

МИНИСТРЕСТВО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ВОЛГОГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ
ВОЛЖСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

КАФЕДРА «АВТОМАТИКА, ЭЛЕКТРОНИКА И
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА»

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТА ИНЕРЦИИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА
МЕТОДОМ СВОБОДНОГО ВЫБЕГА

Методические указания
к лабораторной работе

Волгоград 2001

УДК 621.3 (076.5)

Определение момента инерции электропривода методом свободного выбега: Методические указания к лабораторной работе / Сост. А.П. Желтоногов, Л.Б. Иванов; Волгоград. гос. техн. ун-т. – Волгоград, 2001. – 19 с.

Методические указания содержат теоретическую часть - краткое описание методов определения момента инерции вращающихся масс, практическую часть – экспериментальное определение момента инерции электропривода методом свободного выбега с описанием лабораторной установки, порядка выполнения работы и оформления результатов исследования.

Предназначены для студентов специальности 2102 «Автоматизация технологических процессов и производств».

Работа рассчитана на 4 часа лабораторных занятий.

Ил. 9, табл. 2, библиогр. – 3 назв.

Рецензент д-р техн. наук проф. Э.И. Чаплыгин

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Волгоградского государственного технического университета.

© Волгоградский
государственный
технический
университет, 2001

1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Изучение характера движения электропривода производится при помощи решения уравнения движения и исследования влияния различных величин, входящих в это уравнение, на зависимость момента, тока, частоты вращения от времени, т.е. в переходных режимах.

Уравнение движения электропривода

$$M - M_C = J \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega^2}{2} \frac{dJ}{d\alpha},$$

где M - вращающий момент двигателя, Н·м;
 M_C - момент сопротивления механизма, приведенный к валу двигателя, Н·м;
 ω - частота вращения, с⁻¹;
 α - угол поворота, рад;
 J - момент инерции электропривода, приведенный к валу двигателя, кг·м²;
 t - время, с.

Для большинства механизмов $J = \text{const}$ и уравнение движения

$$M - M_C = J \frac{d\omega}{dt}.$$

Момент инерции электропривода

$$J = m\rho^2 = \frac{GD^2}{4g},$$

где ρ и D - радиус и диаметр инерции, м;
 G - сила тяжести, Н;
 m - масса, кг;
 $g = 9,81$ - ускорения силы тяжести, м/с²;
 GD^2 - маховый момент электропривода, Н·м².

Если в уравнение движения электропривода вместо J и ω ввести GD^2 [Н·м²] и n [об/мин], получим более удобную для практических расчетов формулу

$$M - M_C = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt},$$

где n - внесистемная единица обозначения частоты вращения, об/мин, которая указывается в паспортах двигателей и каталогах.

Переход от ω к n выполняется по формуле :

$$\omega = \frac{2\pi n}{60}.$$

Знание величины момента инерции электропривода (или махового момента) необходимо при определении электромеханической постоянной электропривода T_M , которая определяет характер переходных процессов в механической части электропривода.

Электромеханической постоянной времени называется время, в течение которого электропривод, имеющий момент инерции J (или маховый момент GD^2), разгоняется без нагрузки из неподвижного состояния до частоты вращения идеального холостого хода двигателем постоянного тока и синхронной частоты вращения асинхронным двигателем при неизменном моменте, равном моменту короткого замыкания для двигателя постоянного тока и максимальному моменту асинхронного двигателя.

Значение T_M определяется по формуле

$$T_M = \frac{J\omega_0}{M_K} [\text{с}],$$

где J – момент инерции электропривода, $\text{кг}\cdot\text{м}^2$;

ω_0 – частота вращения идеального холостого хода или синхронная частота вращения, с^{-1} ;

M_K – момент короткого замыкания или максимальный момент, $\text{Н}\cdot\text{м}$.

Если использовать внесистемную единицу n об/мин, то

$$T_M = \frac{GD^2 n_0}{375 M_K},$$

где n_0 – соответственно частота вращения идеального холостого хода или синхронная частота вращения.

При конструировании и исследовании электроприводов установок может быть несколько ситуаций:

1. Моменты инерции (маховые моменты) двигателя и механизма известны. В этом случае для определения момента инерции (махового момента) достаточно использовать известные формулы приведения моментов инерции (маховых моментов) к валу электродвигателя и, далее, определить T_M . Значения маховых моментов электродвигателей указываются в каталогах в $\text{кг}\cdot\text{м}^2$; для перехода к размерности $\text{Н}\cdot\text{м}^2$ необходимо каталожные значения разделить на $g = 9,81 \text{ м/с}^2$.

