

**Министерство образования Республики Беларусь**

**Учреждение образования  
«Гомельский государственный технический  
университет имени П. О. Сухого»**

**Кафедра «Промышленная электроника»**

# **ЭЛЕМЕНТЫ И УСТРОЙСТВА СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ**

## **ПРАКТИКУМ**

**по выполнению лабораторных работ  
по одноименной дисциплине  
для студентов специальности  
1-53 01 07 «Информационные технологии  
и управление в технических системах»  
дневной формы обучения**

**Электронный аналог печатного издания**

**Гомель 2021**

УДК 681(075.8)  
ББК 32.81я73  
Э45

*Рекомендовано к изданию научно-методическим советом  
факультета автоматизированных и информационных систем  
ГГТУ им. П. О. Сухого  
(протокол № 4 от 28.12.2020 г.)*

Рецензент: доц. каф. «Автоматизированный электропривод»  
ГГТУ им. П. О. Сухого канд. техн. наук, доц. *М. Н. Погуляев*

Э45 **Элементы** и устройства систем управления : практикум по выполнению лаборатор. работ по одноим. дисциплине для студентов специальности 1-53 01 07 «Информационные технологии и управление в технических системах» днев. формы обучения / сост.: С. Н. Кухаренко, В. А. Хананов. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2021. – 80 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <https://elib.gstu.by>. – Загл. с титул. экрана.

ISBN 978-985-535-467-4.

Содержит основные теоретические сведения, методические рекомендации по выполнению лабораторных работ, задания для самостоятельной работы и контрольные вопросы по дисциплине «Элементы и устройства систем управления».

Для студентов специальности 1-53 01 07 «Информационные технологии и управление в технических системах» дневной формы обучения.

УДК 681(075.8)  
ББК 32.81я73

ISBN 978-985-535-467-4

© Кухаренко С. Н., Хананов В. А.,  
составление, 2021  
© Учреждение образования «Гомельский  
государственный технический университет  
имени П. О. Сухого», 2021

## Предисловие

Системы автоматического управления и регулирования в настоящее время широко используются в промышленности, транспорте и быту. Автоматизированные системы представляют собой совокупность информационных, исполнительных систем и чувствительных элементов. Поэтому представление о физической сущности и принципах функционирования элементов таких систем необходимо инженерам практически всех специальностей.

Однако ввиду сложности и нелинейности физических процессов, характеризующих работу элементов электромеханического преобразования, аналитические решения дают лишь приближенные представления об их свойствах и характеристиках. Это обуславливает важность экспериментального исследования свойств и характеристик электрических двигателей и датчиков технологической информации.

Поэтому важным этапом изучения элементов систем управления является экспериментальное закрепление теоретических знаний по реализации и оценке технических способностей отдельных элементов систем управления.

В практикуме изложены основные сведения о конструкции, даны необходимые расчетные соотношения и формулы. Приведены описания лабораторных стендов, представлены задания, порядок выполнения и методические указания по проведению лабораторной работы, а также вопросы для контроля знаний студентов.

## Лабораторная работа № 1

### ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТРАНСФОРМАТОРОВ

**Цель работы:** познакомиться с системой основных электрических параметров трансформаторов, освоить методику измерения этих параметров и определения эксплуатационных характеристик.

#### Краткие теоретические сведения

Трансформатор – электромагнитный аппарат, представляющий собой систему индуктивно связанных контуров и преобразующий одну или несколько систем переменного тока в другую систему переменного тока. Из определения следует, что, в общем случае, трансформатор является пассивным многополюсником. Следовательно, данный тип устройств исследуется и описывается методами, которые используют в электротехнике многополюсников. В данной лабораторной работе рассматривается методика определения параметров трансформатора с двумя обмотками (двухобмоточный). Обмотка, к которой подводится электрическая энергия, называется первичной, стандартизированное обозначение  $W_1$ , соответственно обмотка, с которой отводится энергия, – вторичная  $W_2$ .

Необходимость в определении параметров трансформаторов возникает в процессе их производства, после выполнения ремонта и при разработке новых устройств.

Свойства трансформатора как четырехполюсника могут быть определены только в системе классической матрицы передачи [A]:

$$\begin{aligned}U_1 &= AU_2 + BI_2; \\I_1 &= CU_2 + DI_2,\end{aligned}\tag{1.1}$$

где  $U_1, U_2, I_1, I_2$  – напряжения и токи первичной и вторичной обмоток соответственно.

Очевидно, что наиболее удобным способом определения параметров  $ABCD$  следует рассматривать опыт короткого замыкания и холостого хода на выходе четырехполюсника.

$$A = \frac{U_1}{U_2} \text{ при } I_2 = 0; \quad C = \frac{I_1}{U_2} \text{ при } I_2 = 0;$$

$$B = \frac{U_1}{I_2} \text{ при } U_2 = 0; D = \frac{I_1}{I_2} \text{ при } U_2 = 0. \quad (1.2)$$

Необходимо помнить, что коэффициенты  $ABCD$  в общем случае, комплексные величины. Коэффициенты  $A$  и  $D$  представляют собой коэффициенты передачи по напряжению при холостом ходе на выходе и коэффициент передачи по току при коротком замыкании на выходе соответственно.

Согласно ГОСТ 11677–75 холостым ходом называют режим работы трансформатора, при котором ток вторичной обмотки равен нулю. При этом магнитный поток незначительно увеличен по отношению к номинальному. Установившийся ток первичной обмотки при номинальном напряжении и номинальной частоте называют током холостого хода, а потери в этом режиме потерями холостого хода  $P_{х.х}$ .

Согласно ГОСТ 11677–75 коротким замыканием называют режим работы трансформатора, при котором напряжение вторичной обмотки равно нулю. Опыт короткого замыкания проводят с целью определения напряжения короткого замыкания. Напряжением короткого замыкания называют напряжение, которое при номинальной частоте нужно подвести к выводам первичной обмотки, при замкнутой накоротко вторичной, чтобы в них установились номинальные токи. Опыт короткого замыкания позволяет определить коэффициенты  $B$  и  $D$  матрицы передачи.

Коэффициенты  $A$  и  $D$  в технической терминологии принято называть коэффициентами трансформации. Коэффициенты  $B$  и  $C$  – отношение входного напряжения к выходному току при опыте короткого замыкания и отношение входного тока к выходному напряжению при опыте холостого хода. Практическое значение имеет отношение коэффициентов

$$\frac{A}{C} = \frac{U_1}{I_1} = Z_{1х.х}, \quad (1.3)$$

где  $Z_{1х.х}$  – входное сопротивление трансформатора, позволяющее оценить потери холостого хода и значение тока намагничивания.

$$\frac{B}{D} = \frac{U_1}{I_1} = Z_{1к.з}, \quad (1.4)$$

где  $Z_{1к.з}$  – входное сопротивление при коротком замыкании вторичных обмоток. Это значение позволяет оценить потери мощности и падение напряжения в трансформаторе под нагрузкой.

Трансформатор может быть представлен электрической схемой замещения (рис. 1.1).

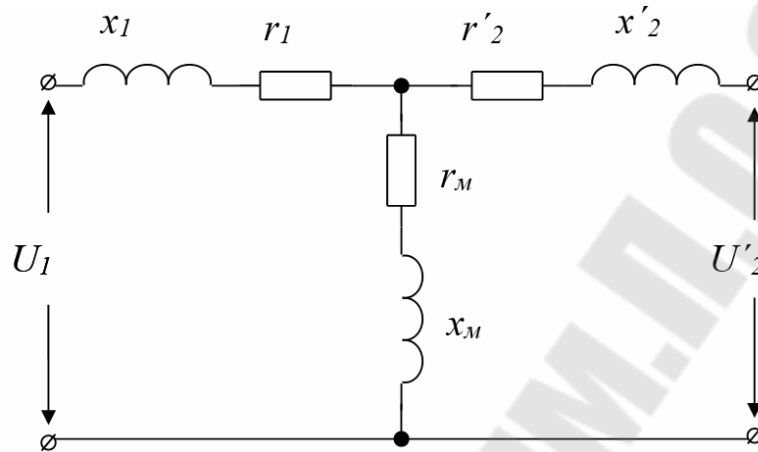


Рис. 1.1. Схема замещения двухобмоточного трансформатора

На схеме параметры  $r'_2$ ,  $x'_2$ , и  $U'_2$  – приведенные значения вторичной обмотки:

$$r'_2 = r_2 A^2; x'_2 = x_2 A^2; U'_2 = U_2 A. \quad (1.5)$$

В режиме холостого хода ток протекает по двум последовательно включенным сопротивлениям:  $Z_1 = r_1 + jx_1$  – полное сопротивление первичной обмотки, состоящее из активного сопротивления и индуктивности, обусловленной потоком рассеяния, а также  $Z_M = r_M + jx_M$  – полное сопротивление взаимной индуктивности, состоящее из сопротивления  $r_M$ , обусловленного потерями в магнитопроводе и сопротивлением, обусловленным полем взаимной индукции (полем в сердечнике) –  $x_M$ .

Сопоставляя измеренные значения с расчетными или паспортными, можно судить о правильности соединения обмоток, качестве и плотности магнитопровода, соответствии числа витков заданному значению.

В опыте короткого замыкания измеряется значение двух последовательно включенных сопротивлений  $Z_1$  и  $Z'_2$  – приведенное полное сопротивление вторичной обмотки. Влияние  $Z_M$  в этом опыте незначительно и может не учитываться.

Напряжение короткого замыкания – важный параметр трансформатора и обычно приводится в сопроводительной документации. Отклонение напряжения короткого замыкания от номинального или паспортного значения свидетельствует о нарушении межобмоточных соединений или о наличии коротких замыканий в обмотках.

Типовые трансформаторы не являются взаимными четырехполюсниками, их электрические характеристики различны относительно обмоток  $W_1$  и  $W_2$ , что объясняется различным расположением обмоток относительно магнитопровода и взаимным расположением.

Схема лабораторного стенда приведена на рис. 1.2.

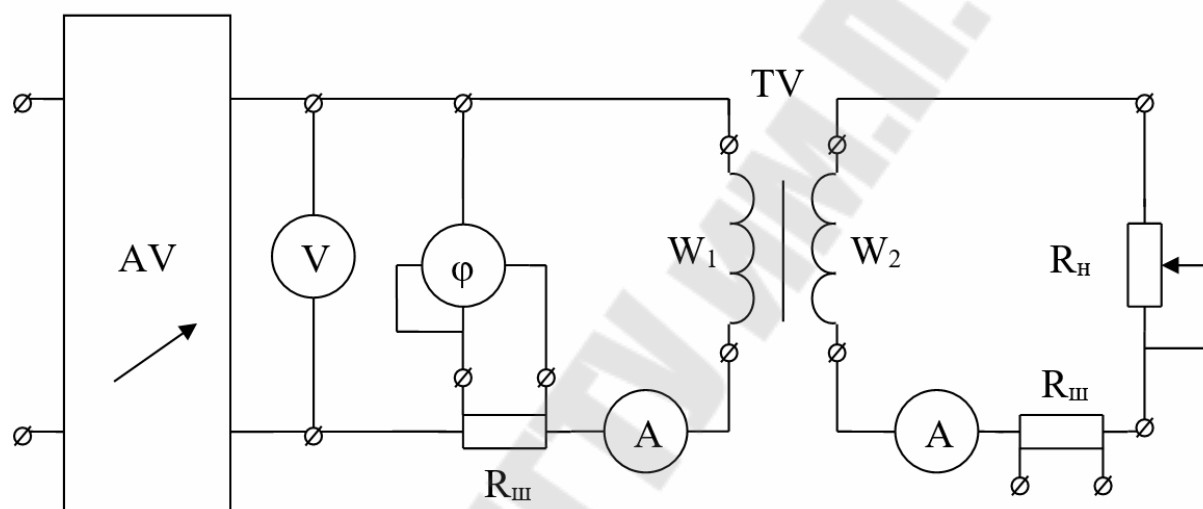


Рис. 1.2. Схема лабораторного стенда

На схеме рис. 1.2 приняты следующие обозначения: AV – регулируемый источник напряжения; TV – испытуемый трансформатор; φ – измеритель разности фаз;  $R_H$  – сопротивление нагрузки;  $R_{ш}$  – сопротивление токоизмерительного шунта; A, V – амперметр и вольтметр.

