюдении следующих условий:

а) Напряжение на $ИП$ подается от сети выключателем $В1$ только в положении « U_{min} » $ИР$ (ярко светится соответствующая сигнальная лампочка);

б) Подано напряжение через $В3$ на электромагнитный тормоз $ЭТ$ при минимальном значении тормозного тока (горит сигнальная лампочка « M_{2min} »);

в) Сопротивление $R_д = R_{дmax}$, все шунтирующие сопротивления отключены (или шунтирующие цепи еще не собраны);

г) Выключателем $В2$ подается напряжение на $ПР$ и осуществляется пуск двигателя. Если сопротивление $R_д$ достаточно велико, то токи якоря и возбуждения могут быть настолько малы, что даже в положении $ПР$ «ход» ДПсВ не сможет разогнаться. В этом случае необходимо уменьшать $R_д$ до значения $R_д = 0$. При этом может происходить возрастание частоты вращения до чрезмерно большой величины. Для ее снижения с помощью $ЭТ$ увеличивают момент M_2 , но так, чтобы ток ДПсВ не превосходил своего номинального значения.

3.4 Рабочие характеристики

Это зависимости $n, I, M_2, P_1, \eta = f(P_2)$ при $U_c = U_n, R_d = 0$. При опытном определении рабочих характеристик обмотки якоря и возбуждения не шунтируются, сопротивление в цепи якоря устанавливается в положение $R_d = 0$, и вольтметры сети V_c и на зажимах сети обмотки возбуждения V_a должны показывать одинаковое значение. Предварительно необходимо определить номинальные данные двигателя. С этой целью устанавливают и поддерживают постоянным $U_c = U_n$ и с помощью ЭТ доводят ток I до значения $I = I_n$. Момент M_2 и частоту вращения n , которые при этом получаются, принимают за номинальные. Затем нагружают двигатель до момента $M_2 \approx 1,2M_n$ и снимают ряд точек, понижая момент через интервалы приблизительно $0,2M_n$ до тех пор, пока частота вращения не достигнет величины $n = (1,4 - 1,5)n_n$. В каждой точке измеряют ток I , частоту вращения n , момент M_2 , поддерживая $U_c = U_n$. По результатам измерений согласно формулам (2.3) – (2.5) ($P_1 = UI$, $P_2 = 1,028M_2n$, $\eta = \frac{P_2}{P_1}$) производят необходимые вычисления и на график наносят рабочие характеристики, примерный вид которых изображен на рис. 3.3.

Из этих графиков по кривым в соответствии с известной номинальной мощностью P_n определяются опытные номинальные значения ДПСВ M_{2n} , I_n , P_{1n} , n_n , η_n . Поскольку, как и у ДПрВ при достаточно широком изменении нагрузки КПД остается практически постоянным, то при

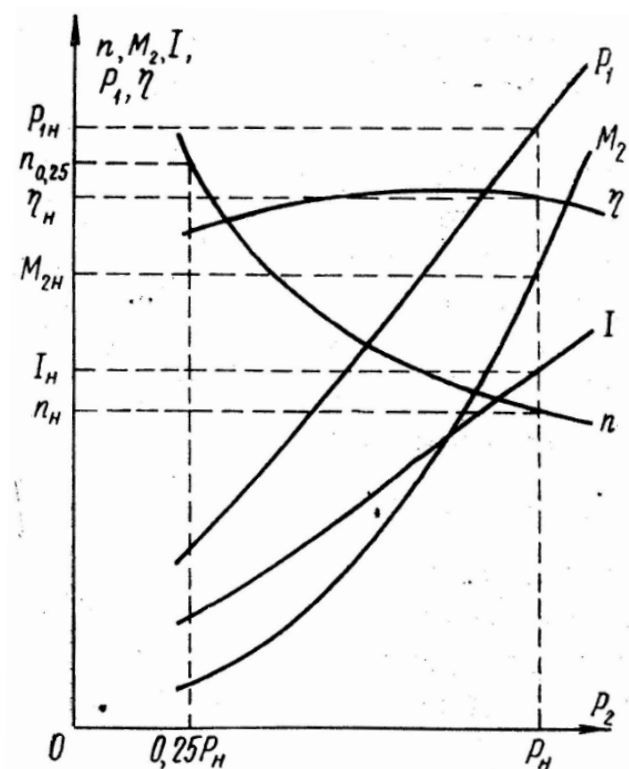


Рис. 3.3. Рабочие характеристики двигателя

постоянстве $U_c = U_n$ подводимая к ДПСВ мощность P_1 и ток I изменяются практически пропорционально полезной мощности P_2 .

У ДПСВ ток I равен току возбуждения I_e . Следовательно с изменением этого тока будет изменяться поток Φ_δ пропорционально току I , пока магнитная цепь ДПСВ не насыщена (см. формулу 3.1).

Очевидно, что если магнитная цепь не насыщена, то момент $M = C_M \Phi_\delta I = C_M K_\Phi I^2 \sim I^2$.

Поскольку, $P_2 \sim I$, то $M_2 = f(P_2)$ будет изменяться по закону квадратичной параболы. При больших нагрузках $P_2 = (0,8 - 0,9) P_{2n}$ вследствие насыщения кривая $M_2 = f(P_2)$ будет отклоняться от параболы, приближаясь к линейной зависимости.

Частота вращения $n \approx \frac{U}{C_e \Phi_\delta}$. Но $\Phi_\delta \sim I$, и $P_2 \sim I$. Следовательно, зависимость $n = f(P_2)$ представляет собой гиперболу, но при больших нагрузках из-за насыщения характер этой кривой будет отклоняться от

гиперболической. На вид кривой $n = f(P_2)$ оказывает некоторое влияние также падение напряжения на сопротивлении якорной обмотки.

По характеристике $n = f(P_2)$ можно определить номинальное изменение частоты вращения $\Delta n_{0,25}$, которое соответствует переходу нагрузки ДПСВ от номинальной до $P_2 = 0,25P_{2н}$, т.е.

$$\Delta n_{0,25} = \frac{n_{0,25} - n_n}{n_n}, \quad (3.2)$$

где $n_{0,25}$ – частота вращения при $P_2 = 0,25P_{2н}$.

3.5. Механические характеристики

Это зависимости $n = f(M_2)$ при $U = \text{const}$, $R_D = \text{const}$, $R_{ш} = \text{const}$.

Опыт по определению механических характеристик проводится аналогично опыту по снятию рабочих характеристик. Некоторую особенность представляет только настройка условий снятия этих характеристик.

Механические характеристики снимаются для четырех случаев:

- а) $U_c = U_n$, $R_D \neq 0$, $R_{ша} = R_{шв} = \infty$;
- б) $U_c < U_n$, $R_D = 0$, $R_{ша} = R_{шв} = \infty$;
- в) $U_c = U_n$, $R_D = 0$, $0 < R_{шв} < \infty$, $R_{ша} = \infty$;
- г) $U_c = U_n$, $R_D = 0$, $0 < R_{ша} < \infty$, $R_{шв} = \infty$.

Перед проведением опыта (а) устанавливают $R_D = 0$ и при $U_c = U_n$ настраивают номинальный режим работы двигателя. Затем, поддерживая $U_c = U_n$ и с помощью ЭТ $M_2 = M_n$, увеличивают сопротивление R_D до тех пор, пока не достигнут $n \approx 0,5n_n$. После чего,

оставляя R_d неизменным, нарушают двигатель до момента $M_2 = 1,2M_n$ и, снижая момент через интервалы приблизительно $0,2M_n$, снимают характеристику до достижения $n = (1,4 - 1,5)n_n$. Измеряют напряжение U_c , ток I , момент M_2 , частоту вращения n , напряжение на якоре U_a . По результатам измерений рассчитывают P_1, P_2, η , используя формулы (2.3 – 2.5). Кроме того, по формуле (2.7) вычисляют добавочное сопротивление. На график (рис. 3.4) наносят зависимости $n, \eta = f(M_2)$. Здесь же целесообразно привести аналогичные кривые, полученные из рабочих характеристик.

При проведении опыта (б) устанавливают $R_d = 0$ и снижают напряжение U_c до величины $U_c = 0,5U_n$ при $M_2 = M_n$. Затем опыт проводится аналогично случаю (а) при поддержании $U_c = 0,5U_n$.

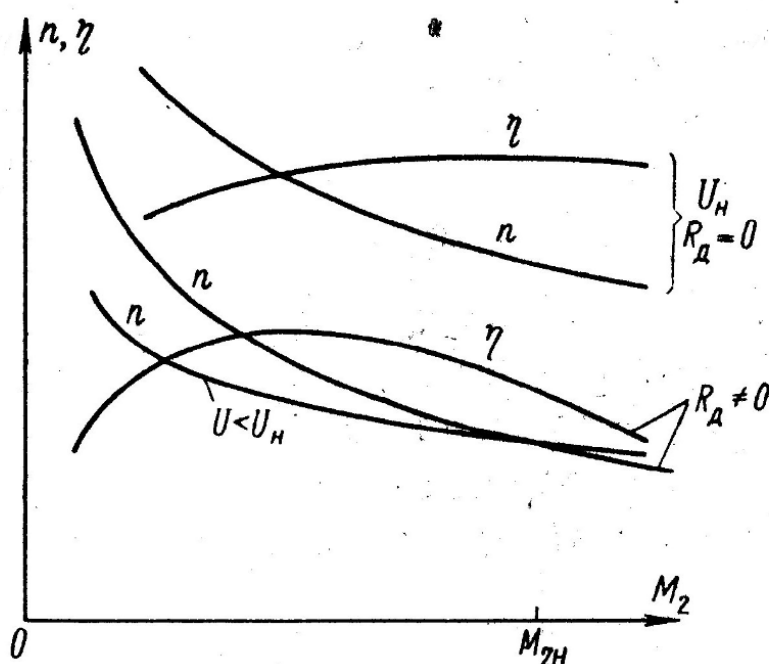


Рис.3.4. Механические характеристики двигателя без шунтирования обмоток

Измеряют те же величины, кроме U_a , и рассчитывают P_1, P_2 и η . Зависимости помещают на рис. 3.4.

При шунтировании обмотки возбуждения (случай (в)) предварительно

устанавливают $R_d = 0$ и

$R_{ув} = R_{ув\max}$. Затем с помощью ИП добиваются $U_c = U_n$ и замыкают В4 (см. рис.3.1). После этого, поддерживая $U_c = U_n$ и ЭТ $M_2 = M_n$, постоянно

уменьшают $R_{шв}$, добиваясь при $M_2 = M_n$ значения $n \approx 1,2n$, и при неизменном $R_{шв}$ снимают механическую характеристику аналогично предыдущим случаям. Измеряют напряжение U_c , полный ток двигателя I , который в данном случае будет равен току якоря I_a , ток возбуждения I_e . По результатам измерений аналогично предыдущим случаям вычисляют P_1, P_2 и η . Кроме того, по формуле

$$I_{шв} = I_a - I_B \quad (3.3)$$

находят ток в шунте, а по выражению

$$R_{шв} = r_c \frac{I_B}{I_{шв}} \quad (3.4)$$

самошунтирующее сопротивление. Здесь r_c – сопротивление обмотки возбуждения.

По итогам вычислений на график (рис.3.5) наносят кривые

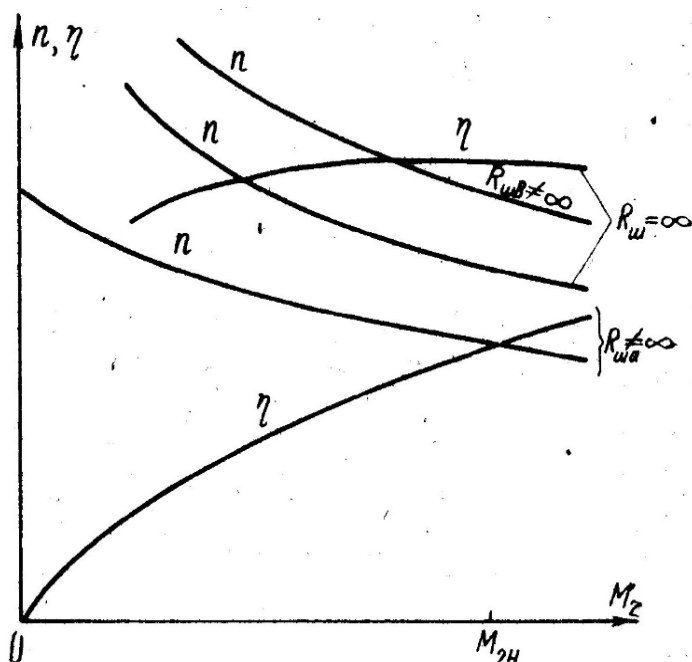


Рис.3.5. Механические характеристики двигателя при шунтировании обмоток возбуждения и якоря

$n, \eta = f(M_2)$. Здесь же помещают аналогичные кривые, полученные из рабочих характеристик.

В случае (г), т.е. при шунтировании обмотки якоря, поступают аналогично случаю (в), но при $U_c = U_n$ добиваются такого сопротивления $R_{шв}$, чтобы при $M_2 = M_n$ частота вращения была бы равна $n \approx 0,8n_n$. При этом должна быть осуществлена переборка схемы (рис. 3.2).

Поскольку R_d используется и как $R_{ша}$, его необходимо исключить из схемы и включить через выключатель $B4$ в шунтирующую цепь обмотки якоря. Далее амперметры A_a и $A_в$ следует поменять местами, поскольку амперметр $A_в$ в данном случае будет измерять полный ток двигателя, а амперметр A_a – только ток якоря I_a меньший полного тока. Наконец, отметим, что в силу малости сопротивления r_c сопротивление $R_{шв}$ также получается малым, в то время как сопротивление $R_{ша}$ оказывается включенным практически на напряжение $U_c = U_n$ (за вычетом малого падения напряжения на r_c) и для ограничения тока в $R_{ша}$, оно должно иметь достаточно большое значение сопротивления.

Сам опыт проводится аналогично предыдущим. Измеряются напряжение U_c , полный ток I , равный в данном случае току возбуждения $I_в$, нагрузочный момент M_2 , частоту вращения n , ток якоря I_a . По измеренным данным, как и прежде, вычисляются мощности P_1, P_2 и КПД η . Кроме того, по формуле

$$I_{ша} = I_в - I_a \quad (3.5)$$

находится ток в шунтирующем сопротивлении $R_{ша}$, а само оно оказывается равным

$$R_{ша} = r_c \frac{U_n - I_в r_c}{I_{ша}} \quad (3.6)$$

Зависимости $n, \eta = f(M_2)$ наносятся на график (рис.3.5).

Вид механических характеристик без шунтировок обмоток можно объяснить на основании уравнения механической характеристики. Естественная механическая характеристика описывается уравнением (3.1). Для искусственных характеристик это уравнение принимает вид:

$$n = \frac{\sqrt{C_M} U}{C_e \sqrt{K_\phi} \sqrt{M}} - \frac{R_a + R_d}{C_e K_\phi} \quad (3.7)$$

Сразу отметим, что второй член уравнения (3.7) при постоянном насыщении ($K_\phi = \text{const}$) и сопротивлении R_d есть некоторая отрицательная составляющая, вычитаемая из гиперболической зависимости.

При ненасыщенной магнитной системе и $R_d = 0$ (естественная механическая характеристика) вследствие малости члена $\frac{R_a}{C_e K_\phi}$ частота вращения практически обратно пропорциональна $\sqrt{M_2}$ (см. формулу 3.1). При $U < U_n$ вся кривая $n = f(M_2)$ опускается ниже естественной характеристики практически пропорционально величине приложенного напряжения (рис.3.4). Поскольку в данном случае в цепь двигателя не вносятся дополнительные элементы, в которых могут выделяться потери мощности, то зависимость $\eta = f(M_2)$ при $U < U_n$ практически совпадает с кривой КПД для естественной характеристики (на рис. 3.4 эта зависимость не представлена). При $R_d \neq 0$ вся кривая $\eta = f(M_2)$ опускается ниже естественной характеристики на величину $\frac{R_d}{C_e K_\phi}$. Кривая КПД в этом случае вследствие потерь на добавочном сопротивлении, пропорциональным I^2 , располагается ниже кривой КПД естественной характеристики, а максимум КПД, наступающий при равенстве постоянных и переменных потерь (см. гл .2) смещается в область малых нагрузок.

Механические характеристики ДПсВ при шунтировании обмотки возбуждения располагаются выше, а при шунтировании обмотки якоря – ниже естественной характеристики (рис. 3.5.).

Такое расположение характеристик можно объяснить следующими соображениями. Независимо от того, какая из обмоток ДПсВ шунтирована, при одинаковом моменте $M = C_M \Phi_\delta I_a$ произведение $\Phi_\delta I_a$ должно быть

одинаковым, а при ненасыщенной магнитной системе – одинаковым произведение $I_e I_a$. Если обмотки ДПСВ не шунтированы, то $I_e I_a$. При шунтировании обмотки возбуждения ток I_a увеличивается по сравнению с первоначальным значением за счет тока $I_{ша}$, а ток I_e уменьшается, что приводит к снижению потока Φ_δ и согласно $n \approx \frac{U}{C_e \Phi_\delta}$ к возрастанию частоты вращения n . При шунтировании обмотки якоря происходит противоположное явление, а именно, ток якоря I_a уменьшается, а ток возбуждения I_e увеличивается, т.е. поток Φ_δ возрастает, а частота вращения согласно $n \approx \frac{U}{C_e \Phi_\delta}$ падает. Следует отметить, как исключительный случай, что при шунтировании обмотки якоря даже при $M_2 = 0$ частота вращения $n \neq \infty$. Дело в том, что при $M_2 = 0$ ток якоря $I_a = 0$, но ток возбуждения I_e становится равным $I_e = I_{ша}$, т.е. имеет конечное значение. Следовательно, поток $\Phi_\delta \neq 0$ и частота вращения $n \neq \infty$.

При шунтировании обмотки якоря частота вращения n и потребляемый двигателем ток $I = I_a$, а также полезная P_1 и подводимая P_2 мощности увеличиваются примерно одинаково по сравнению с тем, когда обмотка не шунтирована. Поэтому кривая КПД для этого случая (на рис. 3.5 не приведена) практически будет совпадать с кривой КПД для естественной характеристики. Это можно пояснить практическим отсутствием дополнительных потерь в цепи двигателя. В самом деле, такие потери могут выделяться только на сопротивлении $R_{шв}$. Но его величина соизмерима с крайне малым сопротивлением последовательной обмотки возбуждения R_c . Поэтому потери на сопротивлении $R_{шв}$ пренебрежимо малы и ими можно пренебречь.

При шунтировании обмотки якоря частота вращения n и полезная мощность P_2 уменьшаются. В то же время потребляемый из сети ток $I = I_e$ и мощность P_1 увеличиваются. Следовательно, в этом случае кривая КПД будет располагаться ниже аналогичной кривой для естественной

характеристики. Снижение КПД можно также объяснить значительным увеличением электрических потерь на сопротивлении $R_{ша}$, которое, как уже отмечалось, в силу включения на практически номинальное напряжение имеет большую величину.