2. Момент инерции (маховый момент) двигателя неизвестен, например, если в электроприводе использован импортный двигатель или двигатель

серии, снятой с производства, и каталожные данные на них отсутствуют и др. Момент инерции механизма известен. В этом случае необходимо экспериментальным путем определить момент инерции (маховый момент) двигателя, затем расчетным путем по формулам приведения определить момент инерции (маховый момент) электропривода. Далее определить T_M .

3. Моменты инерции (маховые моменты) двигателя и механизма неизвестны. В этом случае их определяют экспериментальным путем. Далее определяют T_M .

4. При известном моменте инерции (маховом моменте) двигателя необходимо определить момент инерции (маховый момент) механизма. В этом случае экспериментальным путем определяют момент инерции (маховый момент) электропривода, затем по известным формулам приведения определяют момент инерции (маховый момент) механизма. По величине момента инерции (махового момента) определяют T_M .

Момент инерции (маховый момент) электропривода или двигателя может быть определен экспериментально методами крутильных колебаний, маятниковых колебаний, падающего груза и свободного выбега. Выбор метода зависит от условий проведения эксперимента, наличия оборудования, приборов, возможности разборки двигателя и т.д.

Метод крутильных колебаний. Предварительно двигатель разбирают так, чтобы освободить ротор от крышек и подшипников. Ротор за конец вала подвешивают на стальной проволоке, второй конец которой жестко закрепляют в опоре. При этом нужно обеспечить строгую вертикаль оси ротора (рис. 1.1). Проволоку с подвешенным ротором закручивают из положения равновесия на некоторый угол и подсчитывают число полных колебаний, совершаемых ротором, за достаточно большой промежуток времени t . Период полного колебания:

$$T = \frac{t}{z} = 2\pi \sqrt{\frac{J}{k}} [\text{с}],$$

где k – направляющий момент проволоки, т.е. момент, вызывающий закручивание проволоки на угол в 1 рад, Н·м.

Момент инерции

$$J = \frac{T^2}{4\pi^2} k [\text{кг} \cdot \text{м}^2].$$

Значение k находят по формуле

$$k = M \cdot \alpha,$$

где M – момент, необходимый для закручивания проволоки из положения равновесия на угол α . Определяется экспериментальным путем, [Н·м].

Более простой вариант определения момента инерции получается, если есть возможность провести два опыта с крутильными колебаниями. Для этого находят T как было указано выше. Второе определение периода T' производят с прикрепленным к ротору телом, имеющим известный момент инерции $J_{\text{ДОБ}}$. Это может быть диск известного размера и веса или рычаг с грузами на концах (рис. 1.2). По значениям T и T' находят момент инерции

$$J = \frac{T^2}{T'^2 - T^2} J_{\text{ДОБ}}.$$

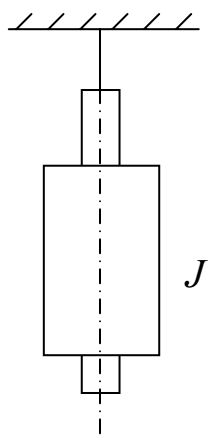


Рис. 1.1

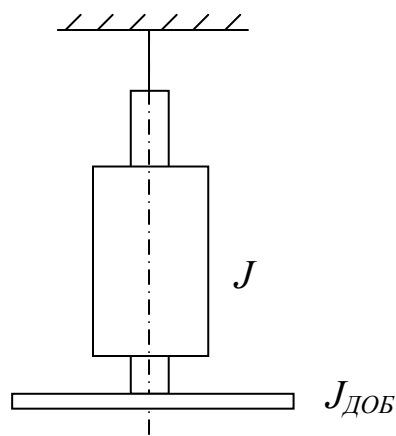


Рис. 1.2

Т.к. существует пропорциональность между k и α , угол первоначального закручивания может быть произвольным.

Метод маятниковых колебаний. Ротор крепится любым способом, например, проволокой к отрезку угловой стали так, чтобы вершина уголка могла быть использована в качестве призмы, относительно которой ротор совершает колебания. Оба конца полученного маятника опирают на горизонтальные металлические опоры таким образом, чтобы ротор мог совершать колебания относительно точек опоры (рис. 1.3). Момент инерции ротора относительно оси, совпадающей с вершиной уголка (если пренебречь моментом инерции этого уголка)

$$J_a = \frac{GaT^2}{4\pi^2},$$

где G – вес ротора, кг;
 a – расстояние между осью ротора и осью качания, м.