### Ход работы

1. Установить регулятор AV на минимум, включить стенд и проверить работу стенда, плавно увеличивая напряжение на схеме.

2. Изменяя напряжение на трансформаторе  $U_1$  от  $U_{\min}$  до 240 В, для пяти-шести значений измерить характеристику холостого хода трансформатора. Один из режимов должен соответствовать номинальному значению напряжения.

3. Рассчитать параметры цепи намагничивания  $Z_m$ , полную  $S$  и активную  $P$  мощность для каждого из режимов.

4. Результаты измерений и вычислений занести в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Номер опыта	$U_1, В$	$I_1, А$	$\varphi, \text{град}$	$R_m, Ом$	$X_m, Ом$	$S, ВА$	$P, Вт$
1							
2							
...							

5. Построить графики  $I_1, r_m, P$  в зависимости от приложенного напряжения  $U_1$ .

6. Во избежание больших токов при выполнении опыта короткого замыкания обязательно перед включением вывести регулятор АВ на нуль.

7. Установить переключку параллельно нагрузочному резистору.

8. Плавно изменяя напряжение первичной обмотки, определить для четырех-пяти режимов напряжение короткого замыкания и разность фаз токов вторичной и первичной обмоток. Один из режимов должен соответствовать номинальному току работы трансформатора.

9. Рассчитать параметры обмоток и потери в них, результаты измерений и вычислений занести в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Номер опыта	$U_1$	$I_1$	$I_2$	$\varphi_1$	$\varphi_2$	$r$	$x$	$P$
1								
2								
...								

10. Установить сопротивление нагрузки и напряжение  $U_1$ , равное номинальному значению.

11. Измерить входные и выходные значения электрических величин.

12. Подставить полученные значения в матрицу А и определить коэффициенты  $ABCD$ . Привести таблицу сопоставления параметров полученных в опытах короткого замыкания и холостого хода с А-параметрами.



13. Поменять местами обмотки трансформатора  $W_1$  и  $W_2$  и выполнить опыт холостого хода и короткого замыкания для номинального режима.

14. Определить параметры схемы замещения для обратного включения.

### Контрольные вопросы

1. Дать определение трансформатора. Какие обмотки называют первичными (вторичными)?

2. Записать классическую матрицу передачи  $A$ . Раскрыть физический смысл коэффициентов  $ABCD$  приемлемо к трансформатору.

3. Привести схему замещения трансформатора. Что означают приведенные единицы? Раскрыть физический смысл элементов схемы замещения.

4. Дать определение холостого хода трансформатора. Какие физические параметры измеряют в режиме холостого хода? Какие типы неисправностей могут быть выявлены при испытаниях на холостом ходе?

5. На что расходуется энергия холостого хода, от чего зависит ее значение?

6. Объяснить вид характеристик  $I_1(U_1)$ , и  $P_1(U_1)$ . Как по характеристикам холостого хода определить номинальное напряжение первичной обмотки?

7. Дать определение опыта короткого замыкания трансформатора, напряжения короткого замыкания. Какие виды неисправностей могут быть выявлены в опыте короткого замыкания?

8. Почему и во сколько раз различаются характеристики трансформатора при смене вторичной и первичной обмоток?

## Лабораторная работа № 2

### ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИМПУЛЬСНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

**Цель работы:** ознакомиться с работой импульсного трансформатора и его основными характеристиками. Освоить методику определения параметров импульсных трансформаторов.

#### Краткие теоретические сведения

Если подать на первичную обмотку трансформатора однополярный импульс  $U_{\text{вх}}$ , то согласно закону электромагнитной индукции в первичной обмотке  $W_1$  наведется ЭДС, препятствующая действию входного импульса. Не учитывая активного сопротивления обмотки, а также пренебрегая влиянием паразитных емкостей и рассеянием магнитного потока, можно записать

$$U_{\text{вх}} = W_1 \frac{d\Phi}{dt} = W_1 S \frac{dB}{dt}, \quad (2.1)$$

где  $W_1$  – число витков первичной обмотки;  $S$  – сечение сердечника;  $B$  – индукция магнитного потока  $\Phi$  в сердечнике ( $\Phi = BS$ ). Решая дифференциальное уравнение, полагая, что  $U_{\text{вх}} = U_1 = \text{const}$ , найдем закон изменения индукции:

$$B(t) = \frac{1}{W_1 S} \int_0^t U_{\text{вх}}(t) dt + B_0 = \frac{U_1 t}{W_1 S} + B_0, \quad (2.2)$$

где  $B_0$  – начальное значение индукции.

Таким образом, индукция в сердечнике до уровня насыщения изменяется по линейному закону (рис. 2.1), причем приращение индукции будет пропорционально площади импульса:

$$\Delta B = \frac{U_1 t_{\text{и}}}{W_1 S}. \quad (2.3)$$

**Напряжение на вторичной обмотке трансформатора определяется индуцируемой ЭДС.**

$$U_{\text{вых}} = W_2 \frac{d\Phi}{dt}. \quad (2.4)$$

Выражая из (2.1) значение  $\frac{d\Phi}{dt}$ , получим:

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{вх}} \frac{W_1}{W_2}. \quad (2.5)$$

Это выражение показывает, что в идеализированном трансформаторе выходное напряжение повторяет форму входного.

Из закона полного тока  $I_1' \omega_1 = H l_{\text{ср}} + I_2' \omega_2$  следует, что  $I_1 = I_L + I_2'$ , где  $I_L$  – намагничивающий ток;  $I_2'$  – приведенное в первичную обмотку значение тока нагрузки  $I_2$ . Для намагничивающего тока справедливы соотношения

$$I_L = \frac{H l_{\text{ср}}}{W_1} = \frac{\Delta B l_{\text{ср}}}{\mu_{\text{и}} \mu_0 \omega_1} = \frac{U_1 t l_{\text{ср}}}{\mu_{\text{и}} \mu_0 W_1^2 S} = \frac{U_1 t}{L}, \quad (2.6)$$

где  $\mu_{\text{и}}$  – действующая в импульсном режиме магнитная проницаемость;  $\mu_0$  – магнитная постоянная (в системе СИ  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ ),

$L = \frac{\mu_{\text{и}} \mu_0 \omega_1^2 S}{l_{\text{ср}}}$  – индуктивность намагничивания сердечника (для идеализированного трансформатора равна индуктивности первичной обмотки).

Из формулы (2.6) видно, что если бы  $\mu_{\text{и}} = \text{const}$ , то ток  $I_L$  нарастал бы со временем по линейному закону. Однако на самом деле закон изменения  $I_L$  нелинеен и связан с законом изменения  $H(t)$  при линейном характере  $\Delta B(t)$ , т. е. определяется в конечном счете петлей гистерезиса сердечника.

После воздействия серии однополярных импульсов перемагничивание сердечника будет происходить по частному циклу (рис. 2.1), причем в этом режиме импульсная магнитная проницаемость  $\mu_{\text{и}} = \Delta B / \Delta H_{\mu_0}$  оказывается значительно меньше магнитной проницаемости на предельном цикле, измеренной при воздействии на трансформатор двухполярного напряжения симметричной формы. Поэтому для импульсных трансформаторов не рекомендуется использовать сердечники с прямоугольной петлей гистерезиса.

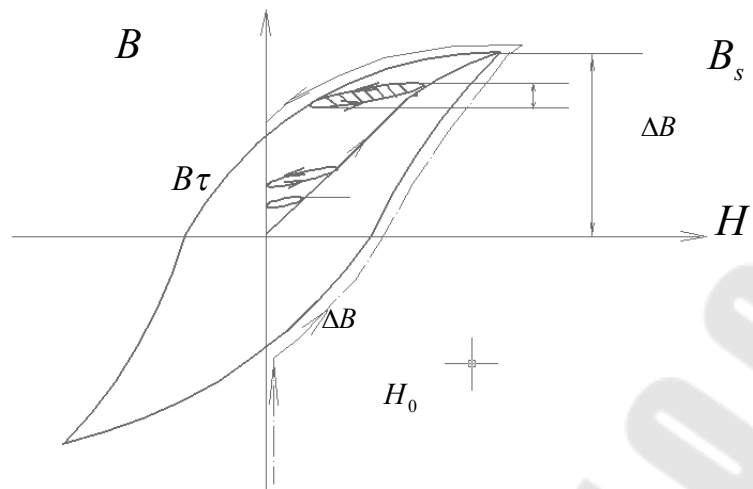
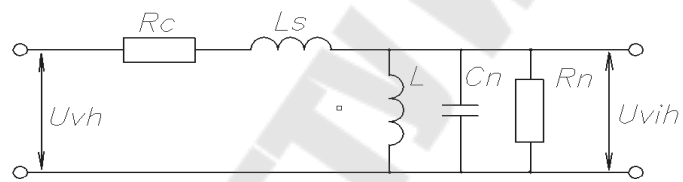
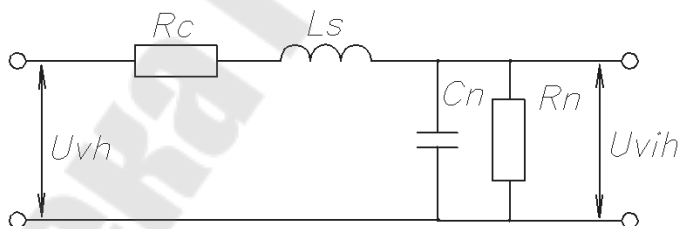


Рис. 2.1. Изменение индукции в импульсном трансформаторе

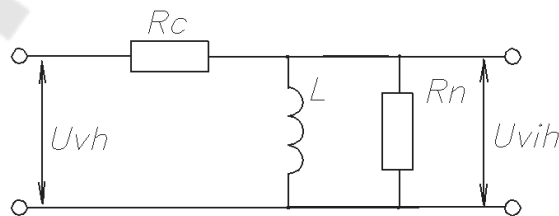
При анализе переходных процессов в импульсном трансформаторе на практике используют упрощенную эквивалентную схему замещения (рис. 2.2).



а)



б)



в)

Рис. 2.2. Упрощенные эквивалентные схемы импульсных трансформаторов

На рис. 2.2 приняты следующие обозначения:  $R_c$  – суммарное эквивалентное сопротивление источника сигнала и обмоток трансформатора;  $R'_H$  – приведенное сопротивление нагрузки;  $L_s$  – индуктивность рассеяния;  $L$  – индуктивность намагничивания сердечника;  $C_{\Pi}$  – эквивалентная паразитная емкость, учитывающая распределенную емкость цепей трансформатора.

Для упрощения анализа формы выходного импульса трансформатора обычно рассматривают отдельно формирование фронта и вершины импульса [1], [2]. При анализе фронта учитывают, что ток  $I_L$  в индуктивности намагничивания не успевает за короткое время нарасти до уровня насыщения, и принимают  $L = \infty$  (рис. 2.2, б). В случае расчета искажения вершины импульса можно пренебречь влиянием  $L_s$  и  $C_{\Pi}$  (рис. 2.2, в), поскольку токи и напряжения при этом изменяются сравнительно медленно.

Импульсный трансформатор правильно воспроизводит входной импульс, если обеспечить примерно линейное изменение индукции во времени. Однако при больших значениях  $t_{и}$  сердечник может выйти в область насыщения (рис. 2.1), в которой малым приращением индукции соответствуют большие приращения напряженности магнитного поля. При этом резко увеличивается величина тока  $I_L$ , поскольку падает магнитная проницаемость сердечника и соответственно значение  $L$ . Учитывая, что спад вершины трансформируемого импульса определяется величиной  $\tau = L / R'_H \parallel R'_c$ , можно видеть, что в случае выхода сердечника в область насыщения выходной импульс будет резко искажаться.

Максимальную длительность передаваемого импульса можно определить, учитывая, что возможное изменение индукции ограничено величиной  $\Delta B_{\max} = B_s - B_r$ . Тогда, используя формулу (2.3), находим:

$$t_{и.макс} = \frac{W_1 S (B_s - B_r)}{U_1}. \quad (2.7)$$

### Описание лабораторного стенда

Схема лабораторного стенда приведена на рис. 2.3. В схеме приняты следующие обозначения: TV – исследуемый трансформатор; VT – ключевой транзистор;  $C_d$  – дополнительная емкость; Г. И. – генератор импульсов; VD – диод обратного тока (предотвращает пере-

напряжения на транзисторе);  $R_{ш}$  – фунтовый резистор (для наблюдения формы тока в обмотке трансформатора);  $R_c$  – согласующий резистор;  $R_H$  – сопротивление нагрузки.