3.6. Нагрузочные характеристики

Эти характеристики подразделяются на две группы:

1. Зависимости $n, I, \eta = f(U_a)$ при $M_2 = \text{const}$ и $U_c = U_n$;
2. Зависимости $n, I_a, I_e, \eta = f(K_{ш})$ при $M_2 = \text{const}$ и $U_a = U_n$.

Заметим, что в п.2 под $K_{ш}$ понимается коэффициент шунтирования, представляющий собой отношение тока возбуждения I_e к току якоря I_a , т.е. $K_{ш} = \frac{I_e}{I_a}$.

Рассмотрим в начале нагрузочные характеристики при регулировании частоты вращения n двигателя путем изменения сопротивления R_d в цепи якоря.

После установки R_d в положение $R_d = 0$ с помощью ИП добиваются равенства $U_c = U_n$. Затем, используя ЭТ, достигают номинального режима, т.е. чтобы при $U_c = U_n$ ток $I = I_n$ и момент $M_2 = M_n$. Записав показания приборов, увеличивают сопротивление R_d так, чтобы напряжение на зажимах якоря U_a снизилось бы примерно на 10%, но при этом напряжение сети должно оставаться постоянным и равным $U_c = U_n$, и момент M_2 , регулируемый ЭТ, тоже должен быть неизменным, равным $M_2 = M_n$. Так, постепенно увеличивая R_d и снижая напряжение U_a примерно через 10% U_n , снимается ряд точек до значения $U_a = (0,3 - 0,4)U_n$. В процессе опыта измеряются $U_c = U_n$, $M_2 = M_n$, ток I , частота вращения n и напряжение на якоре U_a . По полученным данным, согласно выше изложенному, рассчитываются

мощности P_1, P_2, η и R_d . Затем зависимости $I, n, \eta = f(U_a)$ наносятся на график (рис. 3.6).

Поскольку опыт производится при постоянном моменте, то ток двигателя остается практически неизменным. Незначительное его уменьшение при малых значениях напряжения U_a объясняется уменьшением магнитных потерь в сердечнике якоря ДПсВ и механических потерь при низкой частоте вращения двигателя.

Уравнение скоростной характеристики в рассматриваемом случае можно представить в виде:

$$n = \frac{U_a}{C_e \Phi_\delta} - \frac{IR_a}{C_e \Phi_\delta} \quad (3.8)$$

где $U_a = U_{сн} - IR_d$.

Из (3.8) следует, что частота вращения n при изменении U_a будет изменяться практически линейно по отношению к U_a , так как падение

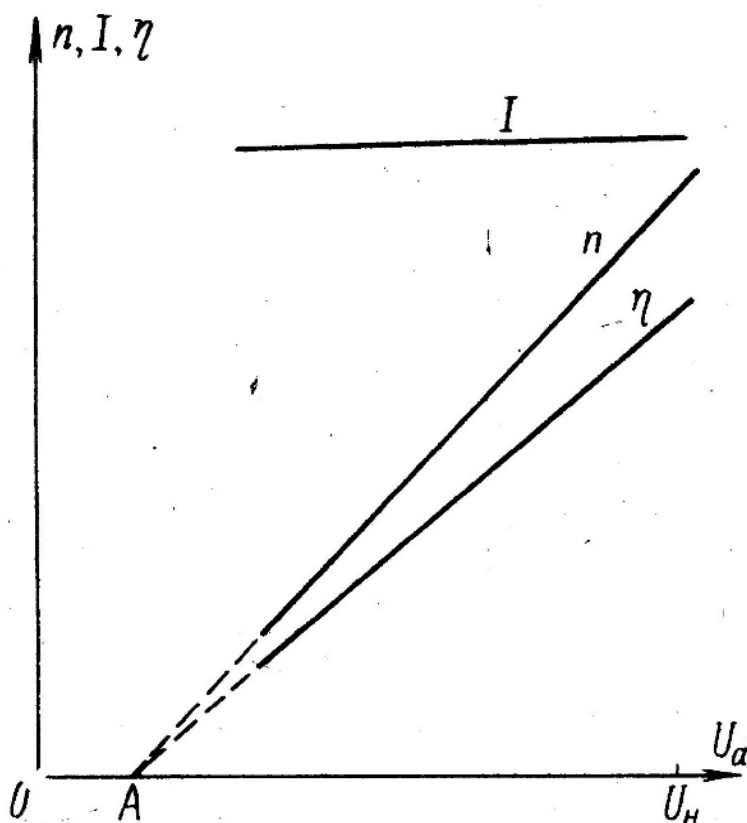


Рис.3.6. Нагрузочные характеристики при регулировании частоты вращения двигателя реостатом в цепи якоря

напряжения IR_a и поток Φ_δ есть величины постоянные. Прямая $n = f(U_a)$ отсекает на оси абсцисс (U_a) некоторое напряжение U_a равное отрезку OA , численно равному падению напряжения IR_a , что, как уже отмечалось в гл. 2, является напряжением трогания ($U_{тр}$), т.е. напряжением, с которого двигатель начинает вращаться.

Функция

$\eta = f(U_a)$ также имеет

прямолинейный характер, поскольку при неизменном токе нагрузки КПД является только функцией мощности $P_1 = U_n I$, которая остается неизменной. В тоже время, мощность на валу двигателя $P_2 = M_2 \Omega$ ($\Omega = 2\pi n$) согласно (3.8) уменьшается (при $M_2 = \text{const}$) прямо пропорционально n . Поскольку зависимость $n = f(U_a)$ является линейной, то, в силу постоянства мощности P_1 , кривая $\eta = f(U_a)$ также должна быть линейной.

Опыт снятия нагрузочных характеристик при шунтировании обмоток ДПСВ проводится при поочередном шунтировании сначала обмотки возбуждения, а потом обмотки якоря. Перед началом опыта полностью выводится сопротивление R_d ($R_d = 0$), или же оно полностью исключается из схемы. После пуска двигателя устанавливается номинальный режим работы ($M_2 = M_n$) и записываются показания всех приборов. Далее при максимальном значении сопротивления $R_{ув}$ выключателем $B4$ замыкается цепь, шунтирующая обмотку возбуждения. Устанавливаются и в дальнейшем поддерживаются постоянными $U_c = U_n$ и $M_2 = M_n$. Отрегулировав таким образом режим работы двигателя, записывают показания приборов. Затем постепенно уменьшают $R_{ув}$ так, чтобы частота вращения изменялась бы от точки к точке с интервалом примерно $(0,07 - 0,08)n_n$, доведя ее до $n \approx 1,5n_n$. При этом в каждой точке контролируют равенства $U_c = U_n$ и $M_2 = M_n$. По окончании опыта вернуть $R_{ув}$ в положение $R_{ув \max}$ и выключателем $B4$ разомкнуть шунтирующую цепь обмотки возбуждения. Поскольку согласно рис. 3.1 включение и отключение шунтирующих цепей осуществляется выключателем $B4$, а в качестве шунтирующего якоря двигателя $R_{иа}$ используется сопротивление R_d , необходимо остановить двигатель, разобрать схему шунтировки обмотки возбуждения и собрать схему шунтировки обмотки якоря. После этого запускают двигатель и проводят опыт аналогично предыдущему, т.е. устанавливают $U_c = U_n$, $M_2 = M_n$ и шунтируют обмотку якоря при $R_{иа} = R_{иа \max}$. Затем, снижая $R_{иа}$ снимают ряд точек с интервалом

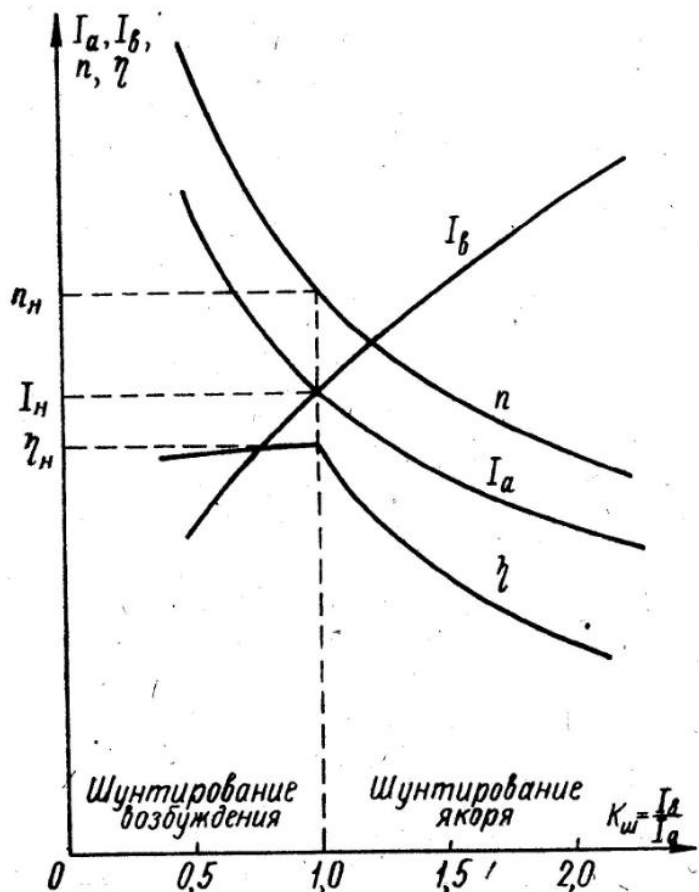


Рис.3.7. Нагрузочные характеристики при регулировании частоты вращения двигателя шунтированием обмоток

изменения тока I_b приблизительно $0,1 I_n$, доводя его до значения $I_b = (1,8-1,9)I_n$ и поддерживая в каждой точке $U_c = U_n$ и $M_2 = M_n$. В обоих опытах измеряют ток якоря I_a , ток возбуждения I_b и частоту вращения n . По результатам опытов рассчитывают токи в шунтирующих сопротивлениях $R_{шв}$ и $R_{ша}$, а также величины самих этих сопротивлений. Кроме того, по ранее приведенным выражениям вычисляют мощности P_1 , P_2 и η . При

подсчете мощности $P_1 = UI$ в качестве тока I надо принимать его наибольшее значение, в частности, при шунтировании обмотки возбуждения $I = I_a$, а при шунтировании обмотки якоря $I = I_b$. Токи $I_{шв}$ и $I_{ша}$ вычисляются по формулам (3.3), (3.5), а сопротивления $R_{шв}$, $R_{ша}$ – по формулам (3.4), (3.6).

На график (рис.3.7) наносятся зависимости $n, I_a, I_b, \eta = f(K_{ш})$, где $K_{ш} = \frac{I_b}{I_a}$ – коэффициент шунтирования. Зависимости токов в обмотках ДПСВ I_b и I_a , а также частоты вращения n становятся понятными из выражений:

$$I_{\epsilon} = \sqrt{\frac{M_2 K_{III}}{C_M K_{\phi}}} \quad (\text{а}); \quad I_a = \sqrt{\frac{M_2}{C_M K_{\phi} K_{III}}} \quad (\text{б}) \quad (3.9)$$

$$n = \frac{U}{C_e} \sqrt{\frac{C_M}{M_2 K_{\phi} K_{III}}} - \frac{R_a}{C_e K_{\phi} K_{III}} \quad (3.10)$$

Выражения (3.9), (3.10) получены из ряда формул, приведенных в гл.1 в предположении, что момент холостого хода $M_0 = 0$ и $R_d = 0$, также предполагая пропорциональность $\Phi_{\delta} = K_{\phi} I_{\epsilon}$. Обозначая через I_1 и n_1 значения тока двигателя и его частоты вращения при отсутствии шунтирования обмоток ($K_{III} = 1$) и пренебрегая в (3.10) вторым членом, вследствие его малости по сравнению с первым, можно записать:

$$I_{\epsilon} = I_1 \sqrt{\frac{K_{\phi_1} K_{III}}{K_{\phi}}}; \quad (\text{а}) \quad I_a = I_1 \sqrt{\frac{K_{\phi_1}}{K_{\phi} K_{III}}}; \quad (\text{б}) \quad n \approx n_1 \sqrt{\frac{K_{\phi_1}}{K_{\phi} K_{III}}}, \quad (\text{в}) \quad (3.11)$$

где K_{ϕ_1} - значение K_{ϕ} при токе $I_{\epsilon} = I_1$.

Из (3.11) следует, что при ненасыщенной магнитной системе ДПСВ ($K_{\phi} = \text{const}$) ток I_{ϵ} будет прямо пропорционален, а ток I_a и частота вращения n обратно пропорциональны $\sqrt{K_{III}}$. КПД двигателя при шунтировании обмотки возбуждения будет оставаться практически постоянным и равным

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{1,028 M_2 n}{U_n I_a} \approx \frac{1,028 M_2 n_1}{U_n I_1} = \eta_1, \quad (3.12)$$

а при шунтировании обмотки якоря будет обратно пропорционален коэффициенту шунтирования.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{1,028M_2n}{U_n I_\epsilon} \approx \frac{1,028M_2n_1}{U_n I_1 K_{III}} = \frac{\eta_1}{K_{III}} \quad (3.13)$$

Приведенные на рис.3.7 зависимости I_a , I_ϵ и n имеют такое же физическое объяснение, что и механические характеристики при шунтировании обмоток двигателя. Так, при ненасыщенной магнитной системе ДПсВ и номинальном моменте нагрузки, что соответствует условию снятия механических характеристик, произведение токов $I_a I_\epsilon$ должно оставаться постоянным. Поэтому при увеличении $K_{III} = \frac{I_\epsilon}{I_a}$ ток I_ϵ будет возрастать, а ток I_a уменьшаться пропорционально $\sqrt{K_{III}}$. В соответствии с увеличением тока I_ϵ в ДПсВ будет также возрастать поток Φ_δ и уменьшаться частота вращения n .

Следует отметить, что при достаточно сильном насыщении магнитной цепи двигателя действительные кривые I_a , I_ϵ и n могут существенно отличаться от кривых, изображенных на рис. 3.7.

3.7. Оценка результатов испытаний.

По итоговым результатам испытаний необходимо:

1. Сопоставить полученные из рабочих характеристик величины для номинального режима работы ДПсВ со щитковыми данными.

2. Сопоставить по механическим характеристикам изменение частоты вращения двигателя $\Delta n_{0,25}$ при изменении момента от M_{2n} до $0,25M_{2n}$, а также значения КПД при $M_2 = M_{2n}$, η_{\max} и соответствующий ему момент. Для случая шунтировки обмотки якоря указать частоту вращения при холостом ходе ($M_2 = 0$).

3. По нагрузочным характеристикам отметить пределы регулирования частоты вращения при изменении напряжения на зажимах якоря U_a , а также степени шунтирования обмоток, определяемых коэффициентом K_{III} .

Глава 4

Испытание генераторов постоянного тока

4.1. Основные зависимости и типы характеристик.

По способу возбуждения генераторы постоянного тока делятся на четыре группы: независимого, параллельного, последовательного и смешанного возбуждения. Генераторы последовательного возбуждения применяются только в специальных установках. В дальнейшем будем иметь в виду только генераторы независимого, параллельного и смешанного возбуждения с согласным включением параллельной и последовательной обмоток.

Работа любого из вышеперечисленных генераторов характеризуется следующими величинами: напряжением на зажимах генератора U ; током нагрузки I ; током в обмотке возбуждения i_e ; частотой вращения n . Генераторы постоянного тока, как правило, работают при постоянной частоте вращения n_n . В дальнейшем будем исследовать характеристики генераторов при $n = n_n$. К этим характеристикам относятся:

1. *Характеристика холостого хода* $U = f(i_e)$ при токе $I = 0$. Для любого типа генератора эта характеристика снимается при независимом возбуждении.

2. *Нагрузочные характеристики* – это зависимости напряжения генератора U от тока возбуждения i_e при неизменном токе нагрузки (обычно при $I = I_n$). Отметим, что характеристика холостого хода является частным случаем нагрузочной характеристики, когда $I = 0$.

3. *Внешние характеристики* представляют собой зависимости напряжения генератора U от тока нагрузки I при нерегулируемом токе возбуждения i_e , т.е. при постоянном сопротивлении цепи обмотки

возбуждения $R_{цв} = \text{const}$. Для ГНВ условие $R_{цв} = \text{const}$ равносильно условию $i_g = \text{const}$, так как обмотка возбуждения получает питание от постороннего источника постоянного тока со стабильным напряжением. Наибольший практический интерес представляет внешняя характеристика, снятая при $R_{цв} = R_{вн}$, которое обеспечивает $U = U_n$ при $I = I_n$. В краткой форме записи внешние характеристики – это зависимости $U = f(I)$ при $R_{цв} = \text{const}$.

4. *Регулировочные характеристики* – это зависимости тока возбуждения i_g от тока нагрузки I при $U = \text{const}$. Наибольший интерес представляет характеристика $i_g = f(I)$, снятая при $U = U_n$.

4.2. Компоновка испытательного стенда и схемы испытаний.

Компоновка испытательного стенда представлена на рис. 4.1.