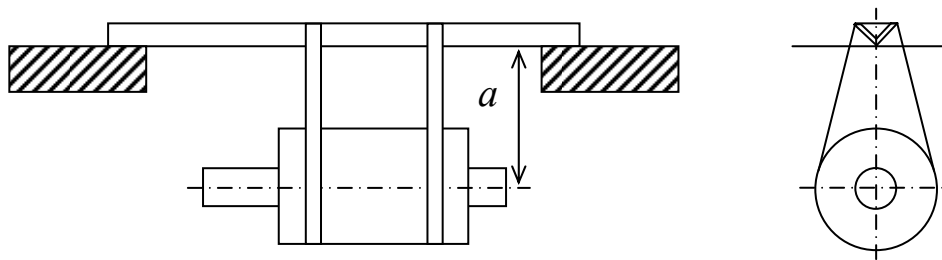


Рис. 1.3

По экспериментальному значению J_a находят квадрат радиуса инерции

$$\rho^2 = g \frac{aT^2}{4\pi^2} [\text{м}^2].$$

Действительное значение радиуса инерции относительно оси ротора вычисляется по формуле

$$\rho_0^2 = \rho^2 - a^2.$$

Момент инерции ротора

$$J = G \left(\frac{aT^2}{4\pi^2} - \frac{a^2}{g} \right).$$

Метод падающего груза. Недостатком описанных выше двух методов определения момента инерции ротора является необходимость разборки двигателя. Метод падающего груза позволяет определить момент инерции без разборки.

На конце вала или шкива на валу навивают несколько витков гибкого шнура. Другому концу шнура с прикрепленным к нему грузом дают возможность опускаться (рис. 1.4). При эксперименте измеряют время t , за которое груз опускается на высоту h . Момент инерции

$$J = mr^2 \left(\frac{gt^2}{2h} - 1 \right),$$

где m – масса груза, кг;
 r – радиус вала или шкива, м;
 t – время опускания груза, с;
 h – высота опускания груза, м.

Метод свободного выбега. Изложенные выше методы при значительных размерах и весе ротора становятся малопригодными и совершенно непригодными, если нужно определить момент инерции электропривода. В подобной ситуации пользуются методом свободного выбега или самосторможения. При отключении двигателя от источника питания ротор двигателя и соединенный с ним механизм (если он есть) за счет накопленной

кинетической энергии продолжают вращаться. Из-за потерь на трение частота вращения падает. Снижение частоты вращения будет тем больше, чем больше тормозящее действие сил трения и чем меньше запас кинетической энергии. В рассматриваемых условиях мощность, затрачиваемая на преодоление сил трения, должна быть равна уменьшению во времени кинетической энергии электропривода

$$P_0 = \frac{dA}{dt} \quad \text{или} \quad P_0 = -J\omega \frac{d\omega}{dt}.$$

Момент инерции

$$J = -\frac{P_0}{\omega \frac{d\omega}{dt}},$$

где P_0 – потери холостого хода в электроприводе при отключенном от источника питания двигателе, Вт.

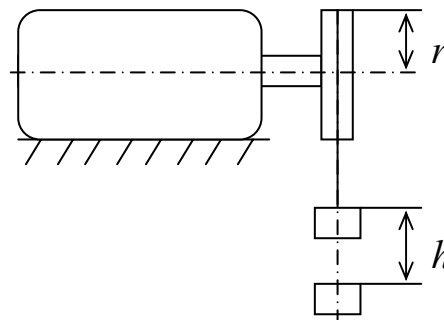


Рис. 1.4

Таким образом, для определения момента инерции необходимо снять кривую самоторможения и определить потери холостого хода электропривода при какой-либо частоте вращения ω_A . Величина поднормали