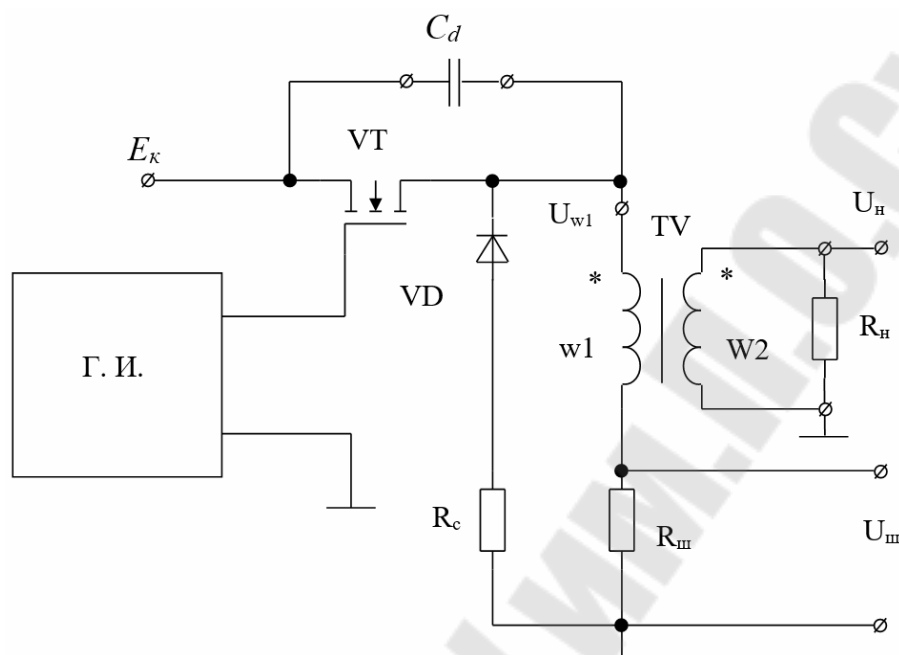


Рис. 2.3. Схема лабораторного стенда

При подаче отпирающего импульса с генератора импульсов транзистор VT включается и подключает первичную обмотку трансформатора к источнику питания  $E_k$ . Индукция в сердечнике начинает практически линейно возрастать от значения  $B_r$ . Напряженность  $H$  при этом будет также увеличиваться в соответствии с характеристикой сердечника. Поскольку диод VD в этом режиме закрыт, коллекторный ток, равный току в первичной обмотке, определяется суммой токов  $I_L$  и  $I'_2$ , который будет увеличиваться по примерно линейному закону. Максимальное значение тока  $I_L$  будет в момент окончания импульса. При запираании транзистора ток  $I_L$  спадает до нуля, однако индуктивный ток в обмотке  $W_1$  не может мгновенно исчезнуть, так как в сердечнике запасена магнитная энергия. Поэтому на обмотках трансформатора возникает ЭДС самоиндукции, препятствующая уменьшению тока  $I_L$ . Это приводит к тому, что напряжение на коллекторе запертого транзистора имеет выброс, поскольку полярность ЭДС  $U_B$ , наводимой в обмотке  $W_1$ , складывается с напряжением питания, таким образом, в процессе выключения  $U_{с.и} \approx U_B + E_k$ .

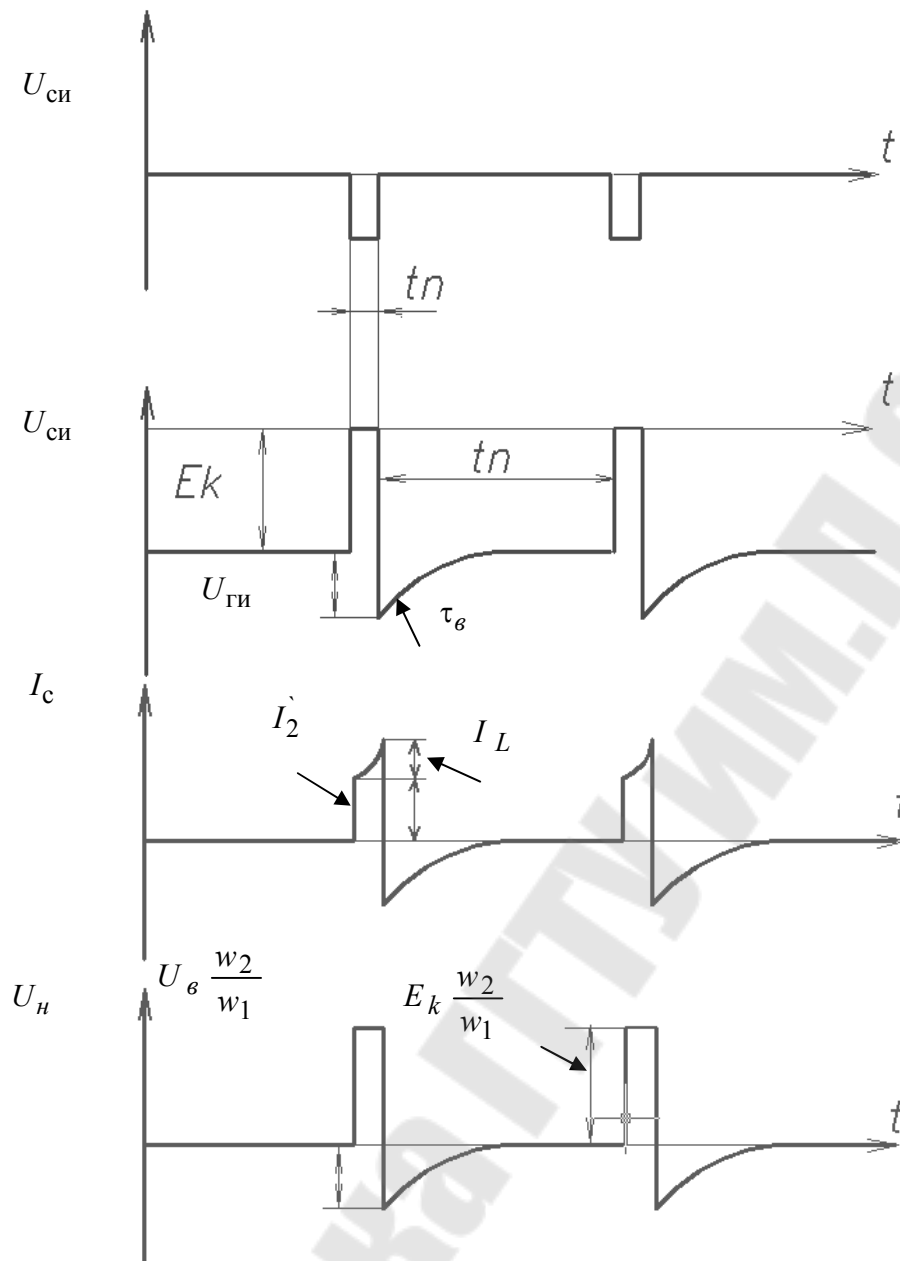


Рис. 2.4. Временные диаграммы работы импульсного трансформатора

Значение напряжения при этом может превысить максимально допустимое для транзистора VT. Для предотвращения пробоя транзистора параллельно обмотке  $W_1$  подключена цепь VD  $R_c$ , в режиме накопления энергии в трансформаторе диод закрыт и открывается при выключении транзистора. Эквивалентная схема замещения трансформатора на стадии восстановления исходного состояния сердечника представляет собой параллельный контур из индуктивности  $L$  и паразитной межвитковой емкости  $C_{\text{п}}$  первичной обмотки, шунтированный сопротивлением  $R''_{\text{н}} = R'_{\text{н}} // R_c$ . Из анализа следует, что при

$R''_H = R_{кр} = 0,5\sqrt{L/C_{\Pi}}$  переходный процесс находится на границе колебательного и апериодического. В большинстве практических случаев  $R''_H < R_{кр}$  (чему способствует правильный выбор величины  $R_c$ ) выброс на коллекторе транзистора имеет характер, близкий к экспоненциальному с постоянной времени  $\tau_B = L/R''_H \approx L/R_c$ . Амплитуда выброса при этом  $U_{в.макс} = I_L(t_{и})R'_H \approx I_L(t_{и})R_c$ .

Следует иметь также в виду, что уменьшение  $R_c$  приводит к затягиванию выброса. Для полного восстановления исходного состояния сердечника необходимо, чтобы длительность выброса ( $\approx 3\tau_B$ ) была меньше длительности паузы  $t_{п}$  между импульсами. Поэтому величина  $R_c$  ограничена и снизу:  $R_c > 3L/t_{п}$ .

При выборе числа витков обычно задаются значением тока  $I_L(t_{и})$  и из выражения (2.6) находят требуемую индуктивность. Во всяком случае необходимо, чтобы

$$W_1 > \frac{E_k t_{и}}{S(B_s - B_r)}. \quad (2.8)$$

**Экспериментальное определение параметров трансформатора.** Одним из простых способов оценки величин  $L$ ,  $C_{\Pi}$  и  $L_s$ , не требующим сложного оборудования и допускающим оценку параметров в работающей схеме, является исследование затухающих колебаний, возникающих в резонансном контуре. Для этого трансформатор переводят в режим ударного возбуждения колебаний и измеряют их частоту ( $f_1$ ). Затем к зажимам трансформатора подключают дополнительный конденсатор известной емкости  $C_d$ , и снова измеряют частоту ( $f_2$ ). Для определения индуктивности первичной обмотки и ее паразитной межвитковой емкости  $C_{\Pi}$  можно воспользоваться системой уравнений:

$$\begin{cases} 2\pi f_1 = \frac{1}{\sqrt{LC_{\Pi}}}; \\ 2\pi f_2 = \frac{1}{\sqrt{L(C_{\Pi} + C_d)}}. \end{cases} \quad (2.9)$$

При определении индуктивности рассеяния обмотки и ее паразитной емкости необходимо предварительно убедиться в отсутствии затухающих колебаний на вторичных обмотках трансформатора. По-



сле этого определяют частоты ( $f_1$ ) и ( $f_2$ ) затухающих колебаний на зажимах первичной обмотки, подключая к последней конденсатор  $C_d$ . Полученное в результате решения системы уравнений значение  $L$  представляет собой индуктивность рассеяния, а величина  $C_{\text{п}}$  – межвитковую паразитную емкость вторичной обмотки.

Решая систему относительно  $L$  и  $C_{\text{п}}$ , можно получить выражения для определения паразитных параметров:

$$C_{\text{п}} = \frac{1}{4\pi^2 f^2 L};$$
$$L = \left( \frac{1}{4\pi^2 f_2^2} - \frac{1}{4\pi^2 f_1^2} \right) \frac{1}{C_d}. \quad (2.10)$$

### Ход работы

#### ***1. Определение паразитных параметров импульсного трансформатора:***

1. Не включая стенд, установить минимальную длительность импульсов генератора импульсов.

2. Во избежание накопления электромагнитной энергии в паразитных компонентах вторичной обмотки при измерении параметров первичной нагрузки вторичной обмотки необходимо отключить.

3. Определить индуктивность и паразитную межвитковую емкость первичной обмотки (подключив к выводам первичной обмотки конденсатор  $C_d$  емкостью 200–1000 пикофард и проделав вычисления по формулам (2.9), (2.10)).

4. Найти (при отключенной дополнительной емкости) критическое сопротивление, которое нужно подключить параллельно первичной обмотке, чтобы переходной процесс  $U_c$  был на границе колебательного. Для этого к выводам первичной обмотки подключить переменное сопротивление, изменяя которое установить переходной процесс при выключении транзистора на границе колебательного и апериодического, и затем омметром измерить величину сопротивления.

5. Зарисовать осциллограммы напряжения при наличии указанного сопротивления и без него.