Приводным двигателем ГПТ является синхронный двигатель (*СД*), главное достоинство которого – обеспечение постоянной частоты вращения независимо от величины нагрузки на валу. На одном валу с *СД* находится возбудитель (*В*), предназначенный для питания обмотки возбуждения *СД* постоянным током. Способ пуска *СД* – асинхронный. При замыкании выключателя *В1* загорается лампочка «пуск», а по окончании синхронного пуска – лампочка «ход». К этой же сети, питающей *СД*, подсоединен выпрямитель *В* подающий выпрямленное напряжение постоянного тока на выключатель *В3*. За выключателем в схеме находится сопротивление цепи основной обмотки возбуждения $Ш_1 - Ш_2$ R_g генератора *Г*. Величина сопротивления R_g ($R_g = 0$ или $R_g = R_{g\text{max}}$) сигнализируется соответствующими лампами. В рассечку между цепью *В3* и обмоткой $Ш_1 - Ш_2$ включается амперметр и может быть подсоединено дополнительно к R_g сопротивление. Здесь же

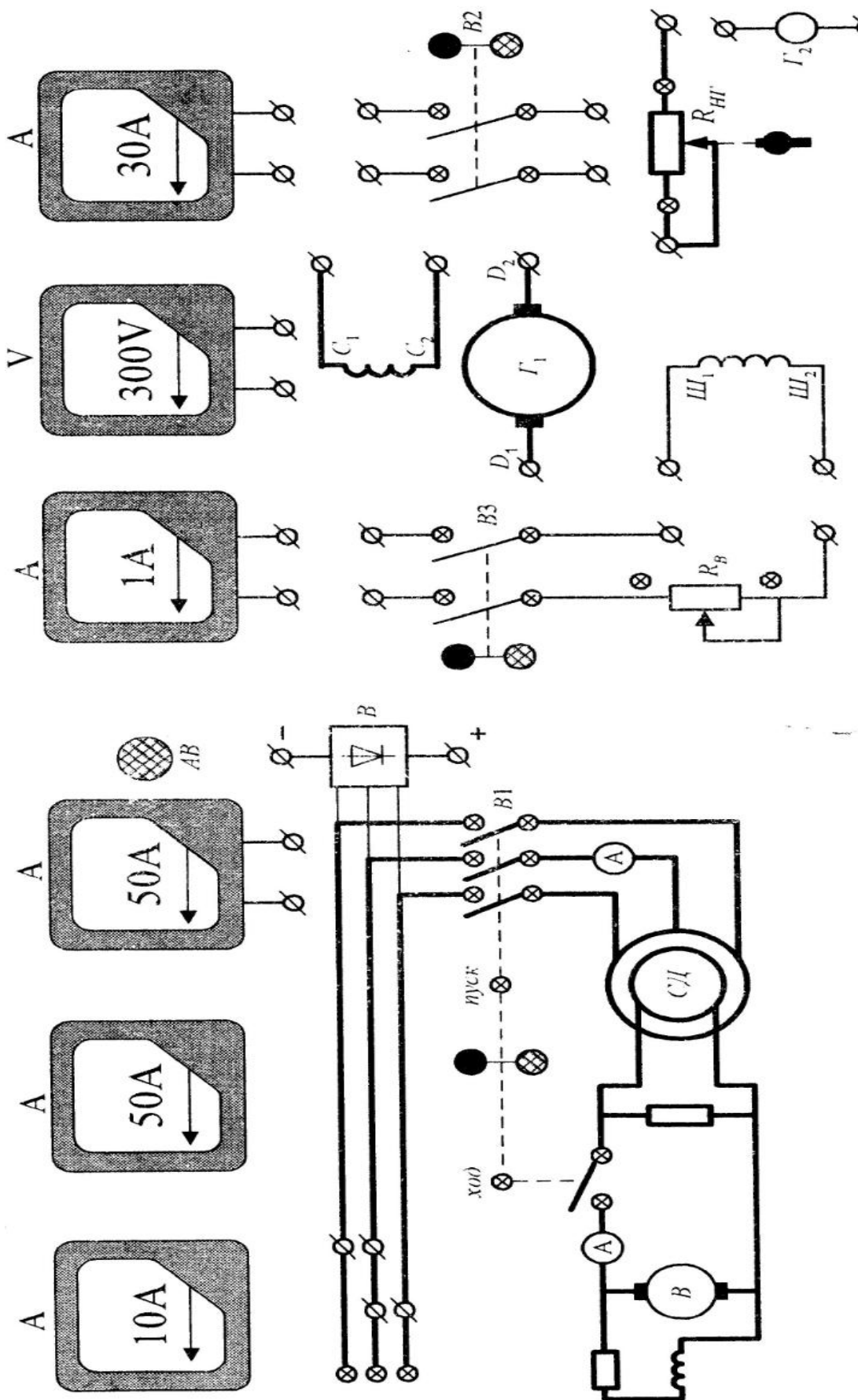


Рис.4.1. Стенд генератора постоянного тока

показана последовательная обмотка и помещены схемы для ее подключения. Выключатель $B2$ предназначен для подключения через амперметр сопротивления нагрузки $R_{нг}$. Вольтметр V измеряет напряжение на зажимах генератора. Кнопка AB - аварийное отключение, обесточивающее силовые цепи и цепи управления.

Схемы испытаний ГПТ показаны на рис. 4.2 а, б, в для ГПТ независимого (а), параллельного (б) и смешанного (в) возбуждения.

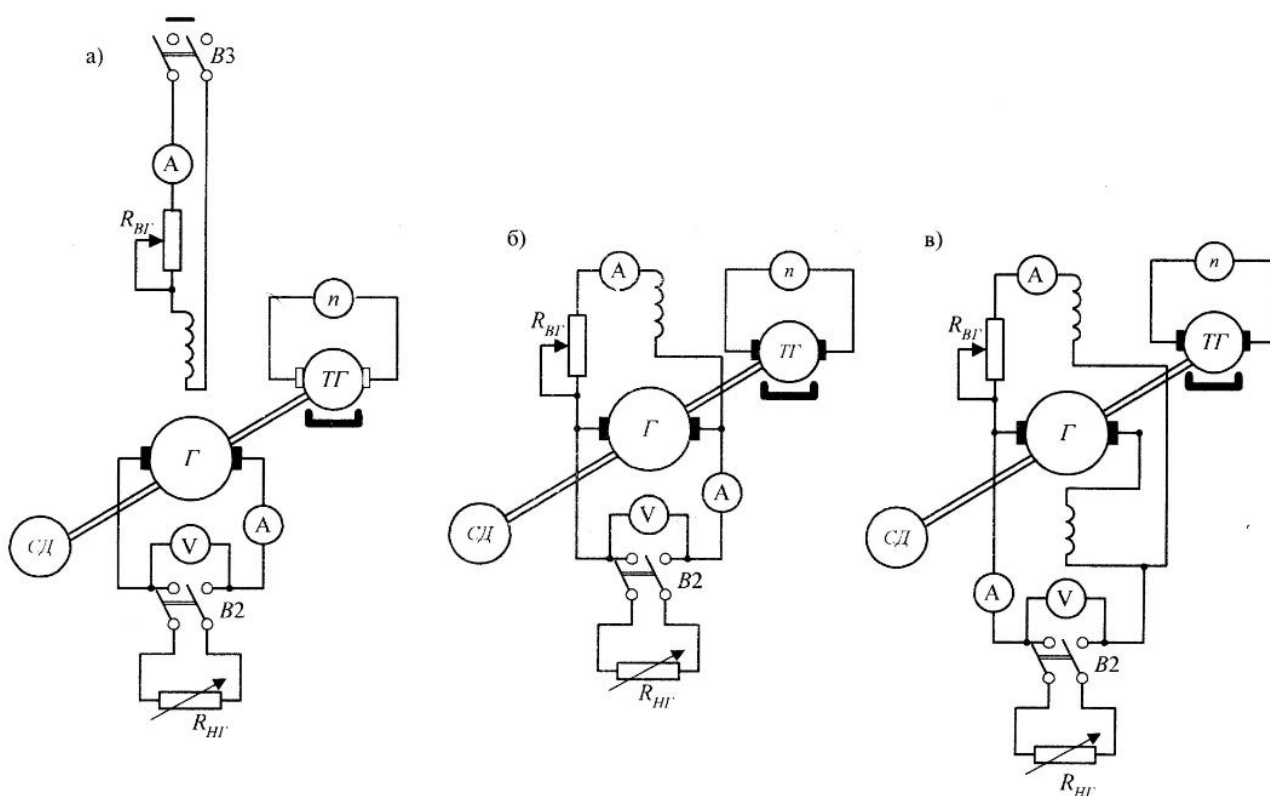


Рис.4.2. Схема испытания генератора:
 а-независимого возбуждения, б-параллельного возбуждения,
 в-смешанного возбуждения

Следует отметить, что при сборке схемы ГНВ необходимо, чтобы (+) с выпрямителя B был бы подан на зажим $Ш_1$ шунтовой обмотки. В противном случае не замкнутся выключатели $B3$ и $B2$.

4.3. Испытание генератора независимого возбуждения.

4.3.1. Характеристика холостого хода.

Характеристика холостого хода ГНВ (и любого другого) может быть снята в двух квадрантах (первом и третьем) с целью получения полной петли гистерезиса. Но для практических целей ее обычно снимают только в первом квадранте. Заранее должна быть установлена частота вращения ГНВ $n = n_n$. Но поскольку, как уже отмечалось, приводом всех типов генераторов является синхронный двигатель для которого $n = \text{const}$, здесь и в дальнейшем не будем оговаривать условие $n = n_n = \text{const}$.

Поднимают ток возбуждения ГНВ до тех пор, пока напряжение на зажимах генератора U_0 , численно равное ЭДС E , не достигнет значения $U_0 \approx 1,3U_n$. Записав показания U_0 и тока возбуждения i_g , монотонно в одном направлении снижают i_g . При этом целесообразно снижать так ток i_g , чтобы до $U_0 = 0,8U_n$ изменение U_0 происходило бы с интервалом приблизительно равным $0,05U_n$, а после $U_0 = 0,8U_n$ через интервал $0,1U_n$. Таким способом снимают характеристику до тока $i_g = 0$ (нисходящая ветвь). Записав остаточное напряжение $U_{0ост}$ при $i_g = 0$, снова подают питание на обмотку возбуждения и поднимают ток i_g по тем же значениям, при которых снималась нисходящая ветвь характеристики холостого хода до начального исходного значения. Повышение тока i_g также следует проводить монотонно в одном направлении. В результате будет получена восходящая ветвь характеристики холостого хода. Вид этой характеристики показан на рис. 4.3. Напряжение $U_{0ост}$ обычно составляющее $(2 - 5)\% U_n$, обусловлено наличием остаточного потока, который всегда присутствует в любой электрической машине, если ее магнитная цепь не размагничена. По кривой холостого хода может быть определена степень насыщения магнитной цепи генератора. Для этого необходимо провести среднюю между нисходящей и восходящей ветвями

характеристики холостого хода характеристику, а затем, проводя касательную к этой характеристике, определить ток i_e , затрачиваемый на проведение магнитного потока через воздушный зазор и стальные участки. На практике же поступают другим образом. Во-первых, используют только нисходящую ветвь характеристики. Во-вторых, продлевают характеристику до пересечения с осью абсцисс. Затем эту точку ($-i_e$) перемещают до линии $U = U_n$ (точка А). Проводят линию параллельно оси абсцисс. При этом предварительно проводят касательную к начальной части характеристики (прямая линия), означающую затраты тока возбуждения для проведения магнитного потока через зазор. Тогда отрезок АВ (см. рис. 4.3) есть ток возбуждения, необходимый для проведения потока через зазор, а отрезок ВС – ток i_e , необходимый для проведения потока через стальные участки. Очевидно, что коэффициент насыщения

$$K_\mu = \frac{AC}{AB} > 1. \quad (4.1)$$

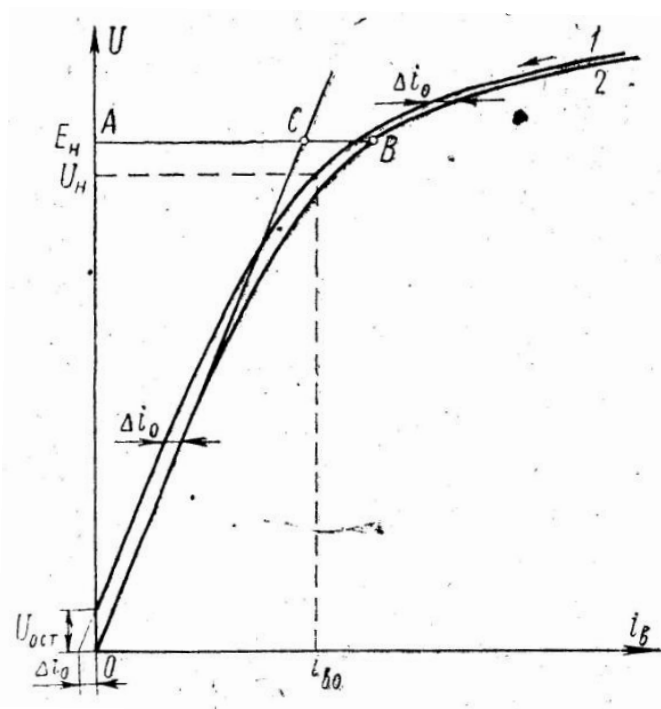


Рис.4.3. Характеристика холостого хода

ГПТ обычно имеют умеренное насыщение и для них $K_\mu = 1,2 - 1,35$. Строго говоря, K_μ следует определять при номинальной ЭДС генератора $E_n = U_n + I_n R_a + \Delta U_{щ}$, где R_a - сопротивление цепи якоря; $\Delta U_{щ} = 2В$ - падение напряжения под щетками. Однако, учитывая малость величин $I_n R_a$ и $\Delta U_{щ}$ по сравнению с U_n , выражение (4.1) вполне справедливо.

Наконец, поскольку в

режиме холостого хода ГПТ $I = 0$, то $U_0 = E = C_e \Phi_\delta n$. Поскольку C_e и n постоянны, то кривая холостого хода в некотором масштабе является магнитной характеристикой ГПТ $\Phi_\delta = f(i_g)$.

При снятии характеристики холостого хода измеряются только напряжение на зажимах генератора U_0 и ток возбуждения i_g .

4.3.2. Нагрузочная характеристика.

Эта характеристика практически представляет собой ту же характеристику холостого хода $U = f(i_g)$, но при постоянном токе нагрузки I , обычно равным $I = I_n$. В процессе опыта добиваются с помощью сопротивления $R_{нг}$, чтобы при максимально возможном токе i_g достигнуть $I = I_n$. Записывают показания приборов (i_g, U, I) , а затем снижают ток i_g примерно на 10% по отношению к току i_g , полученному при $U_{0\max}$ в режиме холостого хода. Так, постепенно снижая ток i_g и поддерживая в каждой точке $I = I_n$, уменьшают ток i_g до тех пор, пока сопротивление $R_{нг}$ не сможет обеспечить условие $I = I_n$. Если нанести на один график характеристику холостого хода и нагрузочную, то последняя пойдет ниже, вследствие падения напряжения в якорной цепи ($I_n R_a$), падения напряжения под щетками ($\Delta U_{щ}$) и размагничивающего действия поперечной реакции якоря (ΔF_{aq}) тем более сильного, чем сильнее насыщена магнитная цепь машины.

Под сопротивлением R_a обычно понимается собственное сопротивление обмотки якоря и последовательно соединенными с ней обмотками добавочных полюсов. Поэтому при расчетах обычно принимают $IR_{a\Sigma} = IR_a + I \cdot 2R_{дп} + 2\Delta U_{щ}$, где $R_{a\Sigma}$ - суммарное сопротивление цепи якоря, $R_{дп}$ - сопротивление добавочных полюсов, $\Delta U_{щ} = 2B$. Такая форма записи в дальнейшем упрощает анализ. Поэтому

будем в нагрузочной характеристике под $I_n R_a$ подразумевать $IR_{a\Sigma}$, также, как и в последующих характеристиках.

Используя характеристику холостого хода и нагрузочную можно построить так называемый характеристический треугольник.

На рис. 4.4. нанесены характеристики холостого хода (кривая 1) и нагрузочная ГНВ (кривая 2). Для построения характеристического треугольника при $U = U_n$ от нагрузочной характеристики откладывают катет $AB = I_n R_a$. Из точки «В» параллельно оси абсцисс до пересечения с характеристикой холостого хода проводят катет BC , который представляет собой размагничивающее действие поперечной реакции якоря ΔF_{aq} в масштабе тока возбуждения. Получившийся треугольник ABC и есть характеристический треугольник. На графике (рис. 4.4) ток возбуждения $i_{вн}$ определяется по нагрузочной характеристике при $U = U_n$. Ток $i_{в\delta}$, отвечающий точке «С» на характеристике холостого хода, есть ток возбуждения

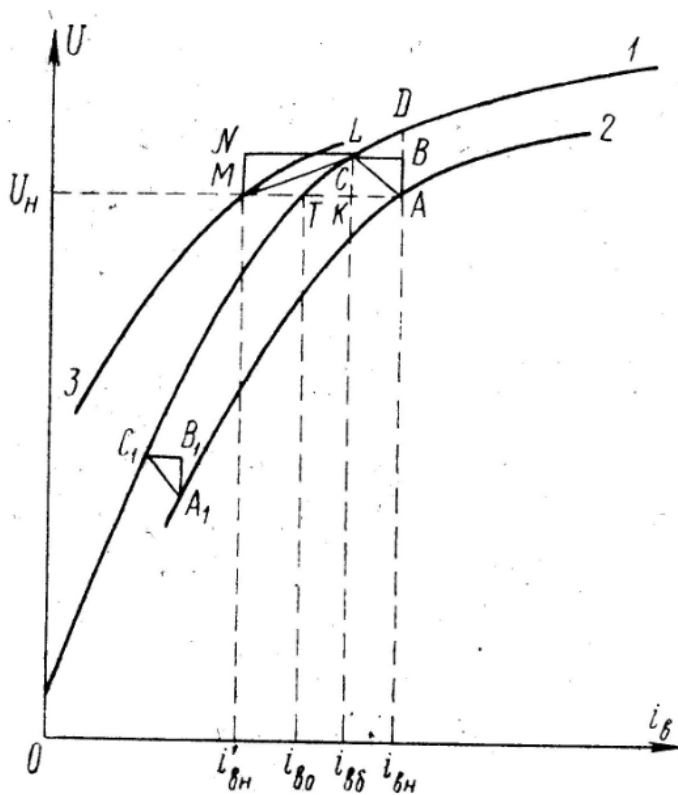


Рис.4.4. Нагрузочная характеристика генератора при независимом и смешанном возбуждении и построении характеристических треугольников

индуцирующий номинальную ЭДС E_n . На этом графике также построен характеристический треугольник $A'B'C'$ при $U < U_n$. При сравнении треугольников ABC и $A'B'C'$ видно, что катет $A'B' = AB$, а катет $B'C' < BC$. Поскольку при снятии нагрузочной характеристики ток $I = I_n = \text{const}$, то и $A'B' = AB = I_n R_a = \text{const}$. Размагничивающее действие реакции якоря

зависит от насыщения магнитной системы. При уменьшении тока i_e (снижении U) насыщение магнитной системы снижается и вместе с ним снижается размагничивающее действие ΔF_{aq} . Поэтому катет $B'C' < BC$. При полном отсутствии насыщения $\Delta F_{aq} = 0$, и нагрузочная характеристика, когда ток i_e и напряжение U малы, будет идти параллельно характеристике холостого хода ниже ее на величину $I_n R_a$.

4.3.3. Внешняя характеристика

Перед снятием внешней характеристики необходимо установить номинальный режим (U_n, I_n, i_{en}), изменяя сопротивление $R_{НГ}$ и регулируя i_a . Очевидно, что при $U = U_n$ и $I = I_n$ ток $i_e = i_{en}$ должен быть равен току i_e , полученному при тех же условиях из нагрузочной характеристики. Установив номинальный режим постепенно разгружают генератор от $I = I_n$ до $I = 0$ с интервалом, примерно, $15\% I_n$,

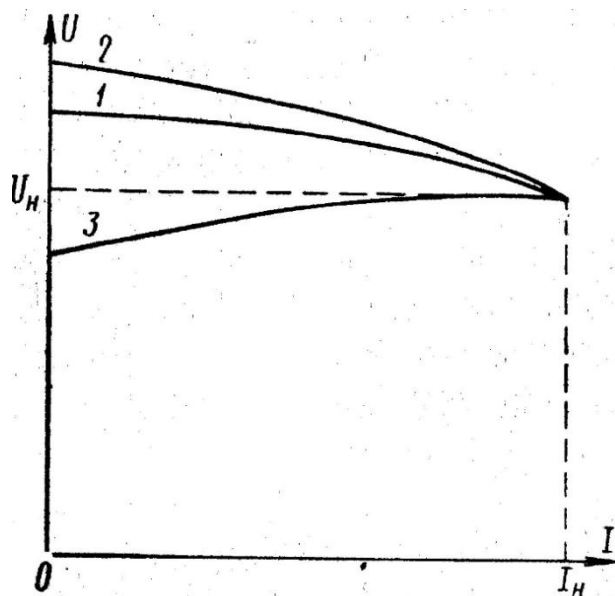


Рис.4.5. Внешние характеристики генератора:
1-при независимом, 2-при параллельном, 3-при смешанном возбуждении

поддерживая в каждой точке $i_e = i_{en}$. В каждой точке измеряют напряжение U , ток I и контролируют ток $i_e = i_{en}$. Со сбросом нагрузки уменьшается падение напряжения в якорной цепи IR_a и размагничивающее действие поперечной реакции якоря ΔF_{aq} , следствием чего будет возрастание напряжения.