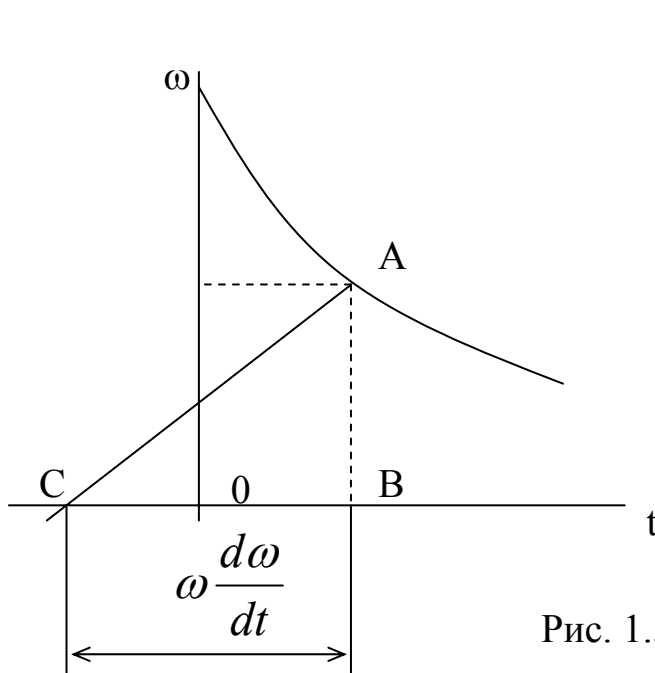


Рис. 1.5

$\omega \frac{d\omega}{dt}$ находится из кривой самоторможения для точки A , для которой определены потери холостого хода (рис. 1.5). При выбранных масштабах координат кривой самоторможения $m_\omega [c^{-1}/cM]$ и $m_t [c/cM]$ мас-

штаб поднормали $m = \frac{m_\omega^2}{m_t}$,

т.е. $\omega \frac{d\omega}{dt} = CBm_t$. Значение поднормали СВ измерено в см.

2. ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

2.1. Цель работы

Определить момент инерции и маховый момент электропривода, состоящего из электродвигателя постоянного тока с тахогенератором и короткозамкнутого асинхронного электродвигателя.

2.2. Программа работы

2.2.1. Экспериментальным путем снять кривую выбега $n=f(t)$.

2.2.2. Расчетным путем определить величину момента инерции и махового момента электропривода.

2.3. Описание лабораторной установки

Схема электрическая принципиальная приведена на рис. 2.1. Лабораторная установка состоит из электродвигателя постоянного тока М1, тахогенератора постоянного тока ВР, встроенного в электродвигатель М1, короткозамкнутого асинхронного электродвигателя М2, установленных на общей раме. Валы М1 и М2 соединены эластичной муфтой. Управление частотой вращения М1 выполнено по системе тиристорный преобразователь ТП – двигатель М1 с обратной связью по напряжению. В лабораторной установке М1 выполняет функции двигателя с регулируемой частотой вращения вращения, М2 является нагрузкой, у которой статический момент сопротивления не зависит от частоты вращения.

Установка содержит аппараты и приборы для управления, защиты и контроля параметров:

QF, KM – автоматический выключатель и магнитный пускатель для подключения к сети 2~50Гц 380В тиристорного преобразователя ТП;

SB1, SB2 – кнопки управления включением и выключением KM;

HL – лампа сигнальная в сети 2~50 Гц 220В;

RP – задатчик частоты вращения М1;

PV1, PV2 – Вольтметры для измерения напряжения на якоре М1 и напряжения в цепи задания частоты вращения М1;

PA – амперметр в цепи якоря М1;

Pn – осциллограф для регистрации кривой выбега;

переносной механический тахометр.