6. Подключить цепь VD  $R_c$  и убедиться в отсутствии высокочастотных колебаний на первичной обмотке. Определить индуктивность

рассеяния и паразитную межвитковую емкость вторичной обмотки, подключив известную емкость к вторичной обмотке.

7. Подключить к вторичной обмотке нагрузку, равную критическому сопротивлению.

**2. Определение предельной длительности импульса.** Для согласованной схемы, полученной при выполнении предыдущих пунктов, определить максимальную длительность передаваемого импульса. Для этого, плавно изменяя длительность импульсов Г. И., зафиксировать максимальную длительность по выходу сердечника в область насыщения по резкому искажению импульса  $U_H$  – напряжения на нагрузке.

Зарисовать осциллограммы напряжения на нагрузке и тока (напряжение шунта –  $U_{ш}$ ) в режиме предельной длительности импульса и при уменьшении длительности на 80 %.

Зарисовать осциллограммы токов и напряжений при отключенной нагрузке.

### Контрольные вопросы

1. Пояснить назначение цепочки VD  $R_c$ .
2. В каком режиме работает сердечник импульсного трансформатора?
3. Как связано максимальное напряжение на обмотках трансформатора с длительностью импульса?
4. В чем причина выброса, возникающего на коллекторе транзистора при запираии?
5. Как определить индуктивность первичной обмотки?
6. Каково максимальное значение тока  $I_{W1}$  и  $I_{W2}$ ?
7. Как рассчитать изменения индукции и напряженности магнитного поля в сердечнике?
8. Как зависят параметры обратного выброса от сопротивления нагрузки?
9. Как определить эквивалентную межвитковую емкость первичной обмотки импульсного трансформатора?
10. Как определить импульсную магнитную проницаемость?
11. Как рассчитать количество витков импульсного трансформатора?
12. Как экспериментально определить максимально возможную длительность импульса, передаваемого трансформатором?

### Лабораторная работа № 3

## ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ РЕЛЕ

**Цель работы:** изучить конструкцию электромагнитных реле, их условные обозначения на схемах. Исследовать свойства реле и измерить их электрические параметры.

### Основные теоретические сведения

Электрические реле широко применяются в промышленной электронике и автоматике. Электрическим реле называют коммутационное устройство, предназначенное производить скачкообразные изменения тока в управляемых цепях при заданных значениях входных величин. Электрические реле по принципу действия делятся на электромагнитные, магнитоэлектрические, электродинамические, индукционные и др. Самым простым по конструкции и поэтому больше всего применяемым является электромагнитное реле. Схематический чертеж конструкции реле такого типа приведен на рис. 3.1.

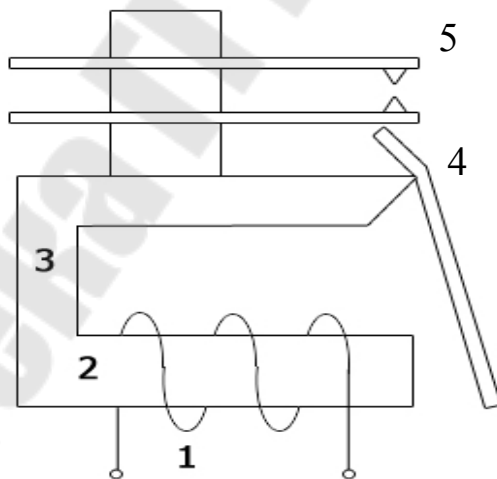


Рис. 3.1. Чертеж конструкции электромагнитного реле

Электромагнитное реле состоит из следующих частей (рис. 3.1): обмотки реле 1, которая создает магнитный поток; сердечника 2; ярма 3, служащего для проведения магнитного потока; подвижной части 4, называемой якорем, которая приводится в действие электромагнитным потоком и в свою очередь воздействует на исполнительный ор-

ган – контакты 5. Притяжение якоря к сердечнику и замыкание контактов называется срабатыванием реле, при прекращении тока в обмотке якорь реле возвращается в исходное состояние, контакты размыкаются – это называется отпуском реле.

В зависимости от рода тока, питающего обмотку, различают реле постоянного и переменного тока. Реле постоянного тока в свою очередь подразделяют на нейтральные и поляризованные. Срабатывание нейтрального реле не зависит от направления тока в его обмотке, а у поляризованного – существует однозначная взаимосвязь между контактами, характером срабатывания и направлением тока в обмотке. Большинство электромагнитных реле являются нейтральными, поэтому слово «нейтральное» в наименовании реле опускается.

Контакты реле по принципу действия могут быть замыкающими, нормально разомкнутыми, нормально замкнутыми и переключающими (рис. 3.2).

Термин «нормально» относится к обесточенному состоянию катушки реле.

Замыкающий контакт изображен на рис. 3.2, а.

Размыкающий контакт (р) замкнут в исходном (обесточенном) состоянии и размыкается при срабатывании реле (рис. 3.2, б).

Переключающий контакт (п) размыкает одну электрическую цепь и замыкает другую при срабатывании реле (рис. 3.2, в).

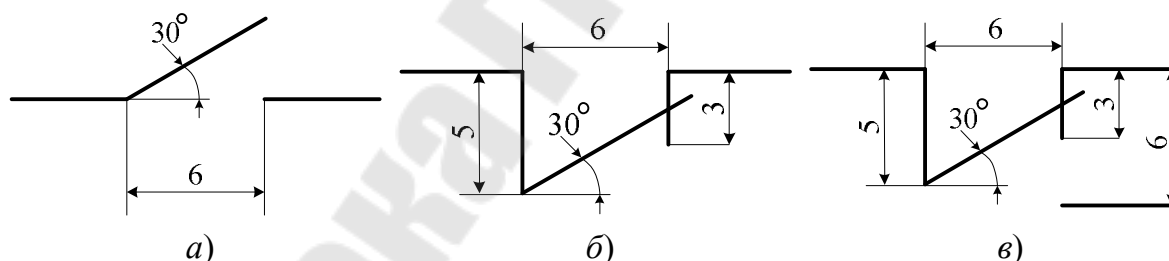


Рис. 3.2. Схемы контактов реле

Реле может иметь несколько различных контактов, причем на схемах изображения его контактов могут располагаться в различных местах, обычно рядом с коммутирующими цепями. В этом случае принадлежность контактов к тому или иному реле указывают в позиционном обозначении контактов. Например: обозначение К1.2 следует понимать как обозначение контактов реле К1 2-й контактной группы.

Различают три состояния реле: покой, рабочее и переходное состояние, и в соответствии с этим определяются следующие эксплуатационные параметры реле:

1. Электрические: чувствительность, рабочий ток (напряжение), ток (напряжение) срабатывания, ток (напряжение) отпускания, сопротивление обмотки, сопротивления контактов, коммутационная способность, электрическая изоляция.

2. Временные параметры: время срабатывания, время отпускания, время «дребезга» контактов.

Чувствительность – способность реле срабатывать при определенном значении мощности, подаваемой в обмотку реле. Чувствительность реле как параметр в технической документации не приводится, а определяется по току срабатывания и сопротивлению обмотки:

$$P_{\text{ср}} = I_{\text{ср}}^2 R_{\text{обм}} = \frac{U_{\text{ср}}^2}{R_{\text{обм}}}, \quad (2.1)$$

где  $I$  – ток (напряжение) срабатывания;  $R_{\text{обм}}$  – сопротивление обмотки.

При сравнении между собой различных типов реле, а также при выборе и применении их в аппаратуре высокочувствительными считаются реле, срабатывающие при мощности  $P_{\text{ср}} < 1$  Вт, реле средней чувствительности  $1 < P_{\text{ср}} < 10$  Вт и малочувствительные реле  $P_{\text{ср}} > 10$  Вт.

Ток (напряжение) срабатывания  $I_{\text{ср}} (U_{\text{ср}})$  определяет чувствительность реле и характеризует ее при питании обмотки минимальным током (напряжением). При этом токе (напряжении) реле должно сработать, т. е. переключить все контакты.

Ток (напряжение) отпускания  $I_{\text{опт}} (U_{\text{опт}})$  определяется значениями, при которых якорь реле возвращается в исходное положение при снятии напряжения в обмотке.

Отношение тока отпускания к току срабатывания называется коэффициентом возврата:

$$K_{\text{воз}} = \frac{I_{\text{опт}}}{I_{\text{ср}}}. \quad (2.2)$$

Значения  $K_{\text{воз}}$  у различных типов реле колеблется в широких пределах: от 0,1 до 0,96.

Рабочий ток (напряжение) обеспечивает нормальное функционирование реле в аппаратуре. Рабочий ток установлен техническими условиями для конкретного типа реле и обычно намного больше тока срабатывания. Это обеспечивает надежное удержание якоря в тряске и вибрации реле в аппаратуре. Однако при большом рабочем токе

происходит сильный нагрев обмотки, который не должен превышать допустимых значений.

Отношение рабочего тока к току срабатывания называется коэффициентом запаса по току:

$$K_3 = \frac{I_p}{I_{cp}}$$

Обычно  $K_3$  находится в пределах от 1,5 до 3. Чем он больше, тем быстрее срабатывает реле и надежнее удерживается якорь в притянутом состоянии.

Сопротивление обмотки – активное сопротивление обмотки, измеренное на постоянном токе при температуре окружающей среды 20 °С.

Сопротивление контактов состоит из сопротивления контактирующих поверхностей и сопротивления элементов цепи контактов (пружины, токопроводящие выводы). Практически измерить сопротивление контактирующих поверхностей в реле очень трудно, поэтому значение сопротивления контактов оценивают по сопротивлению всей цепи контактов. Сопротивление контактов измеряется при токе  $(10 \pm 1)$  мА для реле, у которых ток нагрузки не превышает 100 мА, и  $(100 \pm 10)$  мА для реле, у которых ток нагрузки превышает 1000 мА.

Коммутационная способность контактов реле характеризуется значением коммутируемой им мощности, при которой контакты выполняют определенное число коммутаций. Следует иметь в виду, что значение коммутируемой мощности существенно влияет на электрическую эрозию контактов. В основном она проявляется при токе больше 100 мА. При токах менее этого значения электрическая эрозия, как правило, не возникает и основное влияние на работоспособность реле оказывает механический износ контактов и подвижной системы.

В технической документации на реле указывается диапазон коммутируемых токов и напряжений, в пределах которого гарантируется определенное число коммутаций.

Электрическая изоляция реле – способность изоляции выдерживать длительно или кратковременно перенапряжения, возникающие в процессе эксплуатации аппаратуры. Изоляция реле определяется электрической плотностью воздушных промежутков (межконтактных зазоров) и поверхности диэлектрика платы реле. Электроизоляционные свойства реле оцениваются сопротивлением изоляции реле.

Временные параметры реле характеризуют поведение реле в переходном режиме из состояния покоя в рабочее и обратно.

Время срабатывания  $t_{cp}$  – это время, прошедшее после подклю-

чения обмотки реле к источнику питания до замыкания замыкающих контактов.

Время отпущения  $t_{от}$  – промежуток времени от момента снятия питания с обмотки до момента замыкания размыкающих контактов.

По времени срабатывания и отпущения якоря реле подразделяют на быстродействующие ( $t_{ср} < 0,001$  с), нормальнодействующие ( $0,001 < t_{ср} < 0,01$  с) и медленнодействующие ( $0,1 < t_{ср} < 1$  с).

### Описание стенда исследования параметров электромагнитного реле

Электрическая схема стенда представлена на рис. 3.3.

Стенд содержит:

– управляемый источник постоянного напряжения  $U_{источн}$  с диапазоном регулирования выходного напряжения 1,5–19 В;

– генератор прямоугольных импульсов с постоянной частотой 10 Гц. Выход генератора управляет электронным ключом Кл.

Внутренняя электрическая схема стенда представлена на рис. 3.3.