На рис. 4.5 изображена внешняя характеристика ГНВ (кривая 1). Из этой характеристики можно определить изменение напряжения генератора при переходе от

номинальной нагрузки к холостому ходу

$$\Delta U = \frac{U_0 - U_n}{U_n} 100\%, \quad (4.2)$$

где U_0 - напряжение генератора при холостом ходе.

4.3.4. Регулировочная характеристика.

Перед снятием характеристики устанавливают номинальный режим работы ГНВ ($U_n, I_n, i_{вн}$) и снимают показания приборов. Затем разгружают генератор от $I = I_n$ до $I = 0$ с интервалом, примерно, $15\% I_n$, регулируя ток i_g так, чтобы в каждой точке напряжение $U = U_n$. Измеряют ток I , ток возбуждения i_g и контролируют напряжение $U = U_n$. По мере

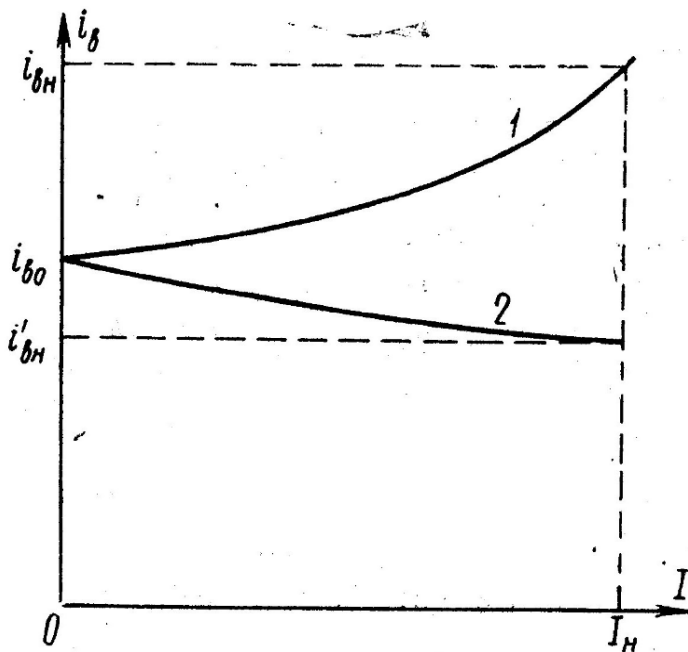


Рис.4.6. Регулировочные характеристики генератора:
1-при независимом возбуждении, 2-при смешанном возбуждении

сброса нагрузки ток i_g будет уменьшаться вследствие снижения падения напряжения в цепи якоря IR_a и размагничивающего действия поперечной реакции якоря ΔF_{aq} . Вид регулировочной характеристики показан на рис. 4.6 (кривая 1).

По этой характеристике можно определить изменение тока возбуждения Δi_g при переходе от номинальной нагрузки до холостого хода

$$\Delta i_{\epsilon} = \frac{i_{\epsilon H} - i_{\epsilon 0}}{i_{\epsilon H}}, \quad (4.3)$$

где $i_{\epsilon 0}$ - ток возбуждения при холостом ходе.

4.4. Испытание генератора параллельного возбуждения.

Внешняя характеристика.

Для ГПрВ обычно снимается только внешняя характеристика. Для ее выполнения необходимо осуществить ряд предварительных операций. Во-первых, необходимо остановить установку, отключив СД от сети. Во-вторых, отсоединить провода, подключенные к нижним клеммам выключателя $B3$ и подсоединить их параллельно обмотке якоря ($D_1 - D_2$). Установить сопротивление в цепи возбуждения генератора на максимальное значение $R_{\epsilon \max}$. После выполнения этих операций снова запустить установку.

Теперь следует проверить правильность включения шунтовой обмотки по отношению к остаточному потоку $\Phi_{ост}$. Если $R_{\epsilon \max}$ достаточно велико, то вольтметр, подключенный к зажимам якоря генератора, покажет напряжение близкое к остаточному $U_{ост}$. С уменьшением R_{ϵ} напряжение на зажимах генератора будет либо нарастать (обмотка возбуждения включена правильно), либо уменьшаться (обмотка возбуждения включена неправильно). В этом случае следует поменять местами провода, подходящие к клеммам $Ш_1$ и $Ш_2$. После проверки правильности подключения шунтовой обмотки можно приступить к снятию внешней характеристики ГПрВ.

Снятие этой характеристики аналогично случаю снятия внешней характеристики для ГНВ, с той лишь разницей, что у ГНВ при постоянстве сопротивления цепи возбуждения $i_{\epsilon} = i_{\epsilon H} = \text{const}$, а здесь, вследствие параллельного соединения якоря и шунтовой обмотки возбуждения, при $R_{\epsilon} = \text{const}$ ток i_{ϵ} по мере снижения нагрузки будет возрастать вследствие

увеличения напряжения на зажимах якоря ($D_1 - D_2$). Возрастание i_e приводит к еще большему увеличению напряжения U и, в конечном итоге, к значительному изменению напряжения ΔU (см. формулу 4.2). Вид внешней характеристики при параллельном возбуждении показан на рис. 4.5 (кривая 2). В процессе снятия внешней характеристики помимо напряжения U и тока I необходимо еще измерять ток i_e с помощью которого можно вычислить сопротивление $R_{цв}$ как

$$R_{цв} = \frac{U}{i_e}. \quad (4.5)$$

4.5. Испытание генератора смешанного возбуждения.

Перед снятием характеристик генератора смешанного возбуждения необходимо остановить установку и сделать ряд пересоединений в схеме (см. рис. 4.2.в). От одного из зажимов якоря (например D_2) отсоединить провод, идущий к шунтовой обмотке. К этому освободившемуся зажиму якоря подсоединить один из концов последовательной обмотки, а к другому концу подключить ранее отсоединенный провод шунтовой обмотки (схема с длинным шунтом). После перебора схемы запускают установку и проверяют правильность включения последовательной обмотки. Для этого на холостом ходу возбуждают ГСмВ до номинального напряжения. Затем замыкают выключатель $B2$ и слегка уменьшают сопротивление $R_{нг}$, что приводит к появлению тока нагрузки. Если при этом напряжение снизится, то последовательная обмотка включена неправильно, и ее поток направлен встречно потоку шунтовой обмотки. В этом случае следует развозбудить ГСмВ, остановить установку и пересоединить последовательную обмотку.

4.5.1. Нагрузочная характеристика

Эта характеристика снимается полностью аналогично таковой для ГНВ, т.е. выставляется $i_e = i_{e\max}$ и при этом токе добиваются с помощью

сопротивления $R_{НГ}$ тока $I = I_n$. Затем с интервалом, примерно, $0,1 i_{g\max}$ снижают ток i_g , поддерживая при этом ток $I = I_n$. Опыт проводят до тех пор, пока сопротивление $R_{НГ}$ обеспечивает условие $I = I_n$. Измеряют ток i_g , напряжение U и контролируют ток $I = I_n$. Вид нагрузочной характеристики ГСмВ показан на рис. 4.4. (кривая 3). Следует отметить, что при сильной последовательной обмотке нагрузочная характеристика ГСмВ идет всегда выше характеристики холостого хода, а если последовательная обмотка недостаточно сильная, эта характеристика в области больших токов i_g может пересекать характеристику холостого хода.

По нагруженной характеристике (3) и характеристике холостого хода строится характеристический треугольник MLN, как и для случая ГНВ. При этом катет $MN > AB$, поскольку теперь в сопротивление якорной цепи R_a добавляется сопротивление последовательной обмотки R_c . Катет NL представляет в масштабе тока возбуждения результирующую МДС обмотки якорной цепи $F_p = F_c - \Delta F_{aq}$. Так как реакция якоря у одного и того же генератора проявляет себя одинаковым образом независимо от способа возбуждения, то МДС последовательной обмотки $F_c = F_p + \Delta F_{aq}$ в масштабе тока возбуждения будет определяться суммой отрезков BC + NL, что, примерно, равно отрезку AM.

4.5.2. Внешняя характеристика

Она снимается аналогично таковой для ГПрВ. Регулируя сопротивление цепи возбуждения $R_{цв}$ и нагрузки $R_{НГ}$ добиваются, чтобы при некотором $R'_{цв} = R_{вн}$ напряжение $U = U_n$ и ток $I = I_n$. В дальнейшем сопротивление $R'_{цв}$ оставляют неизменным. Затем постепенно разгружают ГСмВ с интервалом, примерно $0,15 I_f$ до $I = 0$. Измеряют напряжение U , ток нагрузки I и ток возбуждения i_g . Вид внешней характеристики показан на рис. 4.5 (кривая 3). По формуле (4.2) вычисляют изменение

напряжения ΔU , а по формуле (4.5) определяют величину сопротивления $R'_{цв}$.

4.5.3. Регулировочная характеристика

Эта характеристика снимается аналогично таковой для ГНВ. С помощью сопротивлений $R'_{цв}$ и $R_{НГ}$ устанавливается номинальный режим $(U_n, I_n, i'_{вн})$, а затем снижают нагрузку с интервалом, примерно, $0,15 I_n$ до $I = 0$, поддерживая в каждой точке $U = U_n$. Вид регулировочной характеристики ГСмВ показан на рис. 4.6 (кривая 2). По формуле (4.3) определяют изменение тока возбуждения Δi_e .

4.6. Построение характеристик генератора с помощью характеристических треугольников

Характеристические треугольники вместе с приведенной характеристикой холостого хода дают возможность построить все характеристики генератора при любом способе его возбуждения. Такое построение характеристик используется при расчете и проектировании МПТ, а также при испытании, если по каким-либо причинам не представляется возможным снять эти характеристики опытным путем. Отметим, что указанным способом можно получить только внешние и регулировочные характеристики. Построение нагрузочных характеристик невозможно, поскольку именно из них и характеристики холостого хода определяются сами характеристические треугольники.

Построение характеристики начинается с определения ее точки, соответствующей номинальному режиму генератора, т.е. $U = U_n, I = I_n$. Для этого к характеристике холостого хода пристраивается основной характеристический треугольник ABC или MNL (см. рис. 4.4). Треугольник пристраивается так, чтобы его вершина C (или L) располагалась бы на характеристике холостого хода, а вершина A (или M) – на линии параллельной оси абсцисс, соответствующей $U = U_n$. Как уже

отмечалось ранее, точка А (или М) на оси абсцисс отвечают номинальному току возбуждения $i_{вн}$ при независимом возбуждении (точка А) и $i'_{вн}$ при смешенном возбуждении (точка М).

Приняв допущение, что стороны треугольника изменяются пропорционально току нагрузки ГПТ (что справедливо при неизменном насыщении ГПТ), можно определить другие точки соответствующих характеристик. Для этого измененный треугольник, стороны которого пропорциональны току I должен перемещаться параллельно самому себе так, чтобы его вершина С (или L) находилась на характеристике холостого хода, а вершина А (или М) – на линии, отвечающей условию рассматриваемой характеристики (т.е. одному из условий: $U = U_n$; $i_g = i_{вн}$; $R_{цв} = R_{вн}$).

При этом положении точка А (или М) будет определять на оси ординат величину напряжения, а на оси абсцисс – тока возбуждения.

Рассмотрим далее конкретные указания и рекомендации по построению внешних и регулировочных характеристик ГПТ.

4.6.1. Построение внешних характеристик

При построении внешних характеристик рекомендуется характеристику холостого хода и характеристический треугольник помещать в первом квадранте координатных осей, а внешние характеристики строить во втором квадранте, расположив на оси абсцисс шкалу тока нагрузки генератора I . На рис. 4.9 показано построение характеристик для ГНВ и ГПрВ.

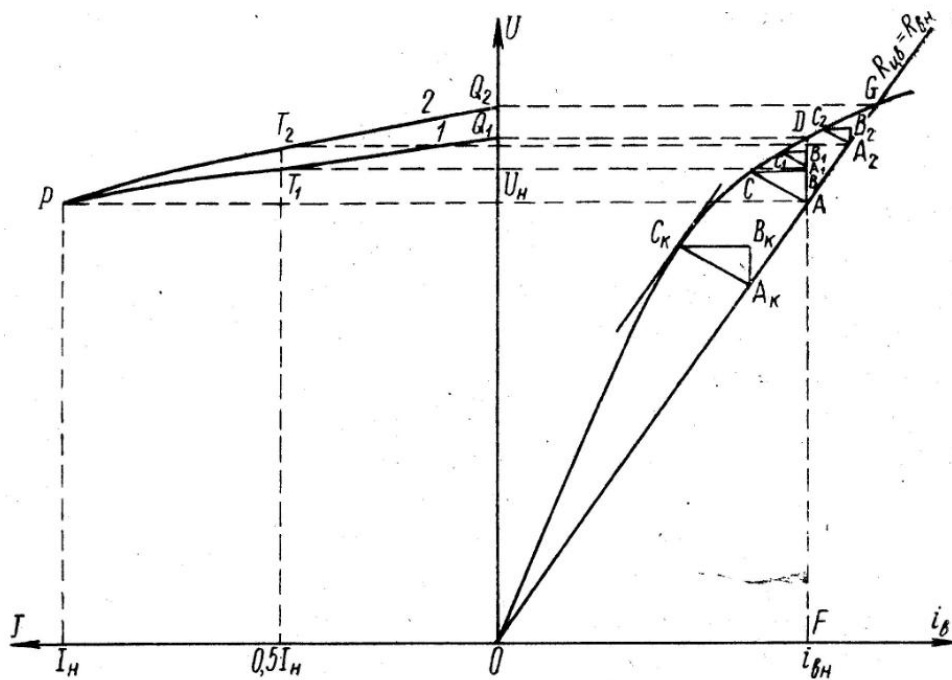


Рис.4.9. Построение внешних характеристик генератора:
1-при независимом возбуждении, 2-при параллельном возбуждении

Вершина А основного треугольника АВС определяет значение напряжения при $I = I_n$ (точка Р внешней характеристики). При независимом возбуждении $i_b = i_{bn}$. Следовательно, вершина А треугольника должна перемещаться по вертикальной линии FD. При $I = 0,5I_n$ стороны треугольника уменьшаются вдвое и он займет положение $A_1B_1C_1$. Вершина A_1 определит точку T_1 внешней характеристики, соответствующую $I = 0,5I_n$. При $I = 0$ треугольник превратится в точку, совмещенную с точкой Д на характеристике холостого хода. Этому случаю отвечает точка Q_1 внешней характеристики.

Внешняя характеристика при параллельном возбуждении соответствует работе ГПрВ с постоянным сопротивлением цепи обмотки возбуждения $R_{ув} = R_{ен}$. Величина этого сопротивления $R_{ув} = \frac{U}{i_b} = \frac{U_n}{i_{bn}}$ на рис.4.9 определяется наклоном прямой OG, проходящей через вершину А основного характеристического треугольника. Эта прямая называется линией номинального сопротивления цепи обмотки возбуждения и на ней при построении внешней характеристики должна находиться

соответствующая вершина треугольника. Так при нагрузке ГПрВ $I = 0,5I_n$ стороны треугольника уменьшаются в два раза и он займет положение $A_2B_2C_2$. Положение вершины A_2 определит точку T_2 внешней характеристики при $I = 0,5I_n$. Если $I = 0$, то треугольник превращается в точку, совмещенную с точкой G на характеристике холостого хода. Этому отвечает точка Q_2 внешней характеристики.

Вид построенных внешних характеристик показан на рис. 4.9, причем кривая 1 относится к ГНВ, а кривая 2 – к ГПрВ.

Из рис. 4.9 видно, что при параллельном возбуждении между характеристикой холостого хода и линией OG может быть расположен наибольший треугольник, соответствующий наибольшему (критическому) току нагрузки. Для построения такого треугольника и определения критического тока необходимо провести касательную к характеристике холостого хода так, чтобы она была параллельна линии OG . Далее их точки касания C_k провести отрезок C_kA_k , параллельный CA до пересечения с прямой OG , и достроить критический треугольник $A_kB_kC_k$. Величина критического тока находится из соотношения

$$I_{кр} = I_n \frac{A_k C_k}{AC}. \quad (4.6)$$

На рис. 4.10 показано построение внешней характеристики ГСмВ.

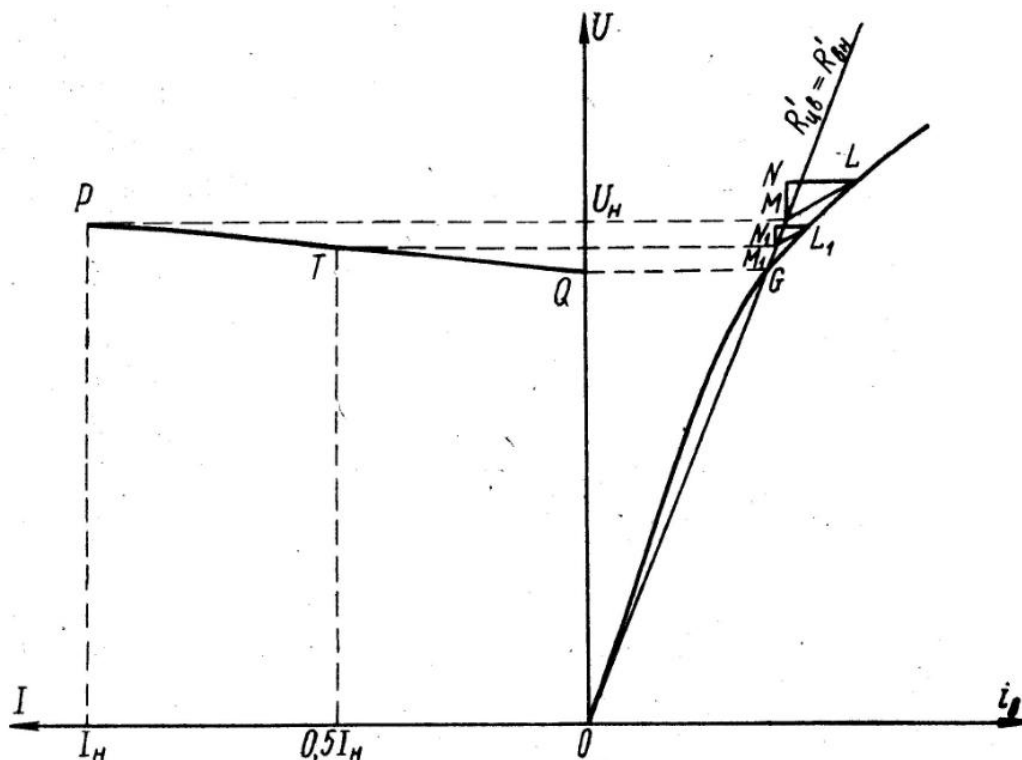


Рис.4.10. Построение внешних характеристик генератора при смешанном возбуждении

Положение вершины М основного характеристического треугольника MNL определяет линию OM постоянного сопротивления цепи возбуждения $R'_{ув} = R'_{вн}$. По этой линии при изменении сторон треугольника будет перемещаться его вершина М. Так, при уменьшении тока генератора до $I = 0,5I_H$ стороны треугольника уменьшатся вдвое и он займет положение $M_1N_1L_1$. Положение вершины M_1 определит точку Т внешней характеристики при $I = 0,5I_H$. Если $I = 0$, то треугольник превращается в точку G на характеристике холостого хода, которой отвечает точка Q на внешней характеристике.