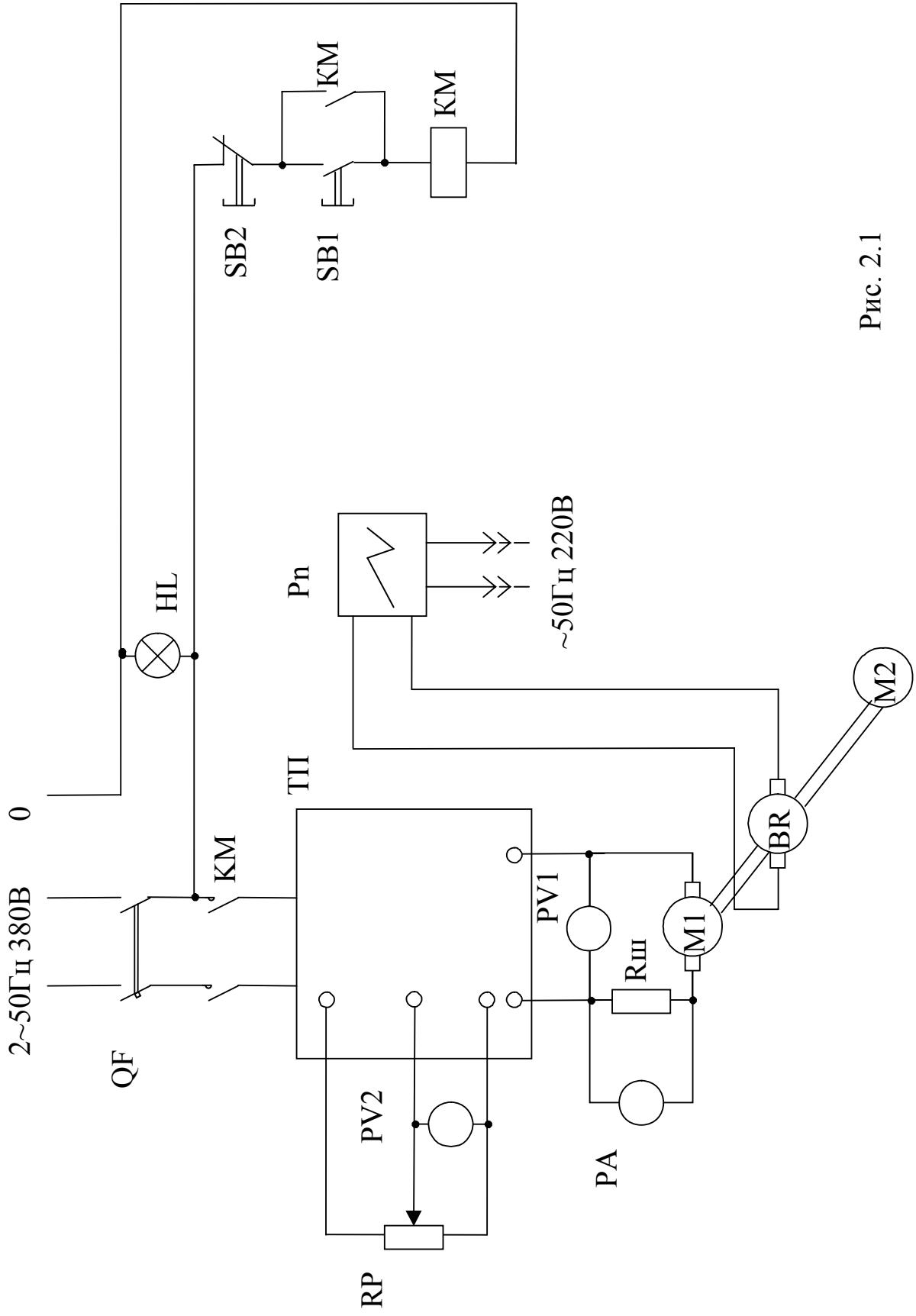


Рис. 2.1

Технические данные оборудования и приборов:

Тиристорный однофазный преобразователь ТЭПО-15-02, ~50Гц 220В или 2~50Гц 380В, номинальное выпрямленное напряжение 160В или 270В, номинальный выпрямленный ток 15А, максимальный ток отсечки 18А;

Двигатель постоянного тока Siemens, Perm.-Magn.-Mot/ 1HU3104-0AN01, 179В, 2000 об/мин, 27А, 4.3кВт, S3 40%, степень защиты IP54, $M_{\max}=27.7$ нм, I_0 макс=34А;

Тахогенератор Tacho 1HU1052, 20 мВ/об/мин, $R_H=13$ кОм. Made in Germany;

Асинхронный короткозамкнутый двигатель 4AM9064УЗ, 3~50 Гц 380В, 5А, 1410 об/мин, КПД 80%, $\cos(\varphi)=0.83$, S1, класс изоляции В, степень защиты IP44;

Задатчик частоты вращения ППБ15Г, 10 кОм \pm 10%, мощность 15 Вт;

Вольтметр (PV1) M42300, 0-300В, -, 1.5;

Вольтметр (PV2) M42100, 0-50В, -, 1.5;

Амперметр (РА) M42300, 0-100А, -, 1.5, с НШ 75mВ;

Осциллограф Иб;

Тахометр механический.

2.4. Методика проведения эксперимента

2.4.1. Ознакомиться с разделом 1 настоящих «Методических указаний», оборудованием, приборами, схемой лабораторной установки.

2.4.2. Перед началом работы проверить:

QF должен быть отключен;

HL гореть не должна;

RP должен быть установлен в положение, соответствующее минимальной частоты вращения M1.

2.4.3. Подключить к сети ~50 Гц 220В осциллограф Pn, включить тумблер «Сеть» на панели осциллографа, при этом должна загореться зеленая сигнальная лампа. Подключить вход осциллографа к зажимам BR.

2.4.4. Включением QF подать напряжение 2~50 Гц 380В на установку, при этом должна загореться HL.

2.4.5. Нажатием SB1 включить КМ и тем самым подать напряжение 2~50 Гц 380В на ТП.

2.4.6. Поворотом RP по часовой стрелке установить номинальную частоту вращения M1, используя для измерения переносной механический тахометр.