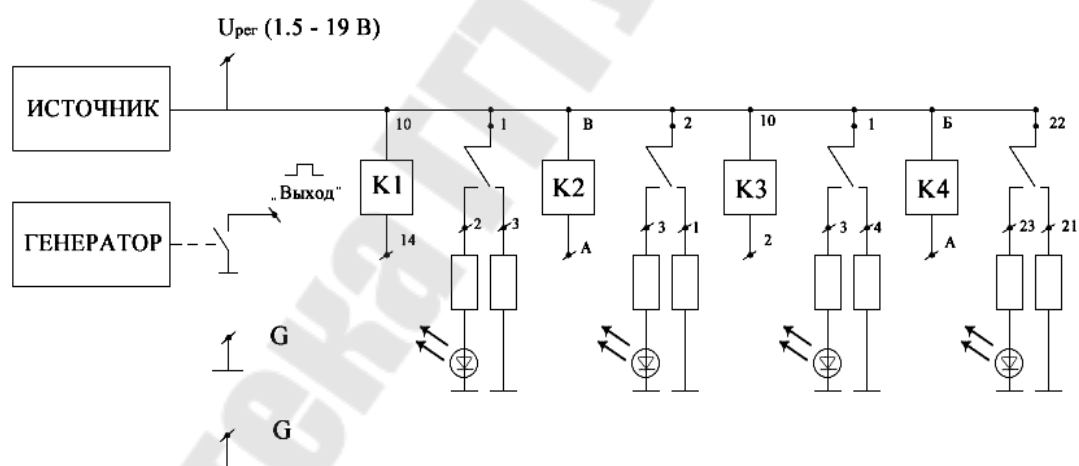


Рис. 3.3. Внутренняя электрическая схема стенда

Подключение исследуемого реле производится при помощи пемрычки, соединяющей обмотку реле с корпусом (при исследовании статических режимов) или с выходом электронного ключа (при исследовании динамических характеристик «Выход»).

## Ход работы

### 1. Исследование статических параметров:

- подключить обмотку исследуемого реле к источнику;
- к клемме  $U_{\text{рег}}$  подключить вольтметр;
- плавно изменяя в сторону увеличения напряжение регулируемого источника, определить напряжение срабатывания реле. Момент срабатывания контролировать по зажиганию контрольного светодиода, подключенного к замыкающей группе контактов. Опыт необходимо повторить не менее пяти раз и определить среднее значение измеряемой величины;
- аналогично произвести измерение напряжения отпускания.

По результатам измерений определить параметры реле: коэффициент запаса и коэффициент возврата.

### 2. Исследование динамических параметров:

- соединить выход электронного ключа (клемма «Выход») с обмоткой исследуемого реле;
- вход первого канала осциллографа подключить к выходу электронного ключа, включить синхронизацию по первому каналу в ждущем режиме;
- вторым каналом исследовать процесс включения (отключения) контактов. Исследовать зависимость времени переключения от напряжения источника.

В этом случае на осциллографе будет осциллограмма, аналогичная рис. 3.4.

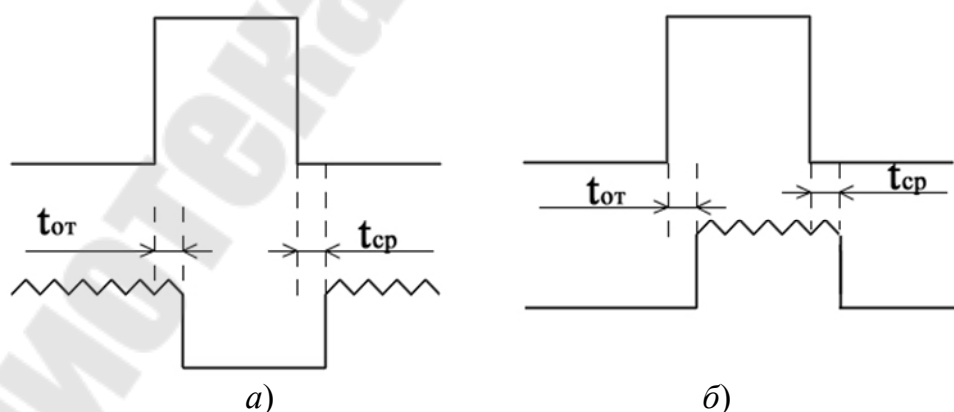


Рис. 3.4. Осциллограмма напряжения на электрическом ключе и контактах реле: *а* – замыкающая группа контактов; *б* – размыкающая группа контактов



В данном опыте необходимо выполнить измерение  $t_{\text{ср}}$  и  $t_{\text{отп}}$  для разных напряжений, начиная с напряжения срабатывания и до 19 В с шагом 1–2 В.

*Примечание.* Спад напряжения на электронном ключе соответствует моменту включения. Нарастание напряжения на электронном ключе соответствует моменту выключения реле.

### 3. Исследование явления «дребезга» контактов.

Подключить первый канал осциллографа к замыкающей группе контактов и зарисовать форму напряжения в момент замыкания. Время развертки при этом установить 1–0,2 микросекунд, режим однократной синхронизации – по фронту импульса.

Исследовать зависимость времени «дребезга» от напряжения на катушке у различных типов реле.

## Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать: наименование и цель работы; условное графическое изображение в схемах; схему измерения параметров реле; измеренные и вычисленные параметры реле; осциллограммы напряжения на замыкающих (размыкающих) контактах.

## Контрольные вопросы

1. Какое электротехническое устройство называют электромагнитным реле?
2. Как устроено электромагнитное реле?
3. Как изображаются реле на схемах?
4. Какими электрическими параметрами характеризуется реле?
5. Какими временными параметрами характеризуется реле?

## **ИЗУЧЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

**Цель работы:** изучить конструкцию универсального коллекторного двигателя и приобрести практические навыки в сборке схемы и включении двигателя, а также в опытном исследовании и построении его рабочих характеристик; получить экспериментальное подтверждение теоретическим сведениям о свойствах универсального коллекторного двигателя.

### **Краткие теоретические сведения**

**Описание конструкции коллекторного двигателя постоянного тока (ДПТ).** Этот двигатель можно также назвать синхронной машиной постоянного тока с самосинхронизацией. Статор ДПТ является индуктором. В простейшем случае статор имеет два полюса, т. е. один магнит с одной парой полюсов. Но чаще ДПТ имеют две пары полюсов, бывает и более. Помимо основных полюсов на статоре (индукторе) могут устанавливаться добавочные полюса, которые предназначены для улучшения коммутации. На статоре ДПТ располагаются в зависимости от конструкции или постоянные магниты, или электромагниты с обмотками возбуждения (катушками, наводящими магнитный поток возбуждения).

Ротор состоит из электромагнитов с переключаемой полярностью датчика положения ротора и переключателя (в обычных машинах это функции коллектора). В простейшем случае ротор состоит из одного электромагнита с двумя полюсами, т. е. имеет одну пару полюсов, при этом есть две «мертвые точки», из которых невозможен запуск двигателя.

Ротор с тремя полюсами (условно полторы пары) имеет наименьшее число полюсов ротора, при которых самозапуск возможен из любого положения ротора. На самом деле один полюс все время находится в зоне коммутации, т. е. ротор имеет неявные две пары полюсов.

Ротор любого ДПТ состоит из многих катушек, на часть которых подается питание в зависимости от угла поворота ротора относительно статора. Применение большого числа (несколько десятков) катушек необходимо для уменьшения неравномерности крутящего

момента, для уменьшения коммутируемого (переключаемого) тока и для обеспечения оптимального взаимодействия между магнитным полем статора и током в обмотке якоря (т. е. для создания максимального момента на роторе).

Коллектор (щеточно-коллекторный узел) выполняет одновременно две функции: является датчиком углового положения ротора и переключателем тока со скользящими контактами. Выводы всех катушек объединяются в коллекторный узел. Коллекторный узел обычно представляет собой кольцо из изолированных друг от друга пластин-контактов (ламель), расположенных по оси (вдоль оси) ротора.

Электрическая схема замещения коллекторного двигателя приведена на рис. 4.1, где  $R_{щ}$  – сопротивление щеточного контакта;  $r_{я}$  – сопротивление обмотки якоря;  $e_{я}$  – противо-ЭДС якорной обмотки;  $L_{я}$  – индуктивность обмотки якоря;  $L_{в}$  и  $R_{в}$  – индуктивность и активное сопротивление обмотки возбуждения.

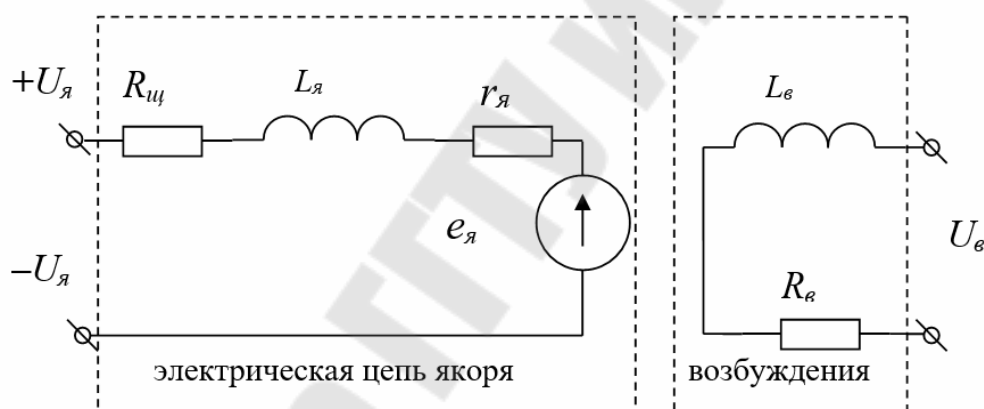


Рис. 4.1. Схема замещения коллекторного двигателя

Для двигательного режима при наличии тока в обмотке возбуждения, протекание тока в обмотке якоря приводит к возникновению вращающего момента. В соответствии с принципом (1.3) величина момента:

$$M = \kappa I_{я} \Phi_{в}, \quad (4.1)$$

где  $\kappa$  – конструктивная постоянная машины;  $I_{я}$  – ток якоря;  $\Phi_{в}$  – магнитный поток статора  $\Phi_{в} = \kappa_{\phi} I_{в}$ .

В свою очередь перемещение якорной обмотки в магнитном поле статора приводит к возникновению ЭДС, направленной встречно приложенному напряжению, в соответствии с (4.2):

$$e_{\text{я}} = k\Phi_{\text{в}}\omega, \quad (4.2)$$

где  $\omega$  – скорость вращения якоря.

Окончательно описание электромеханических процессов в ДПТ независимого возбуждения:

$$\left. \begin{aligned} U_{\text{в}} &= R_{\text{в}}I_{\text{в}} + L_{\text{в}}\frac{dI_{\text{в}}}{dt}; \\ U_{\text{я}} &= (R_{\text{щ}} + r_{\text{я}})I_{\text{я}} + L_{\text{я}}\frac{dI_{\text{я}}}{dt} + \omega k\Phi_{\text{в}}; \\ M &= k\Phi_{\text{в}}I_{\text{я}}. \end{aligned} \right\} \quad (4.3)$$

Выражение, описывающее статическую механическую характеристику двигателя постоянного тока независимого возбуждения:

$$\omega = \frac{U_{\text{я}}}{k\Phi_{\text{в}}} - \frac{(R_{\text{щ}} + r_{\text{я}})M}{(k\Phi_{\text{в}})^2}. \quad (4.4)$$

Частота вращения пропорциональна приложенному напряжению и обратно пропорциональна потоку.

Для двигателя последовательного возбуждения ток возбуждения равен току якоря, поэтому  $\Phi_{\text{в}} = k_{\text{ф}}I_{\text{в}}$  и соответствующий момент:

$$M = k \cdot k_{\text{ф}}I_{\text{я}}^2. \quad (4.5)$$

**Классификация ДПТ по способу создания рабочего потока статора:**

- с постоянными магнитами;
  - с электромагнитами возбуждения:
    - а) с независимым включением обмоток якоря и возбуждения (независимое возбуждение);
    - б) с последовательным включением обмоток якоря и возбуждения (последовательное возбуждение);
    - в) с параллельным включением обмоток (параллельное возбуждение);
    - г) со смешанным включением обмоток (смешанное возбуждение).
- Вид подключения обмоток статора и якоря определяет рабочие характеристики электродвигателя.