4.6.2. Построение регулировочных характеристик

При построении регулировочных характеристик рекомендуется характеристику холостого хода и характеристический треугольник располагать в первом квадранте координатных осей, а регулировочные характеристики строить в четвертом квадранте, расположив на оси ординат шкалу тока нагрузки генератора I .

На рис. 4.11 показано построение характеристик при независимом и смешанном возбуждении генератора (соответственно кривые 1 и 2).



Рис.4.11. Построение регулировочных характеристик генератора:

1-при независимом возбуждении, 2-при параллельном возбуждении

Построенные описанным выше способом характеристики следует сопоставить с опытными. Для этого на рис.4.9 – 4.11 необходимо нанести характеристики, полученные опытным путем. Степень совпадения опытных и построенных характеристик оценивается как наибольшее расхождение между

ними, выраженное в процентах по отношению к U_n для внешних и i_{e0} для регулировочных характеристик.

4.7. Оценка результатов испытания

1. Отметить основные номинальные данные P_n , U_n , I_n , n_n и номинальные токи возбуждения $i_{вн}$ и $i'_{вн}$ при независимом и смешанном возбуждении.

2. Указать значение тока возбуждения i_{e0} , соответствующему $U = U_n$ в режиме холостого хода, остаточное напряжение генератора, остаточную МДС Δi_0 , ЭДС генератора при номинальной нагрузке E_n и коэффициенте насыщения магнитной цепи генератора K_μ .

3. По внешним и регулировочным характеристикам сопоставить значения ΔU и Δi_e для различных способов возбуждения генератора при изменении его нагрузки от номинальной до холостого хода.

4. По основным характеристическим треугольникам для различных способов возбуждения генератора отметить значения падения напряжения в якорной цепи ΔU_a и $\Delta U'_a$, размагничивающее действие поперечной реакции якоря ΔF_{aq} , МДС последовательной обмотки возбуждения F_c и результирующую МДС обмотки якорной цепи F_p . Сделать вывод о влиянии насыщения магнитной цепи генератора на ΔF_{aq} .

5. Отметить степень совпадения опытных и построенных характеристик.

6. Указать значение критического тока нагрузки генератора при параллельном возбуждении.

Глава 5

Параллельная работа генераторов постоянного тока

5.1. Общие замечания

В ряде случаев целесообразно питать группу ДПТ от нескольких генераторов, подключенных на общие шины. В мощных ГПТ, как правило, используется независимое возбуждение от постороннего источника постоянного тока. В ГПТ малой и средней мощности обычно применяется параллельное возбуждение.

Рассмотрим параллельную работу двух ГПТ параллельного возбуждения. Итак, пусть два ГПТ работают параллельно на общие шины, но при этом один из ГПТ уже подключен к шинам, а второй только следует присоединить. При подсоединении второго ГПТ необходимо выполнить два обязательных условия. 1. Напряжение уже подключенного к общим шинам ГПТ и подсоединяемого должны быть равны. 2. Полярность подключенного и подсоединяемого ГПТ должна быть одинаковой. Только при соблюдении и проверки этих условий (обычно с помощью магнитоэлектрического вольтметра, реагирующего на полярность напряжения постоянного тока) второй ГПТ может быть подключен к общим шинам.

После подключения второго ГПТ следует обратить внимание на ряд особенностей параллельной работы ГПТ. Для наилучших условий параллельной работы оба ГПТ должны нагружаться по возможности равномерно, т.е. пропорционально их номинальным мощностям. Установившийся режим параллельной работы двух ГПТ описывается уравнениями:

$$U = E_1 - I_1 R_1 = E_2 - I_2 R_2; \quad (5.1)$$

$$U = (I_1 + I_2) R_{HG}; \quad (5.2)$$

$$I_{HG} = I_1 + I_2, \quad (5.3)$$

где U – напряжение на общих шинах; E_1, E_2 – ЭДС первого и второго генераторов; $R_1, R_2, R_{нз}$ – сопротивления якорных цепей первого и второго генераторов и эквивалентного сопротивления нагрузки; $I_1, I_2, I_{нз}$ – токи нагрузки генераторов и общих шин.

При параллельной работе ГПТ приходится рассматривать три вопроса: включение генераторов на параллельную работу; работа генераторов на общие шины (при регулировании или без регулирования напряжения); перевод нагрузки с одного ГПТ на другой с последующим отключением разгруженного ГПТ.

Рассмотрим выполнение или несоблюдение перечисленных условий. Несоблюдение первого условия при соблюдении второго вызывает появление недопустимо большого уравнивающего тока в замкнутой через общие шины цепи генератора, равного

$$I_{ур} = \frac{E_1 + E_2}{R_1 + R_2}. \quad (5.4)$$

Несоблюдение второго условия при выполнении первого также приводит к появлению $I_{ур}$ в якорных цепях генераторов, величина которого определяется разностью ЭДС ($E_1 - E_2$). Поскольку сопротивления R_1 и R_2 в ГПТ достаточно малы, то даже при небольшой разнице ($E_1 - E_2$) величина $I_{ур}$ может быть довольно значительной.

Распределение нагрузки между ГПТ будет зависеть от насыщения их магнитной системы, реакции якоря, падения напряжения в якорной цепи и условий воздействия на органы регулирования в цепях возбуждения генераторов.

В эксплуатационных установках приводные двигатели снабжаются регуляторами, обеспечивающими постоянство частоты вращения $n = \text{const}$. В настоящем учебно-лабораторном испытании условие $n = \text{const}$ также соблюдается (см. ниже).

При соблюдении условия $n = \text{const}$ характер распределения нагрузки между ГПТ можно рассматривать для двух возможных режимов

их работы: а) при постоянном напряжении на общих шинах ($U = \text{const}$); б) при неизменном положении органов регулирования в цепях возбуждения генераторов ($R_{\text{це}} = \text{const}$).

В случае (а) для выполнения условия $U = \text{const}$ при изменении нагрузки необходима соответствующая регулировка токов возбуждения генераторов, иными словами, генераторы будут работать в режиме регулировочной характеристики. При этом нагрузка между ними может быть распределена пропорционально их номинальным мощностям. В случае (б) напряжение на общих шинах U не будет оставаться постоянным при изменении нагрузки. Характер его изменения при $R_{\text{це}} = \text{const}$ будет определяться видом внешних характеристик генераторов, т.е. ГПТ будут работать в режиме внешней характеристики. От вида этих характеристик ГПТ зависит распределение нагрузки между ними. Нагрузка между генераторами будет распределяться пропорционально их мощностям только в случае полного совпадения внешних характеристик обоих ГПТ, представленных в относительных единицах.

Из указанных двух режимов совместной работы ГПТ параллельного возбуждения основным является режим регулировочной характеристики, обеспечивающий $U = \text{const}$ на общих шинах и дающий возможность нагружать генераторы в любом желаемом соотношении их номинальных мощностей. Частным случаем регулировочной характеристики является перевод нагрузки с одного генератора на другой. В эксплуатационных условиях это происходит при снижении общей нагрузки до номинального тока одного из ГПТ, и тогда второй может быть отключен.

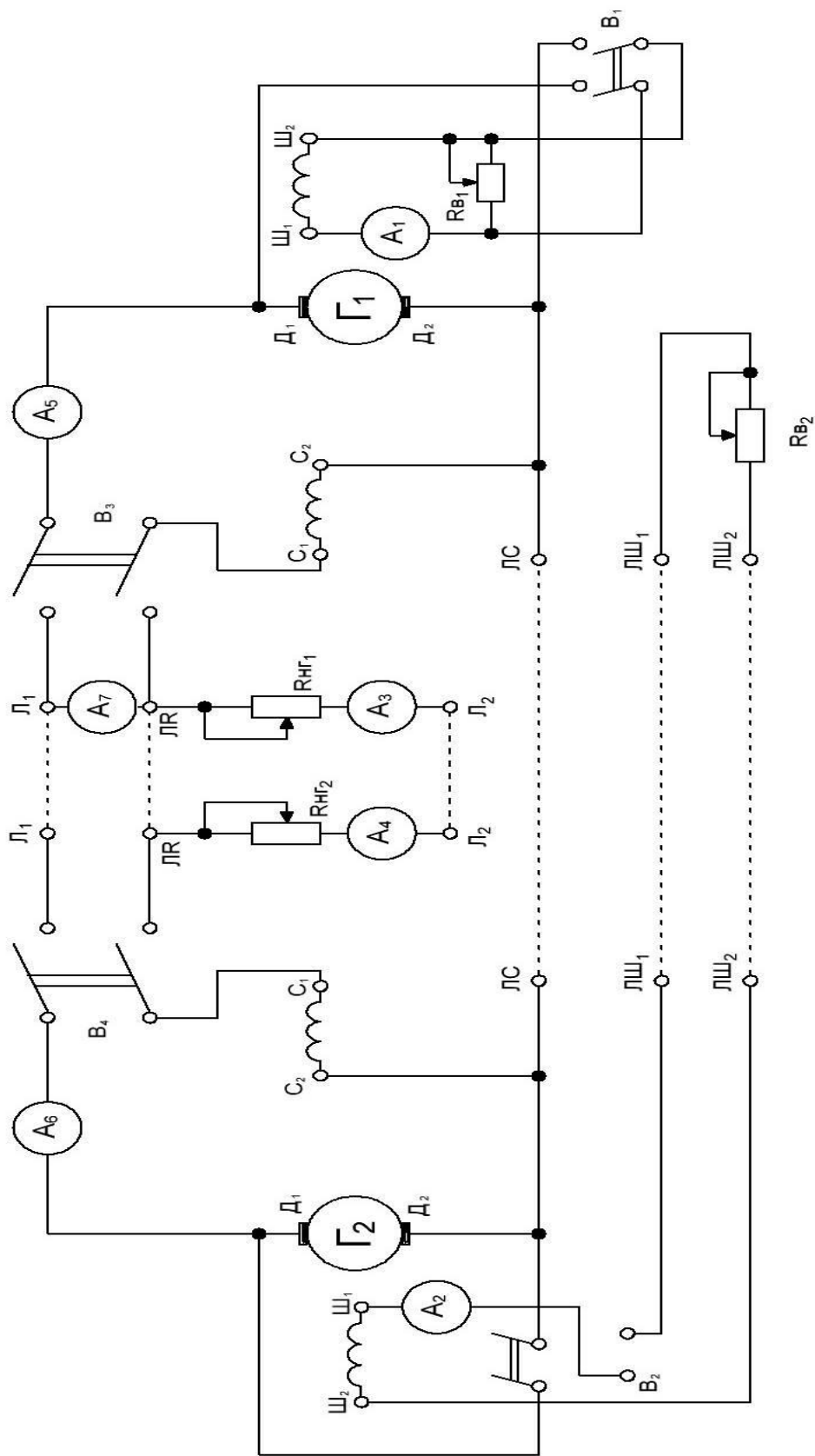


Рис.5.1. Схема испытания параллельной работы ГПТ

5.2. Схема испытания

Параллельная работа ГПТ параллельного возбуждения проводится на тех же установках, что и испытание генераторов постоянного тока, компоновка испытательных стендов которых приведена в гл. 4.

Схема испытания параллельной работы ГПТ показана на рис. 5.1.

На этой схеме амперметры A_1 и A_2 в цепях возбуждения генераторов G_1 и G_2 имеют предел измерения 1А. На такой же ток предусмотрены и регулировочные сопротивления R_{B_1} и R_{B_2} . Амперметры A_3 , A_4 измеряют токи в нагрузочных сопротивлениях и их включение не обязательно. Амперметры A_5 , A_6 измеряют токи нагрузки генераторов G_1 и G_2 с пределом измерения 30А. Наконец, амперметр A_7 измеряет суммарный ток нагрузки обоих генераторов и имеет предел измерения 50А. Вольтметры на предел 300В на схеме не указаны, но они должны быть подключены между зажимами D_1 и C_1 обоих генераторов.

Отметим, что обе установки по испытаниям ГПТ в некоторых цепях уже заранее электрически соединены друг с другом (пунктирные линии на рис.5.1). Выключатель B_1 подсоединяет обмотку возбуждения к зажимам обмотки якоря генератора G_1 . Выключатель B_2 выполняет ту же функцию по отношению к генератору G_2 , но через линию $L_{ш_1} - L_{ш_2}$ позволяет регулировать ток возбуждения генератора G_2 с рабочего места генератора G_1 . Выключатели B_3 , B_4 подключают оба генератора на общую нагрузку. При этом величина нагрузки определяется сопротивлениями $R_{HГ_1}$ и $R_{HГ_2}$. Сначала используют одно из сопротивлений $R_{HГ}$, и если его недостаточно для достижения необходимого тока нагрузки $I_{HГ}$, добавляют второе. Последовательные обмотки ($C_1 - C_2$) предназначены для компенсации падений напряжения в якорных цепях генераторов и размагничивающего действия поперечной реакции якоря. Схема (рис. 5.1) выполнена так, что при правильной ее сборки полярность обоих генераторов совпадает.

Однако, во избежание ошибки в сборке схемы после замыкания выключателя B_3 следует магнитоэлектрическим вольтметром со щупами проверить полярность выключателя B_4 по отношению к B_3 , и при правильной полярности после установки на обоих генераторах равных номинальных напряжений подключить их на параллельную работу.

Наконец, как отмечалось в гл. 4, приводом генераторов является синхронный двигатель, для которого при любой нагрузке частота вращения $n = \text{const}$, поэтому при проведении испытаний параллельной работы генераторов отпадает необходимость контроля за их частотой вращения.

5.3. Параллельная работа генераторов в режиме регулировочной характеристики.

Снятие режима регулировочной характеристики можно производить как на увеличение, так и на уменьшение нагрузки. Поскольку на вид регулировочных характеристик влияние гистерезиса сказывается несущественно, а процесс установки опытных точек при отсутствии навыков регулирования достаточно сложен, то, чтобы не усложнять условия проведения эксперимента обычно проводят опыт по снятию режима регулировочной характеристики на увеличение нагрузки, принимая за исходную точку режима точку холостого хода генераторов. Поэтому еще до включения генераторов на параллельную работу нагрузочные сопротивления $R_{НГ_1}$, $R_{НГ_2}$ должны быть установлены на максимальные величины, чему отвечают соответствующие сигнальные лампочки (см. гл. 4). Тогда после подключения генераторов на параллельную работу получают первую точку регулировочных характеристик генераторов при $I_{НГ} = 0$, при $U = U_n$. Затем, уменьшая сопротивление $R_{НГ_1}$ или $R_{НГ_2}$ добиваются появления в якорных цепях генераторов токов I_1 и I_2 и полного тока нагрузки, измеряемого амперметром A_7 , $I_{НГ} = I_1 + I_2$. Токи I_1 , I_2 вызовут уменьшение напряжения на общих шинах и увеличение нагрузки генераторов. Для

доведения напряжения на шинах до уровня $U = U_n$ необходимо увеличивать токи возбуждения обоих генераторов так, чтобы токи I_1 и I_2 распределялись между генераторами пропорционально их номинальным мощностям. Поскольку в данном исследовании оба генератора однотипны и имеют одинаковую номинальную мощность, токи возбуждения генераторов следует регулировать так, чтобы $I_1 = I_2$. Следует отметить, что при установленном $R_{НГ}$ с увеличением токов возбуждения, т.е. с увеличением напряжения на шинах до U_n , токи I_1 , I_2 и $I_{НГ}$ также будут возрастать. Поэтому в целях получения достаточного количества опытных точек сопротивление $R_{НГ}$ следует уменьшать с относительно малым интервалом. Регулирование токов возбуждения необходимо производить плавно, равномерно и одновременно. Может оказаться так, что после регулирования токов возбуждения будет достигнуто $U = U_n$, но $I_1 \neq I_2$. В этом случае следует увеличивать ток возбуждения в генераторе с меньшим током якоря и уменьшать его в генераторе с большим током, добиваясь $I_1 = I_2$ при $U = U_n$. Так, постепенно нагружая генераторы, снимают 5 – 6

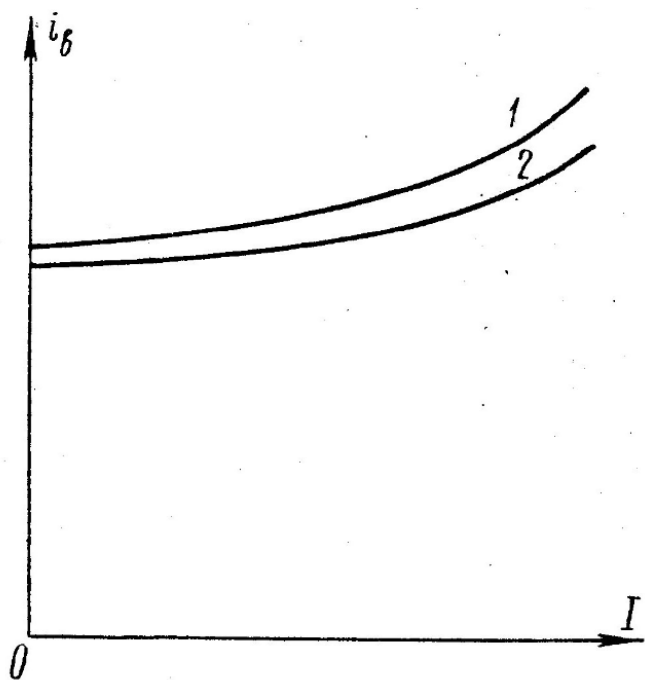


Рис.5.2. Регулировочные характеристики первого (1) и второго (2) генераторов

приблизительно равномерно отстоящих точек до токов $I_{1н} = I_{2н}$. При этом измеряют токи возбуждения $i_{с1}$, $i_{с2}$; якорные токи генераторов I_1 , I_2 ; суммарный ток нагрузки $I_{НГ}$; напряжение на шинах $U = U_n$.

По данным опыта строятся зависимости $i_{с1} = f(I_1)$ и $i_{с2} = f(I_2)$ и определяются $\Delta i_{с1}$ и $\Delta i_{с2}$ (см. гл.4). Вид регулировочных характеристик приведен на рис. 5.2.