2.4.7. Наложить на экран осциллографа прозрачную бумагу с нанесенной заранее координатной сеткой (рис.2.2). Выполнить калибровку координат осциллографа по частоте вращения M1 и времени по следующей методике:

Установить переключатель «метки времени» в положение «Внутренние»;

Установить величину вертикального приращения (т.е. величину сигнала, пропорционального частоте вращения $n_H=2000$ об/мин) равную 4 делениям на листе с координатной сеткой.

Отключить КМ нажатием SB2 и с помощью часов с секундной стрелкой приблизительно определить время до остановки электропривода. По величине этого времени установить переключателями на панели осциллографа «Время развертки» и «Время развертки плавно» такое время развертки, при котором кривая выбега расположится в пределах координатной сетки, а метки времени (1с) будут совпадать с делениями координатной сетки.

Пример калибровки осциллографа приведен на рис.2.2.

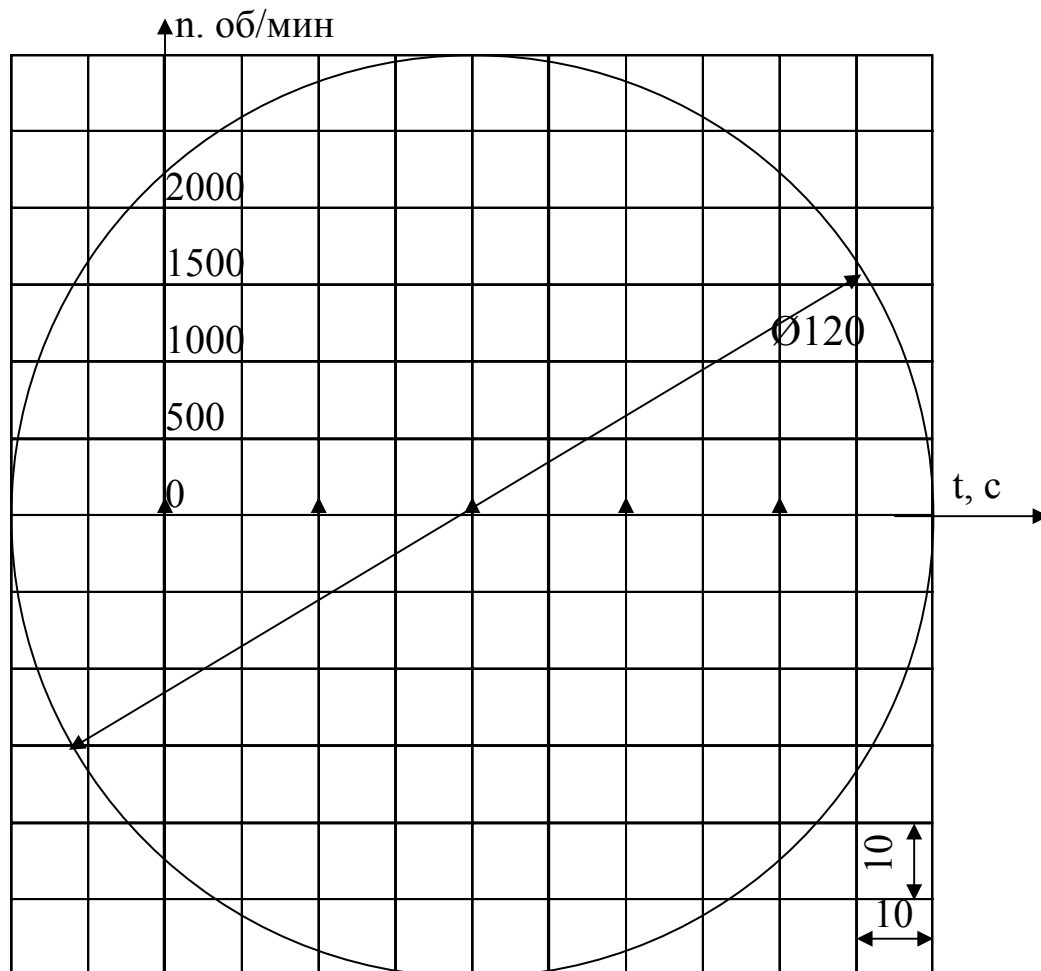


Рис. 2.2

2.4.8. Не изменяя положения RP, нажатием SB1 включить электропривод, и после достижения $n_H=2000$ об/мин нажатием SB2 отключить ТП от сети 2~50 Гц 380В и нанести на бумагу кривую выбега $n=f(t)$ с экрана осциллографа.