**Изучение конструкции и параметров универсального коллекторного двигателя.** Универсальный коллекторный двигатель является коллекторным электродвигателем постоянного тока с последовательно включенными обмотками возбуждения (статора), оптимизированным для работы на переменном токе. Такой тип двигателя независимо от полярности подаваемого напряжения вращается в одну сторону, так как за счет последовательного соединения обмоток статора и ротора смена полюсов их магнитных полей происходит одновременно и результирующий момент остается направленным в одну сторону. Фазовый сдвиг между магнитным потоком и током в обмотке, вызванный потерями в стали, нарушает синхронизацию между током ротора и потоком статора. Нарушение синхронизации снижает коэффициент полезного действия универсального двигателя в сопоставлении с режимом постоянного тока. С целью повышения эффективности при работе на переменном токе магнитную систему статора делают шихтованной.

### **Программа работы**

1. Ознакомиться с конструкцией двигателя и нагрузочным устройством; записать паспортные данные двигателя и данные измерительных приборов.
2. Собрать схему, изображенную на рис. 4.2, и после проверки ее преподавателем выполнить пробный пуск двигателя на постоянном и переменном токах.
3. Выполнить измерения, позволяющие построить рабочие характеристики двигателя для случаев его работы от сети постоянного тока и от сети переменного тока.
4. Собрать схему исследования двигателя постоянного тока независимого возбуждения, изображенную на рис. 4.3, и после проверки ее преподавателем выполнить пробный пуск двигателя на постоянном токе.
5. Выполнить измерения, позволяющие построить рабочие характеристики двигателя независимого возбуждения.
6. Составить отчет и сделать заключение о проделанной работе.

### **Ход работы**

**1. Схема соединений и пробный пуск.** Универсальные коллекторные двигатели по своему устройству почти не отличаются от

двигателей постоянного тока последовательного возбуждения. Разница состоит в том, что магнитная система универсальных двигателей делается полностью шихтованной из тонколистовой электротехнической стали. На двух явно выраженных полюсах универсального двигателя располагают полюсные катушки ( $L_B$ ), соединенные последовательно между собой и с обмоткой якоря (рис. 4.2).

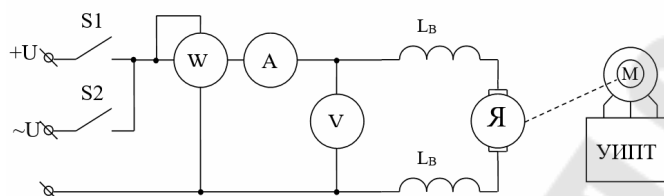


Рис. 4.2. Схема подключения универсального коллекторного двигателя

Универсальные двигатели выполняются на небольшую мощность, несмотря на последовательное возбуждение, их можно включать без предварительной нагрузки на валу и пусковых токоограничивающих резисторов. Ограничение пускового тока происходит за счет индуктивного сопротивления обмоток возбуждения, а ограничение скорости вращения у машин малой мощности – за счет добавочных потерь.

На схеме рис. 4.2 включение двигателя выполняется либо контактором  $S_1$  (в сеть постоянного тока), либо контактором  $S_2$  (в сеть переменного тока).

После сборки схемы производят пробный пуск двигателя на постоянном токе (включением  $S_1$ ), а затем на переменном токе (включением  $S_2$ ). При каждом включении следует проверить возможность регулировки частоты вращения двигателя изменением подводимого к двигателю напряжения.

**2. Рабочие характеристики двигателя последовательного возбуждения.** Включают двигатель в сеть постоянного тока по схеме рис. 4.2 и нагружают его до номинального тока нагрузки  $I = I_{\text{ном}}$ . Затем постепенно разгружают двигатель до режима холостого хода и приблизительно через одинаковые интервалы тока нагрузки записывают показания приборов в табл. 4.1. Напряжение питания двигателя следует поддерживать постоянным.

Таблица 4.1

Номер измерения	Измерения				Вычисления		
	$U, В$	$I, А$	$n, об/мин$	$M_2, Н \cdot м$	$P_1 = UI, Вт$	$P_2 = M\omega, Вт$	$H = (P_2/P_1)100 \%$

Затем отключают двигатель от сети постоянного тока и включают его в сеть переменного тока. Опыт повторяют, и показания приборов заносят в табл. 4.2. Как в первом случае, так и во втором напряжение питания следует поддерживать постоянным.

Таблица 4.2

Номер измерения	Измерения					Вычисления		
	$U, В$	$I, А$	$n, об/мин$	$M_2, Н \cdot м$	$P_1, Вт$	$S = UI, ВА$	$P_2 = M_2\omega, Вт$	$\eta = (P_2/P_1)100 \%$

**3. Измерение рабочих характеристик двигателя независимо возбуждения.** Собрать схему (рис. 4.3).

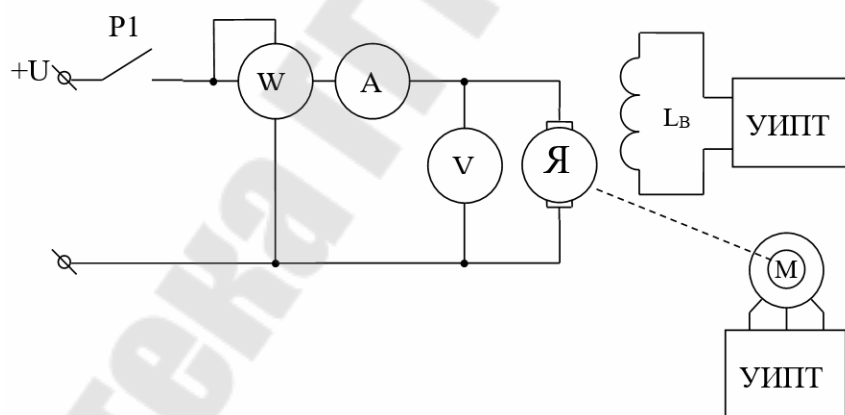


Рис. 4.3. Схема подключения коллекторного двигателя постоянного тока независимо возбуждения

Установить ток возбуждения в обмотке  $L_B$  в соответствии с рекомендуемым преподавателем. Выполнить измерения рабочей характеристики. Результаты измерений занести в табл. 4.3.

Выполнив необходимые вычисления, заполнить табл. 4.1 и 4.2. По результатам строят рабочие характеристики двигателя при его работе на постоянном и переменном токах: зависимость частоты вра-

щения  $n$ , потребляемого тока  $I$ , полезной мощности  $P_2$  и КПД  $\eta$  от момента на валу  $M_2$ . Все графики строят в одних осях координат в относительных единицах, при этом одноименные графики изображают разным цветом (разным типом линий).

### **Анализ результатов лабораторной работы**

В первую очередь устанавливают, соответствуют ли номинальные данные универсального двигателя на постоянном и переменном токах, полученные опытным путем, его паспортным данным.

Затем путем сравнения одноименных графиков рабочих характеристик двигателя при его работе на постоянном и переменном токах выясняют, по каким параметрам свойства двигателя на постоянном токе отличаются от его свойств на переменном токе. При этом необходимо указать причины, обусловившие разницу этих параметров. Причину различия параметров требуется отметить в выводах по лабораторной работе.

### **Контрольные вопросы**

1. С какой целью магнитную систему универсального двигателя делают шихтованной?
2. Объяснить причины отличия рабочих характеристик двигателя с последовательным возбуждением и двигателя с независимым возбуждением.
3. Зачем при включении универсального двигателя в сеть переменного тока увеличивают напряжение питания?
4. Почему универсальные коллекторные двигатели делают только с последовательным возбуждением?
5. Почему при работе от сети переменного тока коэффициент полезного действия ниже, чем при работе от сети постоянного тока?
6. Почему на начальном участке зависимости КПД от момента происходит рост КПД, а после определенного значения его снижение?



## Лабораторная работа № 5

### ИЗУЧЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

**Цель работы:** изучить конструкцию и эксплуатационные характеристики трехфазного асинхронного двигателя. Приобрести навыки измерения эксплуатационных характеристик трехфазного асинхронного двигателя.

#### Краткие теоретические сведения

Название «асинхронный двигатель» произошло от характерной особенности этой электрической машины, заключающейся в разности скоростей вращения между скоростью вращения магнитного поля статора и вращением ротора.

Под действием тормозящего момента нагрузки ротор отстает от вращения магнитного поля статора. Это отставание, выраженное в относительных единицах, называют скольжением:

$$S = \frac{n_1 - n}{n_1}, \quad (5.1)$$

где  $n_1 = 60f/p$ , об/мин, – синхронная частота вращения поля статора;  $n$ , об/мин, – частота вращения ротора;  $f$  – частота сети;  $p$  – число пар полюсов, определяемое из обозначения двигателя.

Конструктивно асинхронный двигатель выполнен в виде двух обмоток, неподвижной обмотки статора и подвижной обмотки ротора. Вращающий момент создается в результате взаимодействия магнитного потока статора и тока в обмотке ротора. Соответствующая электрическая схема замещения асинхронного двигателя представлена на рис. 5.1, где приняты следующие обозначения:  $X_1, R_1$  – индуктивное (рассеяния) и активное сопротивление первичной обмотки;  $X'_2, R'_2$  – приведенные ( $R'_2 = n^2 R_2$ ) параметры вторичной обмотки;  $X_m, R_m$  – параметры цепи намагничивания;  $U_{1\phi}$  – фазное напряжение сети.

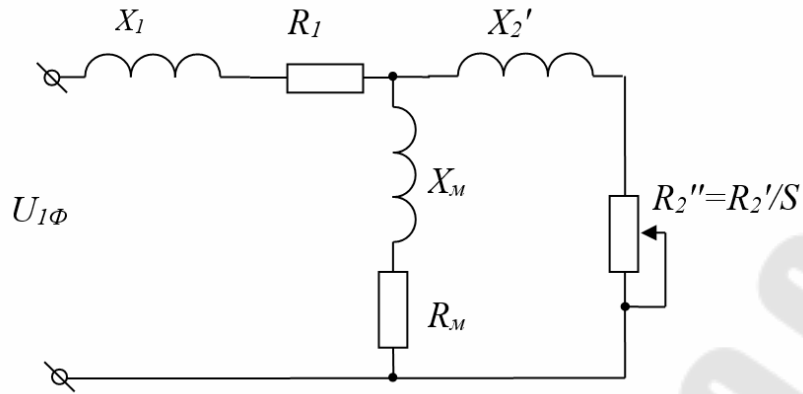


Рис. 5.1. Схема замещения асинхронного двигателя

Момент асинхронного двигателя пропорционален произведению магнитного потока на *активную* составляющую тока ротора, создаваемого этим потоком и скольжением. Это определяет следующие эксплуатационные особенности двигателя и статические характеристики асинхронного двигателя.

Для вывода уравнения механической характеристики асинхронного двигателя можно воспользоваться упрощенной схемой замещения, приведенной на рис. 5.2.

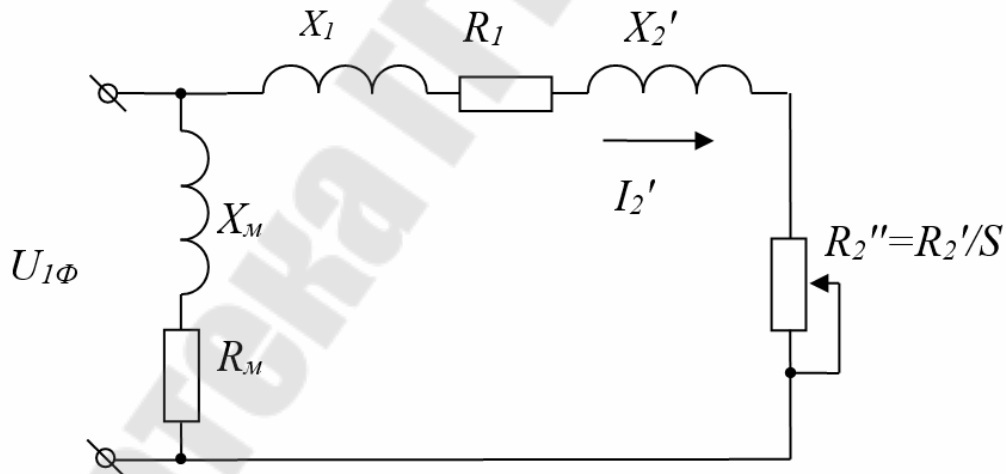


Рис. 5.2. Упрощенная схема замещения асинхронного двигателя

В соответствии с приведенной схемой замещения можно получить выражение для вторичного тока:

$$I_2' = \frac{U_{1\phi}}{\sqrt{(R_1 + R_2' / S)^2 + (X_1 + X_2')^2}}. \quad (5.2)$$

Момент асинхронного двигателя может быть определен из выражения электромагнитной мощности:  $M\omega_0 S = 3(I_2')^2 R_2''$ , откуда

$$M = \frac{3(I_2')^2 R_2'}{\omega_0 S}, \quad (5.3)$$

где  $\omega_0$  – синхронная скорость вращения магнитного поля статора  $\omega_0 = 2\pi f/p$ ; цифра 3 соответствует числу фаз питающей сети;  $f$  – частота питающей сети;  $p$  – число пар магнитных полюсов статора.