Следует отметить, что кривые 1 и 2 на рис. 5.2 при $I = 0$ для одинаковых генераторов могут исходить из одной точки.

5.4. Параллельная работа в режиме внешней характеристики

При параллельной работе генераторов параллельного возбуждения в режиме внешней характеристики установленное ранее положение органов регулирования в их цепях возбуждения должно отвечать условию: $U = U_n$, $I_1 = I_{1n}$, $I_2 = I_{2n}$, $i_{e1} = i_{e1n}$, $i_{e2} = i_{e2n}$. Это означает, что полученные из регулировочных характеристик (см. раздел 5.2) точки, определяемые только что полученными условиями, предполагают $R_{e1} = \text{const}$ и $R_{e2} = \text{const}$. Как известно, внешние характеристики ГПТ представляют собой зависимости $U = f(I)$ при неизменном сопротивлении цепи возбуждения. Следовательно, последняя точка регулировочной характеристики ($U = U_n$, $I_{1n} = I_{2n}$) является первой точкой внешней характеристики. При снятии этой характеристики сопротивления цепей возбуждения генераторов R_{e1} и R_{e2} , установленные при номинальном режиме нагрузки генераторов, должны оставаться неизменными. После отсчета первой точки внешней характеристики (она же последняя на регулировочной характеристике) постепенно увеличивают сопротивление $R_{нг}$. При этом токи нагрузки генераторов будут уменьшаться, напряжение на общих шинах возрастать, а вместе с ним будут возрастать и токи возбуждения обоих генераторов, способствуя, тем самым, еще большему нарастанию напряжения на общих шинах. Для получения 5 – 6 точек внешних характеристик увеличение сопротивления $R_{нг}$ следует производить с небольшими интервалами до полной разгрузки одного из генераторов. В нашем случае, вследствие одинаковости генераторов, они должны достигнуть максимального напряжения при $I_{нг} = 0$ одновременно.

В общем случае сопротивления якорных цепей, размагничивающее действие поперечной реакции якоря и насыщение магнитной системы у

генераторов различные, т.е. в новой точке режима генераторы будут разгружаться неравномерно.

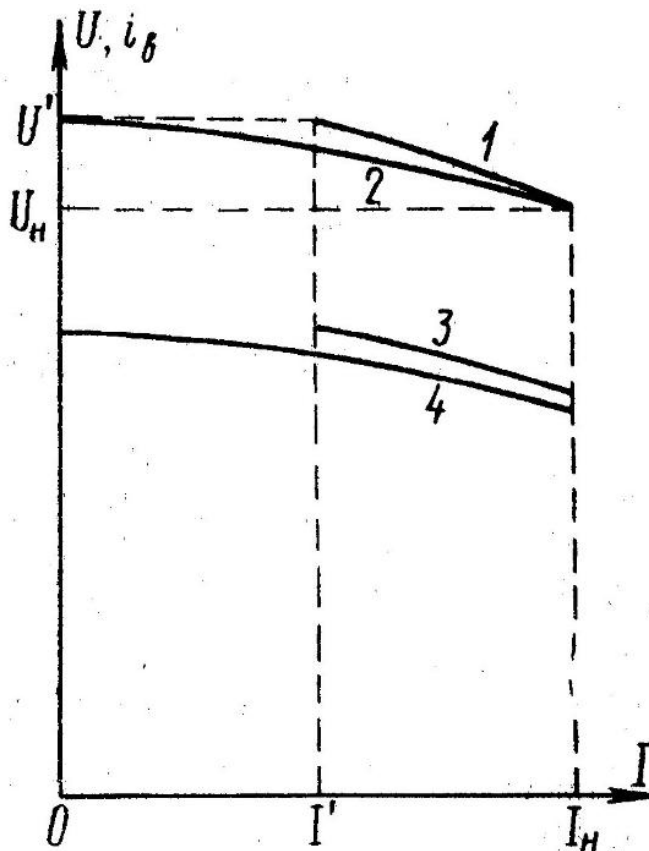


Рис.5.3. Внешние характеристики первого (1) и второго (2) генераторов при совместной работе и зависимости:

$$3 - i_{\delta 1} = f(I_1); 4 - i_{\delta 2} = f(I_2)$$

На рис. 5.3 приведены зависимости $U = f(I_1)$ и $U = f(I_2)$ режима внешней характеристики генераторов.

Здесь же нанесены зависимости $i_{\delta 1} = f(I_1)$ и $i_{\delta 2} = f(I_2)$, которые показывают характер изменения токов $i_{\delta 1}$ и $i_{\delta 2}$ в этом режиме. Из рис. 5.3 видно, что при некотором токе нагрузки $I_{НГ} = I'$ напряжение на шинах $U = U'$ становится равным ЭДС Γ_2 , ток нагрузки которого $I_2 = 0$. При дальнейшем уменьшении нагрузки напряжение на общих шинах становится

больше ЭДС Γ_2 и ток I_2 меняет знак, что приводит к переходу этого генератора в двигательный режим (см. раздел 5.1).

В процессе опыта внешней характеристики измеряют напряжение на общих шинах U ; токи $I_{НГ}$, I_1 , I_2 ; токи возбуждения $i_{\delta 1}$, $i_{\delta 2}$.

5.5. Перевод нагрузки

При проведении опыта перевода нагрузки с одного генератора на другой определяются зависимости: $i_{\delta 1} = f(I_1)$, $i_{\delta 2} = f(I_2)$, $I_1 = f(I_2)$ при $U = U_n$, $n = n_n$, $I_{НГ} = \text{const}$. Первые две характеристики демонстрируют,

как надо регулировать токи возбуждения генераторов i_{e1} , i_{e2} , чтобы обеспечить постоянство заданных величин U и $I_{НГ}$. Зависимость $I_1 = f(I_2)$ определяет закон изменения тока одного генератора при изменении тока другого генератора в условиях правильного перевода нагрузки. Поскольку, как уже отмечалось, перевод нагрузки есть частный случай режима регулировочной характеристики, то из него проясняется принцип регулирования токов i_{e1} и i_{e2} . Перераспределение токов I_1 и I_2 с соблюдением требований $U = U_n$ и $I_{НГ} = \text{const}$ осуществляется путем уменьшения тока i_{e1} разгружаемого генератора при одновременном согласованном увеличении тока i_{e2} нагружаемого генератора так, чтобы требования $U = U_n$ и $I_{НГ} = \text{const}$ соблюдались неукоснительно. При этом изменения токов i_{e1} и i_{e2} следует производить относительно малыми дозами, с тем чтобы получить 5 – 6 точек отсчета с примерно одинаковыми интервалами.

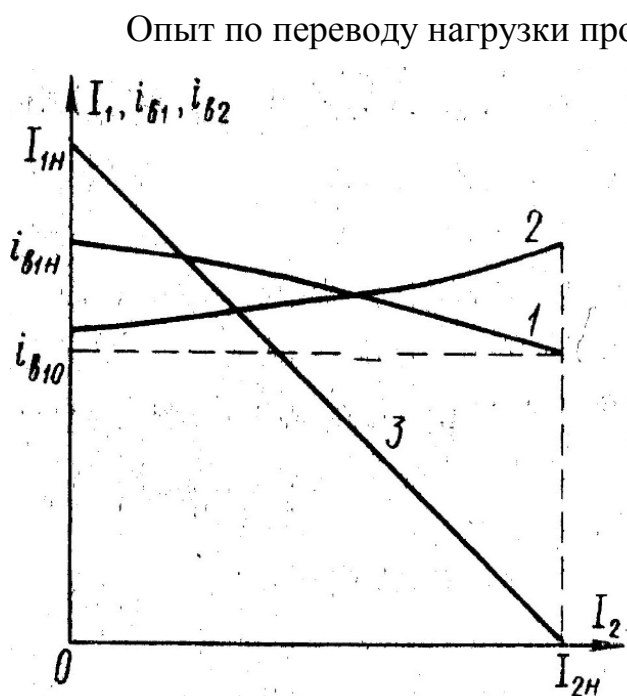


Рис.5.4. Характеристики генераторов при переводе нагрузки с первого генератора на второй:

$$1 - i_{e1} = f(I_2); \quad 2 - i_{e2} = f(I_2); \\ 3 - I_1 = f(I_2)$$

Опыт по переводу нагрузки проводят следующим образом. Один из генераторов (например Γ_1) нагружают до номинального режима ($I_1 = I_{1n}$, $U = U_n$, $i_{e1} = i_{e1n}$). Соблюдая все условия включения на параллельную работу, на общие шины на холостом ходу подключается второй генератор (Γ_2). При этом производится первый отсчет ($I_1 = I_{1n}$, $I_2 = 0$). Затем уменьшается ток i_{e1} и одновременно увеличивается ток i_{e2} так, чтобы часть нагрузки (15 – 20 % I_{1n}) перешла на второй

генератор при соблюдении заданных условий ($U = U_n, I_{HG} = \text{const}$). Таким образом производится разгрузка генератора Γ_1 до $I_1 = 0$ и нагрузка генератора Γ_2 до $I_2 = I_{2н}$. В процессе опыта измеряются токи $I_1, I_2, I_{HG} = \text{const}$, токи возбуждения i_{e1}, i_{e2} и напряжение $U = U_n$. По результатам измерений строятся зависимости, изображенные на рис. 5.4. По графикам (рис. 5.4) находят пределы регулирования токов возбуждения $\Delta i_{e1}, \Delta i_{e2}$, которые обеспечивают требуемый режим при переводе нагрузки.

Пределы регулирования находятся как разность токов возбуждения конечного и начального режимов перевода нагрузки, отнесенная к току возбуждения, соответствующему холостому ходу генератора. Так

$$\text{для генератора } \Gamma_1 \quad \Delta i_{e1} = \frac{i_{e10} - i_{e1н}}{i_{e10}}, \quad (5.5)$$

$$\text{для генератора } \Gamma_2 \quad \Delta i_{e2} = \frac{i_{e2н} - i_{e20}}{i_{e20}}. \quad (5.6)$$

5.6 Оценка результатов испытания

Для оценки результатов испытания необходимо привести значения K_μ, F_{aq} и ΔU_a , полученные по данным гл. 4 для каждого из испытываемых генераторов.

По режиму регулировочной характеристики определяются пределы регулирования $\Delta i_{e1}, \Delta i_{e2}$ и дается оценка влияния $K_\mu, F_{aq}, \Delta U_a$ на вид характеристик. Отмечается влияние этих параметров на Δi_e .

По режиму внешней характеристики определяется величина тока нагрузки I' в Амперах и относительных единицах одного тора при полной нагрузке другого и величина напряжения U' , соответствующего этой точке. При этом следует отметить влияние K_μ, F_{aq} и ΔU_a на крутизну внешних характеристик.

По опыту перевода нагрузки можно оценить пределы регулирования токов возбуждения Δi_{e1} , Δi_{e2} и отметить влияние K_{μ} , F_{aq} , ΔU_a на расхождение этих величин.

В заключение отметим, что исследование параллельной работы ГПТ можно производить и при независимом возбуждении, для чего только следует переключить цепи возбуждения генераторов с параллельного возбуждения на независимые источники постоянного тока. При независимом возбуждении все испытания параллельной работы ГПТ осуществляются проще, поскольку токи возбуждения генераторов не зависят от напряжения на общих шинах.

Глава 6

Потери и коэффициент полезного действия в машинах постоянного тока

6.1. Общие соображения

Коэффициент полезного действия (КПД) характеризует экономичность преобразования энергии в электрической машине и является важным энергетическим показателем ее эксплуатационных свойств. КПД можно представить выражением

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}, \quad (6.1)$$

где P_2 - полезно используемая вторичная мощность, P_1 - первичная подведенная мощность.

Мощность P_2 в МПТ может быть определена как разность

$$P_2 = P_1 - \sum p, \quad (6.2)$$

где $\sum p$ - сумма потерь мощности в МПТ.

Рассмотрим, какие же потери мощности происходят в МПТ и поясним их физическую природу.

1. *Магнитные потери* (p_{me}). Эти потери проявляются в сердечнике якоря МПТ и обусловлены пересечением вращающегося якоря постоянного магнитного потока возбуждения. В результате в листах сердечника якоря МПТ наводятся вихревые токи и, кроме того, происходит перемагничивание самого сердечника (гистерезис). В итоге в сердечнике якоря проявляются магнитные потери, обусловленные вышеназванными факторами и, в общем пропорциональные квадрату магнитной индукции в сердечнике якоря и частоте перемагничивания f^k ,

определяемой частотой вращения якоря n . Обычно, в зависимости от соотношения потерь на вихревые токи и гистерезис $k = 1,2 - 1,5$. Понятно, что потери $P_{мг}$ будут тем больше, чем больше магнитная индукция и частота вращения n .

2. *Электрические потери ($p_{эл}$)*. Эти потери вызваны протеканием электрического тока по обмоткам МПТ и определяются квадратом тока и сопротивлениями обмоток. Наибольшее значение эти потери имеют в обмотке якоря, вследствие большого по величине тока якоря, несмотря на относительно малое сопротивление якорной цепи, включающее в себя собственное сопротивление обмотки якоря R_a , сопротивления добавочных полюсов $2R_{д.п.}$ и сопротивление последовательной обмотки R_c , если она предусмотрена. Потери в обмотке возбуждения при достаточно высоком ее сопротивлении относительно малы, поскольку величина тока возбуждения в МПТ не превышает (2 – 5)% от номинального тока якоря. При этом, чем больше мощность МПТ, тем меньше относительная величина тока возбуждения.

3. *Механические потери ($p_{мх}$)*. Этот вид потерь тесно связан с частотой вращения якоря МПТ, а точнее, прямо пропорционален ей. Сами потери вызываются механическим трением в подшипниках, щеточном аппарате, трением якоря о воздух и т.п. Следует отметить, что потери на трение якоря о воздух существенно зависят от схемы вентиляции МПТ. В частности, они возрастают при нагнетательной системе вентиляции, когда воздух поступает в объем МПТ при повышенном давлении. Нетрудно заметить, что механические потери будут тем больше, чем больше n .

4. *Добавочные потери ($P_{доб}$)*. Эти потери обусловлены различными явлениями электромагнитного характера. В частности, пульсациями магнитного потока из-за зубчатости якоря и другими причинами. В МПТ малой и средней мощности $P_{доб}$ обычно рассчитывают и принимают равными $(0,005 - 0,01)P_n$. Причем большая цифра отвечает МПТ большей мощности.

Таким образом

$$\sum p = p_{me} + p_{эл} + p_{мх} + p_{доб}, \quad (6.3)$$

и тогда КПД можно определить по выражению

$$\eta = \frac{P_1 - \sum p}{P_1} \quad (6.4)$$

КПД может определяться в общем двумя существенно различными способами: непосредственным и косвенным.

Метод непосредственного определения КПД основан на том, что тем или иным способом определяются подводимая мощность P_1 и полезная отдаваемая P_2 . Тогда КПД может быть вычислен по (6.1). Однако этот метод, особенно для машин большой мощности, когда P_1 и P_2 оказываются соизмеримыми, является не совсем точным. Поэтому ГОСТом 11826-75 для МПТ, имеющих КПД более 70% рекомендуется применять только косвенные методы его определения, когда определяется одна из мощностей (P_1 или P_2) и потери (в сумме или по отдельности). Возможно также измерение только потерь без измерения мощностей.

К косвенным методам определения потерь относятся метод отдельных потерь и метод взаимной нагрузки.

Прежде чем останавливаться на анализе этих методов отметим следующее обстоятельство. Поскольку потери в обмотках электрических машин в общем зависят не только от режима работы, но и от температуры, то для возможности сравнения различных машин друг с другом при определении КПД косвенным методом принято приводить потери к некоторой условной (расчетной) температуре. Так, например, для машин с изоляцией классов А, Е и В расчетная температура принята равной 75°C , а для классов F и H - 115°C . отметим, что изоляция класса H обычно не применяется для изоляции обмоток электрических машин, поскольку имеют твердую структуру (фторопласт, стекло, фарфор и т.п.). Наиболее распространены изоляции класса В с максимально допустимой температурой $\theta_{дон} = 130^\circ\text{C}$ и класса F с $\theta_{дон} = 155^\circ\text{C}$.

Самым точным методом расчета КПД является метод отдельных потерь для электрической машины любого типа. Он дает представление не только о величине КПД и о сумме потерь, но и о составляющих этой суммы, о чем было сказано выше. При этом методе затрачивается минимальная мощность в процессе проведения экспериментов. Большим достоинством этого метода является то, что для проведения опытов достаточно иметь только испытываемую машину, либо испытываемую машину и вспомогательный двигатель. При этом в качестве вспомогательного двигателя может быть использован двигатель, имеющий ту же частоту вращения, что и у испытываемой МПТ, а его мощность должна быть несколько выше мощности суммы потерь испытываемой МПТ и вспомогательного двигателя (приблизительно (15 – 20)% от номинальной мощности испытываемой МПТ). Этот метод позволяет определить все составляющие выше названных потерь, о чем будет сказано ниже.

Метод взаимной нагрузки, как правило, применяется в мировой практике для определения КПД мощных электрических машин – не только МПТ, но и, например, мощных синхронных машин, в частности, турбогенераторов, в целях проверки расчетного и реального КПД. Согласно этому методу для осуществления взаимной нагрузки помимо испытываемой машины требуется машина соизмеримой (практически одинаковой) мощности. При проведении эксперимента исследуемая машина эксплуатируется в режиме двигателя и вращает вспомогательную машину, работающую в режиме генератора. Вся мощность, вырабатываемая вспомогательным генератором, поступает обратно в силовую цепь испытываемого двигателя, покрывая расход на ее преобразование. Недостающая же часть мощности, которая тратится на компенсацию потерь двигателя, поступает из сети и фиксируется измерительными приборами.

При проведении названного эксперимента нагрузки обеих машин оказываются близки к нормальным условиям эксплуатации, и чем выше температура обмоток машин будет к расчетной (например 75°С), тем точнее будет определен КПД. Однако, поскольку установившаяся температура обмоток машины зависит от многих факторов, то опыты, проведенные в разное время, могут дать различные результаты.

Приведение же КПД к расчетной температуре при определении методом взаимной нагрузки фактически невозможно.

6.2. Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка по определению потерь и КПД машины постоянного тока (далее МПТ) включает в себя две МПТ одинаковой мощности и два тахогенератора (далее ТГ).

На рис. 6.1 представлена компоновка испытательного стенда. На рис. 6.2 дана схема испытаний. В правой части стенда показан источник питания постоянного тока (ИПТ), подключенного к сети переменного тока через выключатель $B3$. Следует отметить, что включение $B3$ возможно в положении U_{\min} , о чем сигнализирует соответствующая лампочка.