2.4.9. Установить RP в положение, соответствующее минимальной частоте вращения M1.

2.4.10. Повторить эксперимент по п.п. 2.4.5. – 2.4.9. при положении RP, соответствующем $0,5n_H$.

2.4.11. Показания приборов записать в таблицу 2.1.

Табл. 2.1

n, об/мин	n_H	$0,5 n_H$
U, В		
U_3 , В		
I, А		

2.4.12. Оформить экспериментальную кривую выбега $n=f(t)$ в координатах n (об/мин) и t (с) с учетом принятых при снятии кривой масштабов частоты вращения и времени.

2.5. Обработка результатов экспериментов.

Момент инерции вращающихся частей электропривода установки

$$J = J_{M1} + J_{M2} + J_{BR} + J_C,$$

где J_{M1} , J_{M2} , J_{BR} – моменты инерции якорей M1, M2, BR;
 J_C – момент инерции муфты соединяющей валы M1 и M2.

Уравнения движения электропривода

$$M = M_C + M_J,$$

где M – электромагнитный момент электродвигателя;
 M_C – момент сопротивления электропривода;
 M_J – динамический момент электропривода.

При установившейся частоте вращения до момента отключения ТП от сети 2~50Гц 380В $M_J = 0$ и электромагнитный момент двигателя уравновешивается моментом сопротивления электропривода:

$$M = -M_C.$$

В первый момент отключения ТП от сети 2~50Гц 380В электромагнитный момент двигателя $M = 0$ и момент сопротивления электропривода уравновешивается динамическим моментом электропривода:

$$M_C = -M_J.$$

Динамический момент электропривода

$$M_J = \frac{J}{9.55} \frac{dn}{dt},$$

где J, кг·м²;
n, об/мин;

t , с;

M_J , Н·м.

Если заменить момент инерции маховым моментом

$$M_J = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt},$$

где GD^2 , Н·м²;

n , об/мин;

t , с;

M_J , Н·м.

Из рассмотренных уравнений следует

$$J = -9.55M_c \frac{dt}{dn},$$

$$GD^2 = -375M_c \frac{dt}{dn},$$

$$GD^2 = 4gJ.$$

Момент инерции или маховый момент определяют по этим формулам с использованием кривой выбега $n=f(t)$ (п.2.4.12).

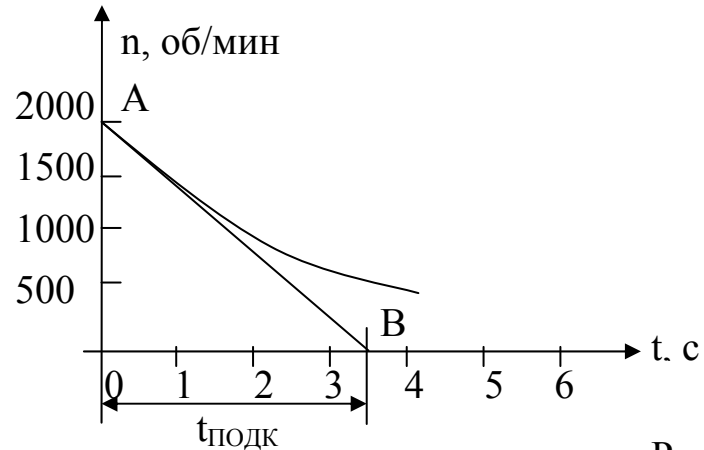


Рис. 2.3

Для определения величины dn/dt необходимо в точке А, соответствующей частоте вращения $n=n_H$ (при повторении опыта $n=0.5n_H$), провести касательную к кривой выбега и определить время $t_{\text{подк}}$. Из треугольника ОАВ следует

$$\frac{dn}{dt} = \frac{n}{t_{\text{ПОДК}}},$$

и

$$J = 9.55 M_C \frac{t_{\text{ПОДК}}}{n}.$$

При определении момента сопротивления электропривода M_C используется следующая методика.

Момент сопротивления в установившемся режиме уравнивается электромагнитным моментом электродвигателя

$$M_C = M = 9.55 \frac{P_M}{n_H}, \quad M_C = M = 9.55 \frac{P_M}{0.5n_H},$$

где M – электромагнитный момент двигателя (нм);
 P_M – электромагнитная мощность электродвигателя (Вт);
 $n_H, 0,5n_H$ – установившееся значение частоты вращения (об/мин).

Электромагнитная мощность двигателя

$$P_M = P_1 - I^2 R_J,$$

где P_1 – полная электрическая мощность, подводимая к двигателю (Вт), которая равна

$$P_1 = UI,$$

где U – напряжение на якоре двигателя (В);
 I – ток якоря двигателя (А).

Сопротивление якоря определяется по номинальным данным двигателя по формуле

$$R_J \approx 0,5(1 - \eta_H)R_H,$$

где R_H – номинальное сопротивление двигателя (Ом), равное

$$R_H = \frac{U_H}{I_H},$$

где η_H – номинальный КПД двигателя, равный

$$\eta_H = \frac{1000P_H}{U_H I_H},$$

где P_H – номинальная мощность двигателя в кВт.
 Результаты расчета записать в таблицу 2.2.

Табл. 2.2

	$t_{\text{ПОДК}},$ с	$\frac{n}{t_{\text{ПОДК}}},$ об/мин/с	$P_M,$ Вт	$P_1,$ Вт	$I^2 R_{\text{Я}},$ Вт	$M_C,$ Н _м	$J,$ Кгм ²	$GD^2,$ Нм ²
$n=n_H$								
$n=0,5n_H$								
R_H			η_H			$R_{\text{Я}}$		

Пояснения к расчету.

Электромагнитная мощность двигателя установки

$$P_M = P_{OM1} + P_{OM2},$$

где P_{OM1} и P_{OM2} – потери холостого хода электрических машин М1 и М2.

Для электропривода установки

$$P_{OM1} = P_{MXM1} + P_{СТМ1},$$

где P_{MXM1} – механические потери двигателя М1;

$P_{СТМ1}$ – потери в стали двигателя М1.

$$P_{OM2} = P_{MXM2},$$

где P_{MXM2} – механические потери в двигателе М2, отключенном от сети; в этом случае $P_{СТМ2} = 0$.

Используя понятие полной механической мощности на валу, можно записать

$$P_{2M1} = P_{MXM2}.$$

Энергетическая диаграмма для электропривода установки приведена на рис.2.4

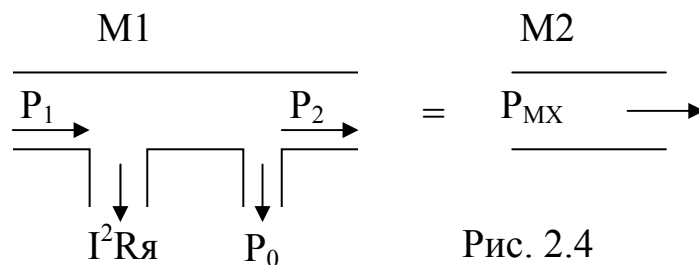


Рис. 2.4

2.6. Содержание отчета

Название, цель и программа работы.

Технические характеристики оборудования и приборов.

Схема электрическая принципиальная установки.

Таблица экспериментальных и расчетных величин, экспериментальный график кривой выбега $n=f(t)$.

Основные расчетные формулы и расчет.

Выводы по результатам работы

2.7. Контрольные вопросы

На какие свойства электроприводов влияет величина момента инерции?

Как можно изменить момент инерции? С какой целью уменьшают или увеличивают момент инерции?

Методы определения момента инерции. Их сущность.

Сущность метода свободного выбега для определения момента инерции.

Порядок выполнения настоящей лабораторной работы.

Сущность формул для расчета момента инерции.

Энергетическая диаграмма электропривода при определении момента инерции методом свободного выбега.

Назначение приборов контроля параметров на электрической принципиальной схеме установки.

3. ЛИТЕРАТУРА

1. Вольдек А.И. Электрические машины. – Л.: Энергия, 1974. – 840с.
2. Андреев В.П., Сабинин Ю.А. Основы электропривода. – М.-Л.: ГЭИ, 1963. – 772с.
3. Постников И.М. Проектирование электрических машин. – Киев: ГИТЛ, 1960. – 910с.

Составители: Анатолий Павлович Желтоногов,
Лев Борисович Иванов

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТА ИНЕРЦИИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА МЕТО- ДОМ СВОБОДНОГО ВЫБЕГА.

Методические указания к лабораторной работе.

Редактор
Темплан 200 поз. №

Подписано в печать Формат 60x84 1/16
Бумага газетная. Печать офсетная. Усл. печ. л.
Уч.-изд.л. Тираж Заказ Бесплатно

Волгоградский государственный технический университет.
400066 Волгоград, пр. Ленина, 28.
РПК «Политехник» Волгоградского государственного технического
университета.
400066 Волгоград, ул. Советская, 35.