Слева внизу изображены МПТ – 1 и МПТ – 2, а выше, относящиеся к ним шунтовые ($Ш_1 - Ш_2$) и серийные ($C_1 - C_2$) обмотки. Здесь же внизу расположены ТГ – 1 и ТГ – 2, соединенные с вольтметром n , шкала которого градуирована в об/мин. В процессе эксперимента один из ТГ отключается. Здесь же слева показаны два амперметра на предел 1,5 А, включаемые в цепи шунтовых обмоток МПТ. Выше указано сопротивление R_c , вводимое в цепь якоря МПТ, работающей в двигательном режиме.

В центре стенда изображен пусковой реостат. Рядом справа размещены выключатели $B2$ (соединяющий генератор и двигатель в опыте взаимной нагрузки) и $B1$ (подающий питание на двигатель).

Выключатель $P_{ш}$ предназначен для шунтирования амперметра A_1 .

Вверху стенда размещены измерительные приборы. Амперметры A_2 и A_3 имеют предел 30 А, амперметр A_1 - 10 А. Вольтметр V_2 рассчитан на предел 300 В. Вольтметр n проградуирован до 1500 об/мин. Здесь же располагается кнопка аварийного отключения АВ, обесточивающая силовые цепи и схему управления.

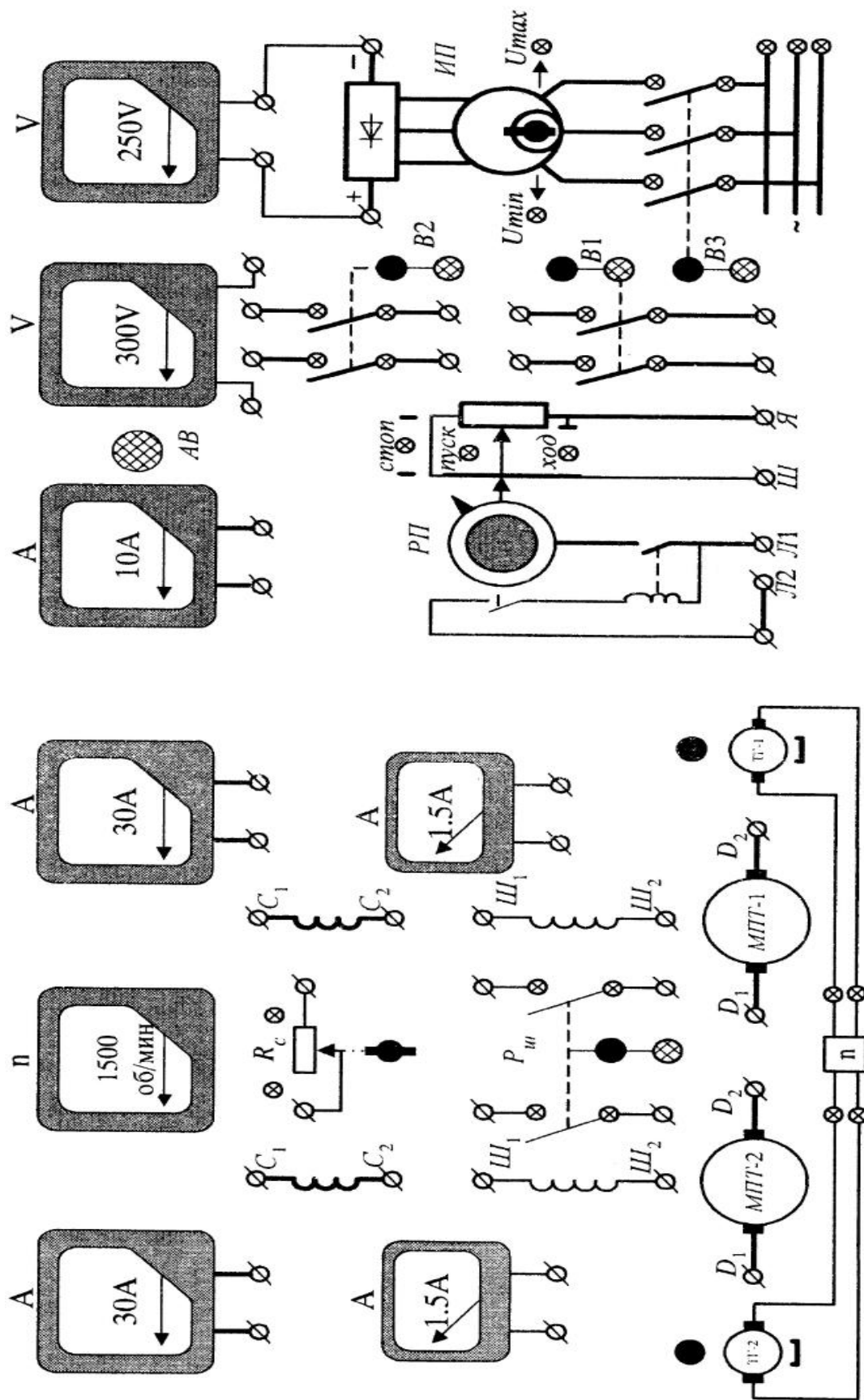


Рис.6.1. Компановка испытательного стенда

6.3. Схема испытаний

На рис. 6.2 приведена схема испытаний МПТ по определению потерь и КПД. Схема является универсальной, позволяющей определять КПД по методам взаимной нагрузки, вспомогательного (тарированного) двигателя и способом вращения ненагруженного двигателя. Только в последнем опыте вольтметр V_2 следует отключить от выводов генератора и подсоединить его к клеммам D_1 и C_1 двигателя. На схеме показано независимое возбуждение генератора. Амперметры A_{e1} и A_{e2} измеряют токи возбуждения генератора и двигателя соответственно. Амперметр A_1 измеряет добавочный ток, потребляемый из сети, при взаимной нагрузке, или же ток якоря двигателя при других способах испытаний. При пуске двигателя этот амперметр во избежание повреждения должен быть зашунтирован. Амперметры A_2 и A_3 измеряют токи в цепях двигателя и генератора соответственно. Вольтметр V_2 измеряет напряжение на зажимах генератора. Вольтметр V_3 магнитоэлектрической системы на предел 300 В со щупами предназначен для проверки правильности включения на параллельную работу генератора и двигателя (см. гл. 5) при взаимной нагрузке. Вольтметр V_k показывает подводимое к двигателю напряжение. Сопротивление R_c служит для регулирования напряжения на зажимах двигателя.

При испытаниях по методу взаимной нагрузки генератор может иметь как независимое, так и параллельное возбуждение. При независимом возбуждении проведение опыта проще, так как ток возбуждения генератора не зависит от напряжения на зажимах якоря, как это имеет место при параллельном возбуждении.

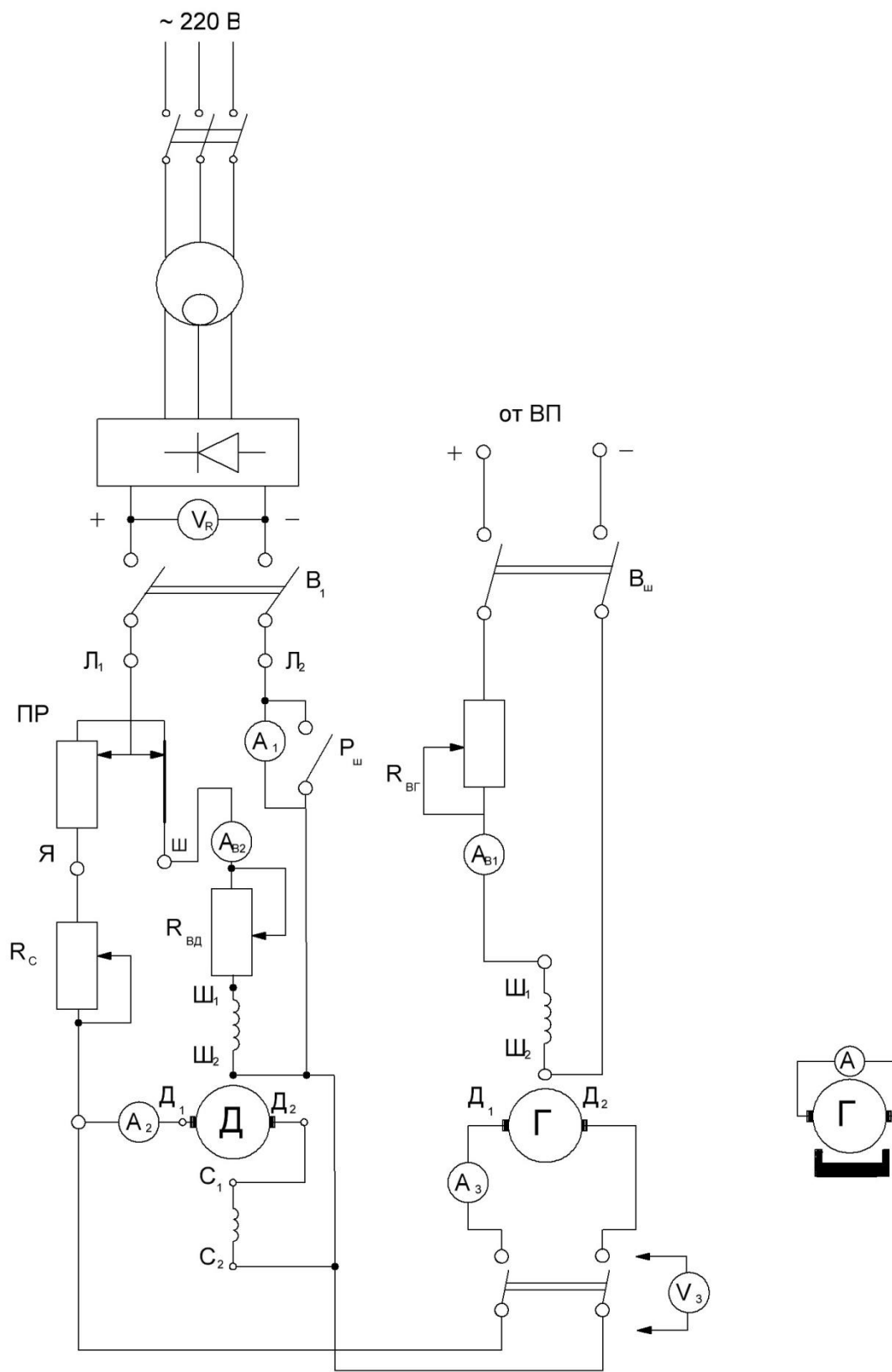


Рис.6.2. Схема испытаний МГТ по определению потерь и КПД

6.4. Определение КПД методом взаимной нагрузки

Метод взаимной нагрузки состоит в том, что две одинаковые по своим паспортным данным МПТ сопрягаются механически на одном валу, а их якорные цепи соединяются так, что при работе одной из МПТ в режиме двигателя другая работает в режиме генератора и отдает всю вырабатываемую полезную мощность первой машине. Естественно, что из-за наличия потерь в двигателе и генераторе полезная мощность генератора меньше мощности, подводимой к двигателю, на сумму потерь в обеих МПТ агрегата. Добавочная мощность для покрытия этих потерь может подводиться к агрегату электрическим путем, механическим или же электрическим и механическим одновременно. Проще всего обеспечить подведение добавочной мощности электрическим путем. При этом МПТ, которая работает двигателем, подключается к сети постоянного тока, а генератор подключается параллельно двигателю. Такая схема включения МПТ называется схемой взаимной нагрузки с добавочным питанием от сети (см. рис. 6.2). В данном случае сопротивление R_c служит для поддержания постоянства напряжения U , питающего установку. Амперметр A_1 после расшунтирования по окончании пуска измеряет добавочный сетевой ток I_c , величина которого определяется суммарными потерями двигателя и генератора. Обычно при КПД испытуемых машин более 80 % $I_c \leq 0,4I_n$. Перед пуском сопротивления R_c и $R_{ВД}$ должны быть полностью выведены, т.е. величины R_c и $R_{ВД}$ должны быть равны нулю, а сопротивление $R_{ВГ}$ полностью введено, т.е. $R_{ВГ} = R_{ВГ \max}$.

Запустив агрегат с помощью ПР, сопротивлениями R_c устанавливают номинальное напряжение двигателя $U = U_n$, а сопротивлением $R_{ВД}$ - номинальную частоту вращения агрегата. Расшунтируют амперметр A_1 . Сопротивлением $R_{ВГ}$ устанавливают номинальное напряжение генератора. Затем с помощью вольтметра V_3 (см. рис. 6.2) проверяют равенство напряжений двигателя и генератора и их полярность. Если все правила параллельной работы МПТ соблюдены

(см. гл. 5), то замыкают B_2 , и схема становится готовой к проведению эксперимента.

Опыт начинают с установки номинальной точки. Поскольку ток якоря двигателя I_D больше тока I_G , то машины следует нагружать до тех пор, пока $0,5(I_D + I_G) = I_n$. Если после включения B_2 сопротивлением R_{BG} увеличить ток $i_{\text{вд}}$, то ЭДС генератора станет больше напряжения U , что вызовет появление тока $I_G > 0$ и увеличение тока двигателя до значения $I_D = I_G + I_c - i_{\text{вд}}$. Увеличение токов I_D , I_G при неизменном положении сопротивлений R_c и R_{BD} приводит к снижению напряжения U и частоты вращения агрегата. Для поддержания $U = U_n$ необходимо уменьшить сопротивление R_c , а затем уменьшением тока $i_{\text{вд}}$ восстановить $n = n_n$. Естественно, что при регулировании напряжения и частоты вращения будет меняться и ток якорной цепи генератор – двигатель. Поэтому все регулировочные операции при установке номинальной точки и проведении опыта необходимо проводить плавно и осторожно. Начинать изменение нагрузки следует с изменения тока $i_{\text{вд}}$, производя его малыми дозами.

В процессе эксперимента необходимо таким образом регулировать нагрузку генератора, чтобы при изменении тока генератора от наибольшего значения до нуля получить 5 – 6 примерно равно отстоящих точек. При этом измеряют токи I_D , I_G , I_c , $i_{\text{вд}}$, $i_{\text{вг}}$, контролируя $U = U_n = \text{const}$ и $n = n_n = \text{const}$.

По измеренным данным следует определить коэффициент нагрузки

$$K_{HG} = \frac{0,5(I_D + I_G)}{I_n}. \quad (6.5)$$

По опыту взаимной нагрузки КПД может быть подсчитан двумя различными способами. В основу каждого из них заложено приближенное предположение, которое, однако, обеспечивает достаточную точность в определении КПД.

Первый способ основан на допущении, что КПД обеих МПТ агрегата при любой нагрузке равны друг другу. В этом случае $\eta_{Г} = \eta_{Д} = \sqrt{\eta_{аэ}}$, где $\eta_{Г}$, $\eta_{Д}$, $\eta_{аэ}$ - соответственно КПД генератора, двигателя и агрегата. Тогда

$$\eta_{Г} = \eta_{Д} = \sqrt{\frac{I_c}{I_{Г} + I_c}}. \quad (6.6)$$

Второй способ основан на допущении равенства суммарных потерь генератора и двигателя ($\sum p_{Г} = \sum p_{Д}$). В этом случае для генератора параллельного возбуждения

$$\eta_{Г} = 1 - \frac{I_c}{I_{Д} + I_{Г} + I_c - i_{вд}}. \quad (6.7)$$

Если же рассчитывается КПД двигателя параллельного возбуждения, то

$$\eta_{Д} = 1 - \frac{I_c}{I_{Д} + I_{Г} + I_c + 2i_{вэ}}. \quad (6.8)$$

Следует отметить, что формулы (6.7, 6.8) справедливы и в случае независимого возбуждения, только в (6.8) необходимо исключить $2i_{вэ}$ в знаменателе, поскольку цепь возбуждения генератора питается от постороннего источника.

Расчет КПД необходимо вести с точностью до четвертого знака значащих цифр (например, 84,56%). Вычисление КПД по (6.6) дает приемлемые результаты при нагрузке близкой к номинальной. Допущение равенства потерь двигателя и генератора оказывается довольно близким к действительности, и погрешность вычисления КПД по (6.7, 6.8) в

диапазоне изменения нагрузки от 0,25 до 1,25 P_n лежит в пределах допуска, указанного в ГОСТе 183-74.

На рис. 6.3 приведены зависимости $\eta = f(K_{нг})$, рассчитанные по двум ранее указанным методикам.

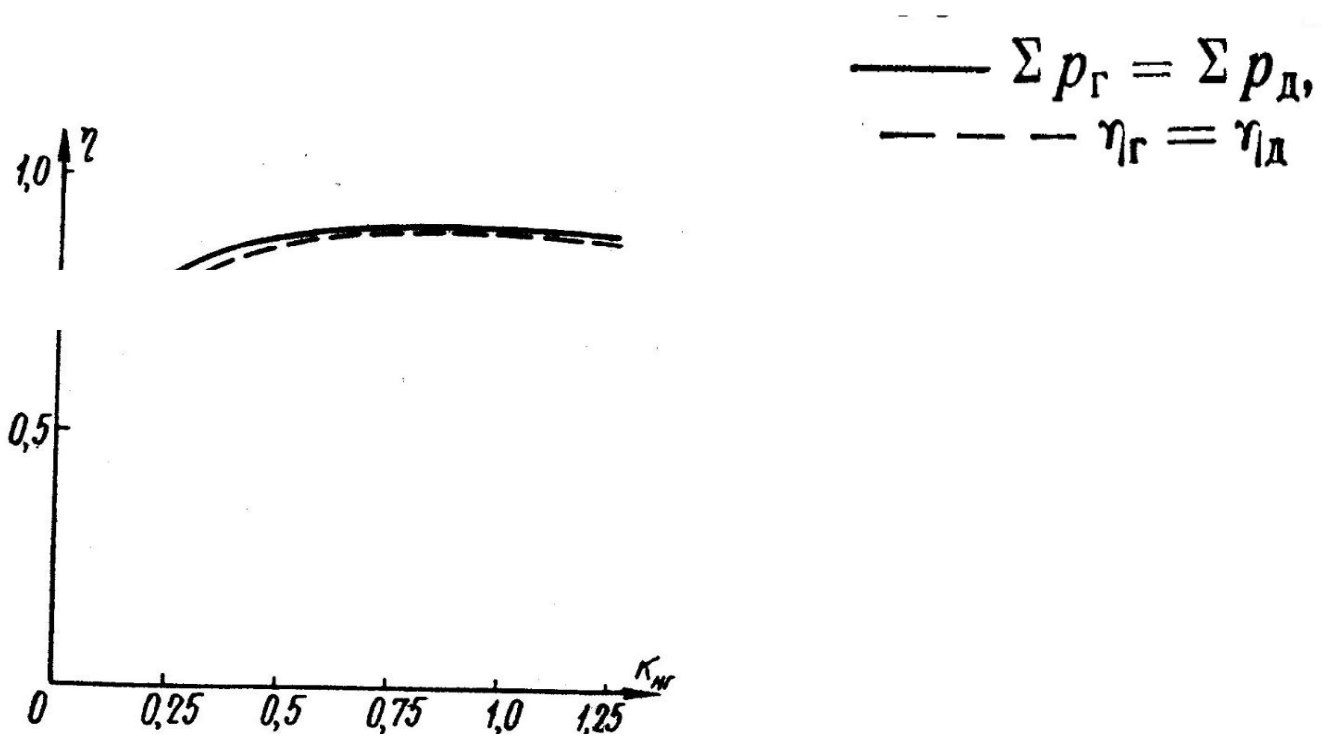


Рис.6.3. Зависимость КПД от коэффициента нагрузки

6.5. Способ вспомогательного (тарированного) двигателя

При определении КПД способом вспомогательного двигателя опытным путем находят магнитные потери $p_{ме}$ (или, что тоже самое – потери в стали $p_{ст}$) и механические потери $p_{мх}$. Для вычисления этих потерь проводят три опыта:

1. Вращение возбужденной испытуемой МПТ.
2. Вращение невозбужденной испытуемой МПТ.
3. Холостой ход (тарирование) вспомогательного двигателя.

Все перечисленные опыты проводятся по схеме (рис. 6.2) при отключенном B_2 и независимом возбуждении. Только для возможности измерения напряжения U_D между зажимами D_1 и C_1 двигателя необходимо включить вольтметр, например V_3 . Ток, потребляемый из сети, в данном случае измеряется амперметром A_1 . Испытуемой МПТ является генератор.

При проведении всех опытов необходимо поддерживать постоянными те потери вспомогательного двигателя, которые не могут быть определены расчетным путем. Это потери в стали $p_{стд}$ и механические потери $p_{мхд}$ двигателя. Обеспечение $p_{стд} = \text{const}$ осуществляется постоянством тока $i_{вд} = \text{const}$. С помощью сопротивления R_C регулируется напряжение на зажимах двигателя U_D так, чтобы $n = \text{const}$, что позволяет поддерживать $p_{мхд} = \text{const}$.

Поскольку все опыты должны проводиться при $i_{вд} = \text{const}$ и $n = \text{const}$, то сразу необходимо правильно подобрать сопротивления R_C и $R_{ВД}$. Для этого при отключенном возбуждении генератора производят пуск вспомогательного двигателя, предварительно зашунтировав амперметр A_1 . Сопротивлением R_C устанавливают $U_D = U_n$, а уменьшая ток $i_{вд}$ сопротивлением $R_{ВД}$, доводят частоту вращения агрегата до $n = n_n$. Затем включают на источник питания цепь возбуждения генератора и увеличивая $i_{вд}$ поднимают напряжения на его зажимах до $U_G = (1,2 - 1,3) U_n$. При этом частота вращения агрегата будет снижаться и ее изменением тока $i_{вд}$ снова доводят до $n = n_n$ и в дальнейшем оставляют этот ток $i_{вд} = \text{const}$, поддерживая $n = n_n$ с помощью сопротивления R_C .

При проведении опытов по току в цепи якоря двигателя I_D и напряжения на его зажимах U_D определяются подводимая мощность P_D , которая необходима для покрытия потерь во вспомогательном двигателе $\sum p_\partial$ и в генераторе $\sum p$.

Суммарные потери во вспомогательном двигателе равны

$$\sum p_\partial = p_{ст\partial} + p_{мх\partial} + p_{м\partial} \quad (6.9)$$

где $p_{м\partial} = I_D^2 R_a + \Delta U_{щ} I_D$ - потери в якорной цепи двигателя, имеющего сопротивление обмоток, последовательно включенных в эту цепь, равное R_a , и падение напряжения в щеточном контакте $\Delta U_{щ} = 2B$.

Если в качестве вспомогательного двигателя используется МПТ соизмеримой мощности с генератором (как в нашем случае), то обычно $p_{м\partial} \ll p_{ст\partial} + p_{мх\partial}$, и тогда $\sum p_\partial \approx p_{ст\partial} + p_{мх\partial} = \text{const}$ при проведении всех трех опытов.

Суммарные потери генератора $\sum p_z$ в зависимости от условий проведения опыта будут различны. При вращении возбужденного генератора (опыт 1) $\sum p_z$ будут включать потери в стали $p_{стz}$, являющиеся функцией ЭДС генератора, и механические потери $p_{мхz}$, которые при $n = \text{const}$ остаются постоянными. При вращении невозбужденного генератора (опыт 2) $p_{стz} = 0$ и $\sum p_z = p_{мхz}$. Наконец, в опыте холостого хода вспомогательного двигателя (опыт 3) $\sum p_z = 0$ и вся подводимая мощность расходуется на покрытие потерь в двигателе.

При проведении первого опыта снимается нисходящая ветвь характеристики холостого хода генератора (см. гл. 4), начиная с напряжения U_0 , равного ЭДС E , $(1,2 - 1,3)U_n$. Понижая $i_{вz}$, при полном отключении возбуждения ($i_{вz} = 0$) получают условия, отвечающие опыту 2. В процессе опытов измеряются U_D , I_D , $i_{вz}$, $U_{0Г} = E_G$. В опыте 1

мощность двигателя $P_{Д1} = U_{Д1} I_{Д1} = \Sigma p_{\partial} + p_{стг} + p_{мхг} = f(E_{Г})$. В опыте 2 $P_{Д2} = U_{Д2} I_{Д2} = \Sigma p_{\partial} + p_{мхг}$. Поскольку $\Sigma p_{\partial} = \text{const}$ и $p_{мхг} = \text{const}$, то

$$P_{Д1} - P_{Д2} = p_{стг} = f(E_{Г}). \quad (6.10)$$

На рис. 6.4 приведена зависимость $p_{ст} = f(E)$.

Опыт 3 проводится механического разъединения двигателя и генератора. Здесь, как и в опыте 2, снимается одна точка при том же значении тока $i_{в\partial}$, что и в опытах 1,2. тогда мощность $P_{Д3} = U_{Д3} I_{Д3} = \Sigma p_{\partial}$, и разность

$$P_{Д2} - P_{Д3} = p_{мхг}, \quad (6.11)$$

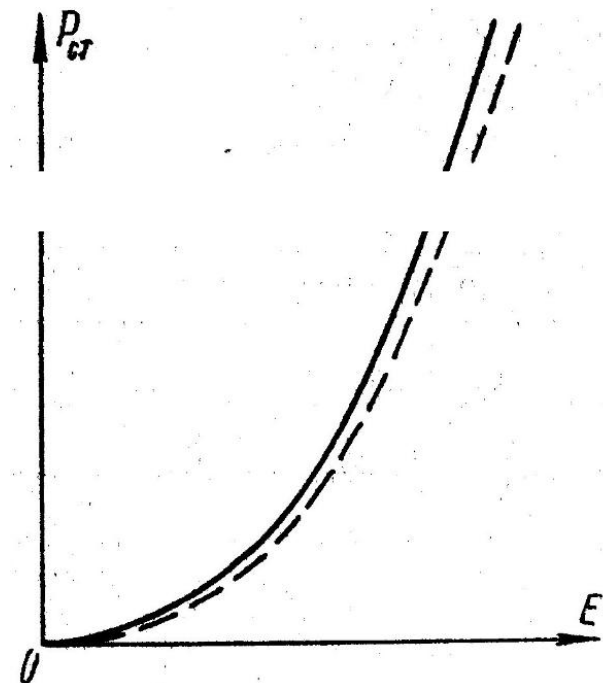


Рис.6.4. Зависимость

$p_{ст} = f(E)$:
 — способ вспомогательного
 двигателя; - - - способ не-
 нагруженного двигателя

6.6 Способ вращения в режиме нагруженного двигателя.

Этот способ иногда называется способом холостого хода. Суть его состоит в том, что двигатель, механически отсоединенный от генератора, вращается на холостом ходу и замеряется мощность, подведенная к якорной цепи, которая расходуется на покрытие потерь холостого хода.

Для проведения опыта используется та же схема, что и в разд. 6.5. При осуществлении опыта после пуска двигателя устанавливают на его зажимах наибольшее напряжение $U_{нб}$, регулируя ток i_b так, чтобы при $U_{нб}$ обеспечить $n = n_n$. Согласно ГОСТу 183 – 74 $U_{нб}$ должно быть выше U_n не более, чем на 30 %, чтобы не повредить межвитковую изоляцию обмотки якоря. Установку последующих точек производят, уменьшая U_D при одновременном уменьшении тока $i_{вд}$ так, чтобы при каждом новом значении U_D обеспечивалось $n = n_n$. При проведении опыта необходимо снять 5 – 6, примерно, равноотстоящих точек, уменьшая U_D , примерно, до $0,5U_n$. В процессе опыта измеряют U_D , I_D , $i_{вд}$.

Мощность двигателя $P_D = U_D I_D = p_{см} + p_{мх} + I_D^2 R_a$. Рассчитав величину $I_D^2 R_a$, определяют $p_{см} + p_{мх}$, как разность $p_{см} + p_{мх} = P_D - I_D^2 R_a$.

Для определения зависимости $p_{см} + p_{мх} = f(E)$, необходимо вычислить ЭДС E по формуле

$$E = U_D - I_D R_a - \Delta U_{щ}. \quad (6.12)$$

Поскольку потери в стали пропорциональны квадрату ЭДС E^2 , а механические потери при $n = \text{const}$ остаются постоянными, то разделение потерь на $p_{см}$ и $p_{мх}$ можно осуществить графическим путем, построив зависимость $p_{см} + p_{мх} = f(E^2)$. Такое построение показано на рис. 6.5.

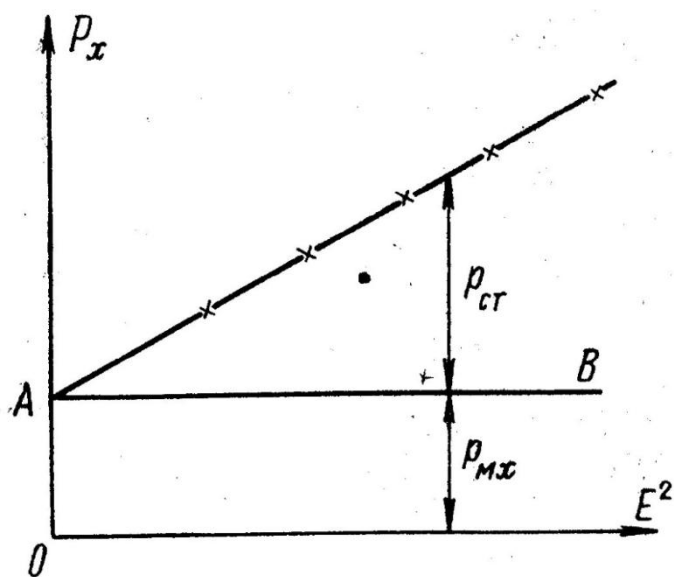


Рис.6.5. Разделение потерь холостого хода

Указанная зависимость на рис. 6.5. имеет прямолинейный характер. Построенная через точки графика прямая пересекает ось ординат в точке А. Из точки А проводится прямая АВ, параллельная оси абсцисс. Обозначим $P_x = p_{ct} + p_{mx}$. Тогда отрезок между осью абсцисс и прямой АВ даст значение p_{mx} , а между прямой АВ и характеристикой

$P_x = f(E^2) - p_{ct}$ для любого значения ЭДС. Этот метод разделения потерь холостого хода двигателя называется методом переменного напряжения или методом Деттмара. Следует отметить, что в режиме холостого двигателя в ряде случаев можно принять $E \approx U_d$ и строить зависимость $P_x = f(U_d^2)$.

После определения p_{ct} для ряда значений E (U_d) строится зависимость $p_{ct} = f(E)$, показанная на рис. 6.4 пунктиром.

6.7. Расчет КПД методом отдельных потерь

Значения p_{ct} и p_{mx} , полученные по данным в разделах 6.5 и 6.6, позволяют рассчитать КПД МПТ, работающей в любом режиме.

Допустим, что требуется рассчитать КПД генератора параллельного возбуждения, работающего в режиме регулировочной характеристики, если $U = U_n$ и $n = n_n$, при токах нагрузки $I = (0,25; 0,5; 0,75; 1,0; 1,25) I_f$. Полезная мощность для каждого тока нагрузки генератора определяется как

$$P_2 = U_n I \quad (6.13)$$

ЭДС генератора вычисляется по выражению

$$E = U_n + IR_a + \Delta U_{щ} \quad (6.14)$$

Ток возбуждения i_e для заданного значения тока нагрузки может быть определен по регулировочной характеристике, снятой при испытании генератора (см. гл. 4). Потери в цепи якоря генератора рассчитываются по формуле

$$p_m = I^2 R_a + \Delta U_{щ} I. \quad (6.15)$$

Согласно ГОСТу 11828-75 к потерям на возбуждение p_e относятся потери в самой обмотке независимого или параллельного возбуждения и потери в регулировочных сопротивлениях. Эти потери равны

$$p_e = U_n i_e \quad (6.16)$$

Добавочные потери согласно госту 11828-75 учитываются приближенно и для номинальной нагрузки генератора принимаются равными $p_{доб.н} = 0,01P_n$. При любом значении тока нагрузки I эти потери пересчитываются по выражению

$$p_{доб} = p_{доб.н} \left(\frac{I}{I_n} \right)^2. \quad (6.17)$$

Суммарные потери при любой нагрузке

$$\sum p = p_{ст} + p_{мх} + p_m + p_e + p_{доб} \quad (6.18)$$

Вычисление КПД производится по формуле

$$\eta = 1 - \frac{\sum P}{P_2 + \sum p} \quad (6.19)$$

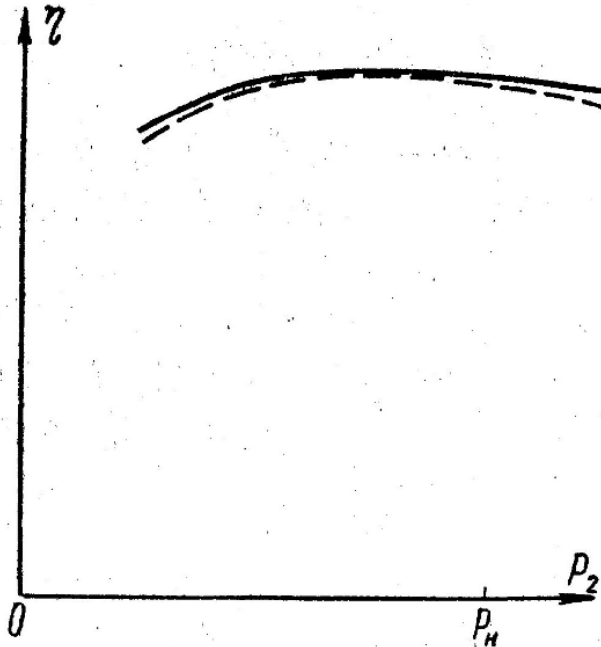


Рис.6.6. Зависимость:
 $\eta = f(P_2)$:
 — способ вспомогательного двигателя;
 - - способ ненагруженного двигателя

По результатам расчета КПД на рис. 6.6 строятся зависимости $\eta = f(P_2)$, по которым определяется КПД при номинальной нагрузке, а также максимальное его значение и то значение P_2 , при котором оно получается.

При расчете КПД по данным разделов 6.5 и 6.6 в выражении (6.18) будут различаться только $p_{ст}$ и $p_{мх}$.

Остальные же потери для заданного тока нагрузки I остаются неизменными.

6.8. Оценка результатов испытания

1. Отметить значения всех видов потерь при P_n , указав их величины в абсолютных значениях и в процентах от P_n .
2. Сопоставить значения $p_{мх}$ и $p_{ст}$ генератора, определенные различными способами, для номинального значения ЭДС.
3. Провести сравнение величин КПД при номинальной нагрузке, определенных различными способами.

Список литературы

1. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы. СПб.: Питер, 2007.
2. Костенко М.П., Пиотровский Л.М. Электрические машины. Ч1, Л., «Энергия», 1973.
3. Важнов А.И. Электрические машины. Л., «Энергия», 1969.
4. Жерве Г.К. Промышленные испытания электрических машин. Л., «Энергия», 1968.

Содержание

Глава 1. Общие вопросы испытания электрических машин постоянного тока	3
1.1 Введение	3
1.2 Номинальные данные машины	4
1.3 Обозначения выводных зажимов и схемы соединения обмоток ..	4
1.4 Измерения сопротивления обмоток	6
1.5 Основные соотношения в машинах постоянного тока	8
Глава 2. Двигатель параллельного возбуждения	13
2.1 Основные зависимости и типы характеристик	13
2.2 Компановка испытательного стенда и схема испытаний двигателя параллельного возбуждения	15
2.3 Пуск в ход двигателя параллельного возбуждения	18
2.4 Рабочие характеристики	19
2.5 Механические характеристики	22
2.6 Регулировочные характеристики	25
2.7 Нагрузочные характеристики	26
2.7.1 Нагрузочные характеристики ДПрВ при регулировании его частоты вращения путем изменения добавочного сопротивления в цепи якоря R_d	27
2.7.2 Нагрузочные характеристики ДПрВ при регулировании его частоты вращения путем изменения тока возбуждения	29
2.8 Оценка результатов испытаний	31
Глава 3. Двигатель последовательного возбуждения	32
3.1 Основные характеристики двигателя последовательного возбуждения	32
3.2 Компановка испытательного стенда и схема испытаний двигателя последовательного возбуждения	33
3.3 Пуск в ход двигателя последовательного возбуждения	37
3.4 Рабочие характеристики	38
3.5 Механические характеристики	40
3.6 Нагрузочные характеристики	46
3.7 Оценка результатов испытаний	51

Глава 4. Испытание генераторов постоянного тока	52
4.1 Основные зависимости и типы характеристик	52
4.2 Компановка испытательного стенда и схемы испытаний	53
4.3 Испытание генератора независимого возбуждения	56
4.3.1 Характеристика холостого хода	56
4.3.2 Нагрузочная характеристика	58
4.3.3 Внешняя характеристика	60
4.3.4 Регулировочная характеристика	61
4.4 Испытание генератора параллельного возбуждения	62
4.5 Испытание генератора смешанного возбуждения	63
4.5.1 Нагрузочная характеристика	63
4.5.2 Внешняя характеристика	64
4.5.3 Регулировочная характеристика	65
4.6 Построение характеристик генератора с помощью характеристических треугольников	65
4.6.1 Построение внешних характеристик	66
4.6.2 Построение регулировочных характеристик	69
4.7 Оценка результатов испытаний	71
Глава 5. Параллельная работа генераторов постоянного тока	72
5.1 Общие замечания	72
5.2 Схема испытания	76
5.3 Параллельная работа генераторов в режиме регулировочной характеристики	77
5.4 Параллельная работа в режиме внешней характеристики	79
5.5 Перевод нагрузки	80
5.6 Оценка результатов испытания	82
Глава 6. Потери и коэффициент полезного действия в машинах постоянного тока	84
6.1 Общие соображения	84
6.2 Описание экспериментальной установки	88
6.3 Схема испытаний	90
6.4 Определение КПД методом взаимной нагрузки	92
6.5 Способ вспомогательного (тарированного) двигателя	95
6.6 Способ вращения в режиме нагруженного двигателя	99

6.7 Расчет КПД методом отдельных потерь	100
6.8 Оценка результатов испытаний	102
Список литературы	103