Подставляя значение тока из (5.2) в (5.3), получаем:

$$M = \frac{3U_{1\phi}^2 R_2'}{\omega_0 \left[ (R_1 + R_2' / S)^2 + (X_1 + X_2')^2 \right] S}. \quad (5.4)$$

Приравнявая  $dM/dS = 0$ , определяем значение критического скольжения  $S_k$  (при котором двигатель развивает максимальный, критический, момент). Если момент нагрузки увеличивает скольжение, то активная составляющая тока ротора и момент увеличиваются пропорционально нагрузке. Такая зависимость сохраняется до скольжения не больше критического  $S_k$ , при котором двигатель развивает максимальный момент  $M_k$ :

$$S_k = \pm \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}}. \quad (5.5)$$

С увеличением скольжения больше критического ток ротора увеличивается за счет реактивной составляющей, так как относительное значение индуктивного сопротивления увеличивается, а активная составляющая тока ротора и момент уменьшаются. Уменьшение момента двигателя при увеличении скольжения и тока называется опрокидыванием. При этом момент нагрузки останавливает двигатель.

Подставляя значение  $S_k$  в (5.4), находим выражение для максимального момента:

$$M_k = \frac{3U_{1\phi}^2}{2\omega_0 \left[ R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2} \right]}. \quad (5.6)$$

Знак «+» в равенствах (5.5) и (5.6) относится к двигательному режиму (или торможению противовключением), знак «-» – к генераторному режиму работы параллельно с сетью.

Если разделить (5.4) на (5.6) с учетом (5.5), то получаем выражение механической характеристики в виде формулы Клосса

$$M_m = \frac{2M_k(1+qS_k)}{\frac{S}{S_k} + \frac{S_k}{S} + 2qS_k}, \quad (5.7)$$

где  $q = \frac{R_1}{R_2'}$ .

Необходимо подчеркнуть весьма важные для практики обстоятельства:

1. Как следует из (5.6), при данном скольжении момент двигателя пропорционален квадрату сетевого напряжения. Поэтому двигатель этого типа чувствителен к колебаниям напряжения сети.

2. Критическое скольжение и угловая скорость идеального холостого хода не зависят от напряжения.

3. Из анализа выражения (5.6) видно, что искусственные зависимости  $\omega(M)$  (управление скоростью вращения) можно получить изменением: активных и индуктивных сопротивлений цепей АД, числа пар полюсов, напряжения на обмотке статора и частоты тока статора.

4. При пуске, когда  $S = 1$ , двигатель потребляет 4–7-кратный ток с относительно малой активной составляющей и развивает – малый пусковой момент 1,2–2,0  $M_n$ . Из-за малого пускового момента процесс пуска асинхронного двигателя затягивается, а большой пусковой ток снижает напряжение, что неблагоприятно для соседних потребителей.

5. Для плавного пуска с сохранением момента равного критическому в цепь ротора вводят добавочные сопротивления. Такая конструкция получила название асинхронный двигатель с фазным ротором.

6. Асинхронный двигатель потребляет ток с активной составляющей, пропорциональной нагрузке, и с реактивной составляющей, не зависящей от нагрузки. Если нагрузка двигателя значительно меньше номинальной, то активная составляющая потребляемого тока меньше реактивной составляющей. Такая работа одного или нескольких двигателей снижает способность сети пропускать полезную (активную) энергию.

## Описание лабораторного стенда

На лабораторном стенде соберите схему измерения, представленную на рис. 5.3.

Меры предосторожности:

1. Перед каждым запуском двигателя вывести регулятор напряжения в положение, предусмотренное условиями измерения.
2. Если двигатель не запускается, немедленно отключить стенд и отыскать ошибку в схеме.
3. Во избежание перегрева двигателя ограничить время его работы с током больше номинального.

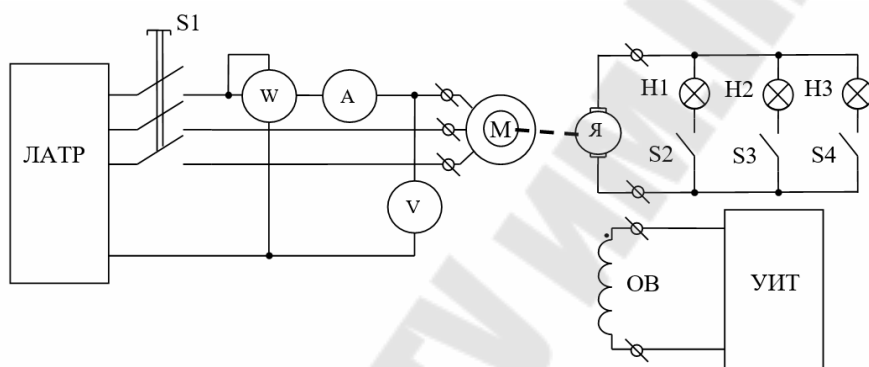


Рис. 5.3. Схема измерения характеристик асинхронного двигателя

В схеме приняты следующие обозначения: М – асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором; ЛАТР – лабораторный автотрансформатор; S1 – трехфазный выключатель; W – ваттметр; V – вольтметр; H1–H3 – нагрузочные лампы накаливания; S2–S4 – выключатели нагрузки; Я – якорь генератора постоянного тока; ОВ – обмотка возбуждения генератора постоянного тока; УИТ – управляемый источник тока.

Нагрузкой асинхронного двигателя в данной лабораторной работе является генератор постоянного тока независимого возбуждения. Подбором нагрузки и тока возбуждения необходимо добиваться нужных значений момента нагрузки.

## Ход работы

**1. Измерение параметров схемы замещения.** Вычисление параметров схемы замещения выполняется по результатам трех опытов: опыта холостого хода, опыта короткого замыкания и измерения ак-

тивного сопротивления. Измерение параметров схемы замещения на предприятиях производится с целью определения качества изготовления или ремонта электрической машины.

*Опыт холостого хода.* Опыт холостого хода позволяет определить значение параметров цепи намагничивания:

1. Установить с помощью ЛАТР номинальное напряжение двигателя. Выполнить проверку симметрии напряжения сети, поочередно измеряя напряжение каждой из фаз. Разница напряжений не должна превышать 3 %.

2. Включить двигатель кнопкой S1.

3. Записать значения напряжения, тока и потребляемой мощности.

4. По результатам измерений рассчитать значения параметров  $X_m$ ,  $R_m$  для схемы рис. 5.2.

*Опыт короткого замыкания.* В опыте короткого замыкания определяют параметры сопротивления индуктивности рассеяния и активных сопротивлений статора и ротора:

1. Установить минимальное напряжение на выходе ЛАТР.

2. Вставить стопорный шплинт.

3. Плавно увеличивая напряжение на выходе ЛАТР, довести ток в обмотке двигателя до 0,5 от номинального.

4. Записать значения тока, напряжения и мощности.

5. Воспользовавшись результатами измерений, определить активную и реактивную составляющие сопротивления обмоток. При расчете значения намагничивающего тока принять равным нулю и сопротивления  $X_m$ ,  $R_m$  не учитывать.

*Измерение активного сопротивления якоря.* Для измерения активного сопротивления якоря используют метод амперметра-вольтметра на постоянном токе. По результатам этого опыта определяют сопротивление  $R_1$ :

1. Подключить обмотку асинхронного двигателя к управляемому источнику постоянного тока.

2. Произвести измерение напряжения на обмотке при токе, не превышающем 0,5 от номинального.

3. Рукой попытаться провернуть двигатель с запитанной обмоткой и оценить эффект электродинамического торможения.

4. Рассчитать сопротивление  $R_1$  для одной обмотки двигателя.

*Примечание.* При расчете учесть схему соединения обмоток двигателя.

По результатам опытов начертить схему замещения с подписанными значениями сопротивлений и индуктивностей. При определе-

нии индуктивности рассеяния считать, что  $X_1 = X'_2 = 0,5X_{к.з}$ .

**2. Измерение рабочей характеристики.** Запустить двигатель на номинальном напряжении, вольтметром проверить симметрию линейных напряжений, которая должна быть ниже 3 %. По указаниям в приложении к стенду проверить работу стенда, изменяя нагрузку от нулевой до соответствующей току 1,25–1,30 от номинального, записать максимальное значение момента.

Равномерно изменяя момент от нуля до максимального и поддерживая регулятором ЛАТР неизменное напряжение  $U_1$  по 5–7 режимам, определить рабочую характеристику двигателя.

Таблица 5.1

Рабочая характеристика двигателя при  $U_1 = \dots В$ ;  $f_1 = 50 Гц$

$M, Н \cdot м$	$I_1, А$	$P_1, Вт$	$n, об/мин$	$\cos\phi$	$P_2, Вт$	$\eta$	$S$

*Примечание.* Напряжение  $U_1$  задает преподаватель.

По результатам табл. 5.1 построить графики рабочих характеристик двигателя:  $I_1, M, \cos\phi, \eta, S = f(P_2)$  для номинального режима  $U_{1н} = \dots В, f_1 = 50 Гц$ .

**3. Измерение механической характеристики.** Запустить двигатель при номинальном напряжении, уменьшить напряжения до 0,5 от номинального и плавно, за счет регулировки тока возбуждения генератора постоянного тока, увеличить момент нагрузки, запомнить значения скорости  $n_k$ , момент  $M_{к1}$  и напряжения  $U_{к1}$ , с которых начинается самопроизвольное увеличение тока, немедленно отключить двигатель и записать указанные значения.

Из полученных значений определить критический момент,  $Н \cdot м$ :

$$M_k = M_{к1} \left( \frac{U_{1н}}{U_{к1}} \right).$$

После остановки двигателя отключить нагрузку и установить регулятор напряжения на нуль. Вставить штифт в отверстие на диске тормоза, включить регулятор и, быстро увеличивая напряжение, доведите ток до 2,0–2,5 от номинального, запомнить значения момента  $M_{н1}$  и напряжения  $U_{н1}$ , немедленно отключить двигатель, записать указанные значения, убрать штифт.

Из полученных значений определите пусковой момент, Н · м:

$$M_{\text{п}} = M_{\text{пл}} \left( \frac{U_{1\text{н}}}{U_{\text{кл}}} \right).$$

Определить кратности пускового момента  $m_{\text{п}}$  и критического момента  $m_{\text{к}}$  по отношению к номинальному моменту.

По результатам табл. 5.1 и полученным результатам постройте график механической характеристики двигателя  $n(M)$  при  $U_{1\text{н}} = \dots \text{В}$ ,  $f_1 = 50 \text{ Гц}$ .

По графику определить номинальное изменение частоты вращения (при номинальном моменте).

Типовая механическая характеристика асинхронного двигателя представлена на рис. 5.4.

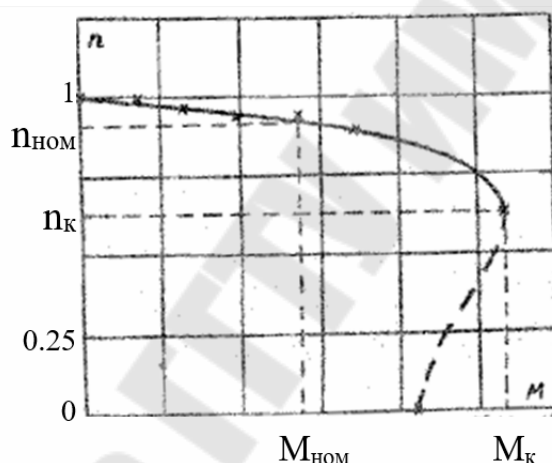


Рис. 5.4. Типовая механическая характеристика асинхронного двигателя

**4. Заключение.** С обоснованием и указанием причин расхождения показать, как конкретный двигатель обеспечивает показатели, гарантируемые заводом в технических данных: КПД, потребляемый ток, коэффициент мощности, кратность пускового и максимального моментов. Указать также область нагрузок, при которых работа двигателя экономически выгодна.

### Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать: цель работы; схемы измерения; таблицы результатов измерения; схему замещения двигателя с результатами расчетов и расчетные формулы; рабочие ха-



характеристики с расчетными формулами; результаты измерений и вычислений механической характеристики, график механической характеристики; заключение.

### **Контрольные вопросы**

1. Почему с увеличением нагрузки уменьшается частота вращения двигателя?
2. Объяснить явление опрокидывания.
3. В чем сходство и различие между асинхронным двигателем и трансформатором?
4. Какими способами можно улучшить пусковые свойства асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором?
5. Почему с увеличением механической нагрузки на вал асинхронного двигателя возрастает мощность, потребляемая из сети двигателем?
6. В чем отличие Г-образной схемы замещения от Т-образной?
7. Как изменятся эксплуатационные свойства двигателя при повышении (понижении) напряжения?
8. Почему при уменьшении нагрузки КПД и коэффициент мощности двигателя уменьшается?
9. Почему экономически невыгодна работа двигателя при малой нагрузке и при перегрузке?
10. Какими способами управляют моментом трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором?

### **Дополнительные вопросы**

1. Какой дефект имеет двигатель, если его коэффициент мощности меньше гарантированного?
2. Какой дефект или ошибку подключения имеет двигатель, если потребляемый им ток больше номинального и симметричен (несимметричен) по фазам?
3. Какой дефект имеет двигатель, если при малых нагрузках потребляемый им ток колеблется с частотой 0,1–5 Гц?

## **ИЗУЧЕНИЕ ПРИНЦИПА РАБОТЫ СЕЛЬСИНОВ**

**Цель работы:** изучить конструкцию сельсинов и приобрести практические навыки в сборке схемы и включении сельсинов, а также их опытным исследованием для определения точности и основных параметров; получить экспериментальное подтверждение теоретическим сведениям о свойствах сельсинов в индикаторном и трансформаторном режимах.

### **Основные теоретические сведения**

Сельсины – это индукционные электрические машины, которые позволяют при постоянном напряжении на входе получать на выходных обмотках систему напряжений, амплитуда и фаза которых определяются угловым положением ротора (сельсины-датчики), или же, наоборот, такую систему напряжений преобразовывать в соответствующее ей угловое положение ротора (сельсины-приемники индикаторные) или в напряжение, фаза и амплитуда которого является функцией системы входных напряжений и угла поворота ротора (сельсины-приемники трансформаторные). Сельсины применяются в качестве измерителей рассогласования следящих систем, датчиков и приемников трансформаторных и индикаторных систем дистанционных передач.

Конструктивно сельсины выполняются по типу синхронных или асинхронных машин (т. е. явнополюсными или неявнополюсными). Контактные сельсины состоят из двух основных частей: статора и ротора, на которых располагаются обмотки возбуждения и синхронизации. Скользящие контакты необходимы для передачи напряжения на ротор. Однофазные обмотки возбуждения у большинства индикаторных сельсинов расположены на явно выраженных полюсах, а трехфазные обмотки синхронизации – в равномерно распределенных пазах. Однако у трансформаторных (ток возбуждения подается на ротор через торцевой трансформатор) сельсинов, как правило, применяется неявнополюсная конструкция статора и ротора. У дифференциальных сельсинов имеется две трехфазные обмотки (на статоре и роторе). Для успокоения колебаний ротора индикаторные сельсины-приемники имеют механический или электрический демпфер.

Работают сельсины следующим образом. Если на обмотку возбуждения сельсина подать переменное напряжение  $\bar{U}_B = u_m \sin \omega t$  (рис. 6.1), то протекающий по ней ток создает пульсирующий магнитный поток  $\Phi$ , направление которого будет совпадать с осью обмотки возбуждения. Этот поток в зависимости от положения ротора наводит в фазных обмотках синхронизации различные по величине ЭДС:

$$\begin{cases} E_1 = k\bar{U}_B \cos \alpha; \\ E_2 = k\bar{U}_B \cos(\alpha - 120); \\ E_3 = k\bar{U}_B \cos(\alpha + 120), \end{cases} \quad (6.1)$$

где  $k$  – коэффициент трансформации;  $\alpha$  – угол между осями обмоток фазы и осью обмотки возбуждения.

В связи с тем, что ЭДС, наводимые в отдельных фазных обмотках, имеют одну и ту же временную фазу, вторичная обмотка сельсинов не является трехфазной в прямом значении этого слова. Обмотка синхронизации называется трехфазной только с точки зрения ее конструктивного выполнения и размещения.

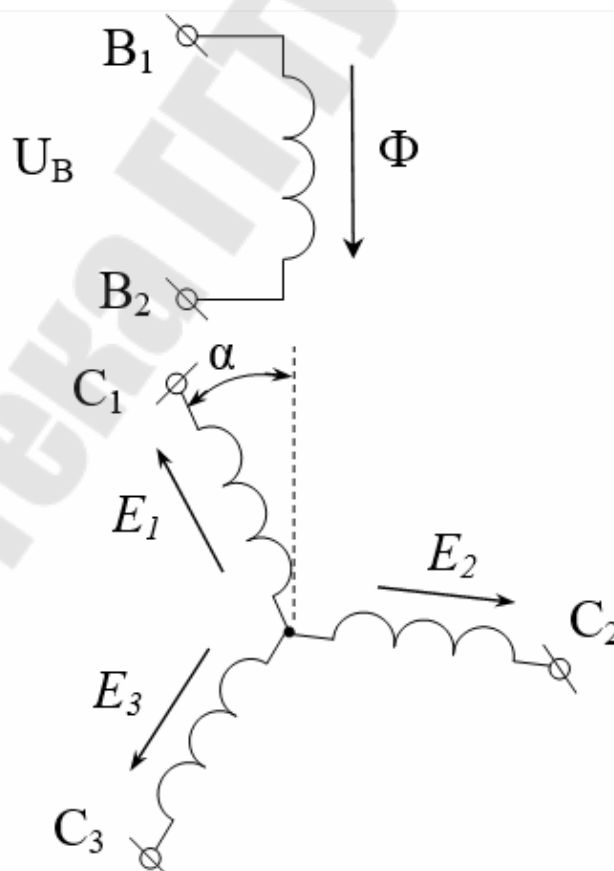


Рис. 6.1. Электрическая схема сельсина

При повороте ротора сельсина ЭДС фазных обмоток  $E_1, E_2, E_3$  изменяются таким образом, что любому положению ротора соответствует единственное соотношение напряжений на выходных клеммах обмотки синхронизации как по величине, так и по фазе.

На практике сельсины, как правило, применяются парно, когда один из них работает в качестве датчика, а другой – приемника.

При помощи сельсинов могут быть построены системы дистанционных передач индикаторного и трансформаторного типа, вследствие чего различают индикаторный и трансформаторный режимы их работы (рис. 6.2 и 6.3).

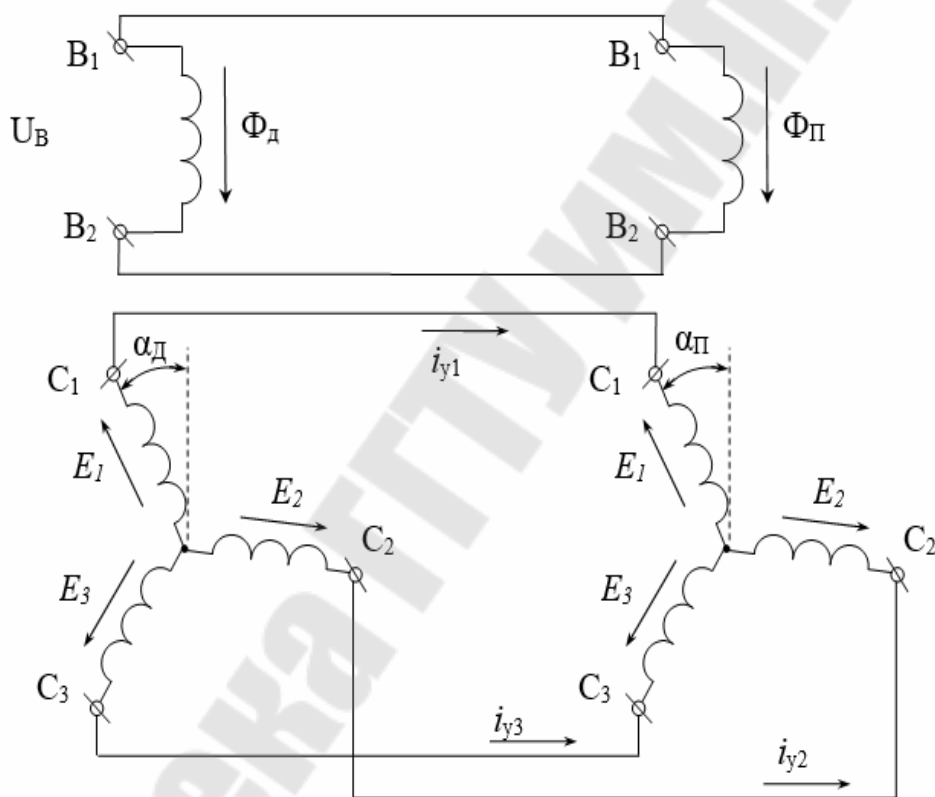


Рис. 6.2. Схема соединения сельсинов в индикаторном режиме

В индикаторном режиме обычно применяют два однотипных сельсина, а информация передается в виде угла поворота сельсина приемника. Обмотки возбуждения сельсина-датчика и сельсина-приемника включаются в цепь общего однофазного источника переменного тока, а обмотки синхронизации соединяются между собой линией связи. При отсутствии рассогласования, т. е. когда  $\alpha_{\text{д}} = \alpha_{\text{п}}$ , токи в цепи синхронизации отсутствуют, так как соответствующие

ЭДС на обмотках датчика и приемника одинаковы. Если  $\alpha_d \neq \alpha_n$ , между соответствующими обмотками датчика и приемника возникнут ЭДС, равные разности ЭДС обмоток датчика и приемника, это приводит к протеканию уравнивающих токов  $i_y$ . Эти токи, протекая по обмоткам синхронизации и взаимодействуя с потоком возбуждения, создают синхронизирующий момент, который стремится привести приемник в согласованное положение с датчиком.

Индикаторная система передачи характеризуется удельным и максимальным синхронизирующим моментом. Абсолютное значение максимального синхронизирующего момента на полупериоде рассогласования называют максимальным синхронизирующим моментом. Синхронизирующий момент сельсина, приходящийся на единицу угла рассогласования от положения согласования индикаторной дистанционной передачи, называют удельным синхронизирующим моментом.

В трансформаторном режиме (рис. 6.3) обмотка возбуждений сельсина-датчика подключена к источнику однофазного переменного тока. Обмотки синхронизации датчика и приемника, как и в индикаторном режиме, соединяются между собой линией связи, а обмотка возбуждения сельсина-приемника (управляющая обмотка) служит для выработки напряжения рассогласования. Выходное напряжение характеризует смещение ротора сельсина-датчика относительно положения согласования, за которое принимают такое положение, когда оси однофазных обмоток сельсина-датчика и сельсина-приемника взаимно перпендикулярны ( $\alpha_d - \alpha_n = 90^\circ$ ). Так как при согласованном положении направление пульсирующего магнитного потока перпендикулярно управляющей обмотке, то ЭДС в этой обмотке равна нулю. При повороте ротора датчика на такой же угол поворачивается магнитное поле приемника и в управляющей обмотке наводится ЭДС:

$$U_{\text{вых}} = kU_{\text{в}} \sin(\alpha_d - \alpha_n - \pi / 2), \quad (6.2)$$

где  $k$  – коэффициент трансформации;  $U_{\text{вых}}$  – выходное напряжение системы передачи угла.

Таким образом, трансформаторный режим работы дает возможность получить на управляющей обмотке сельсина-приемника переменное напряжение, амплитуда и фаза которого определяются величиной и знаком угла рассогласования.

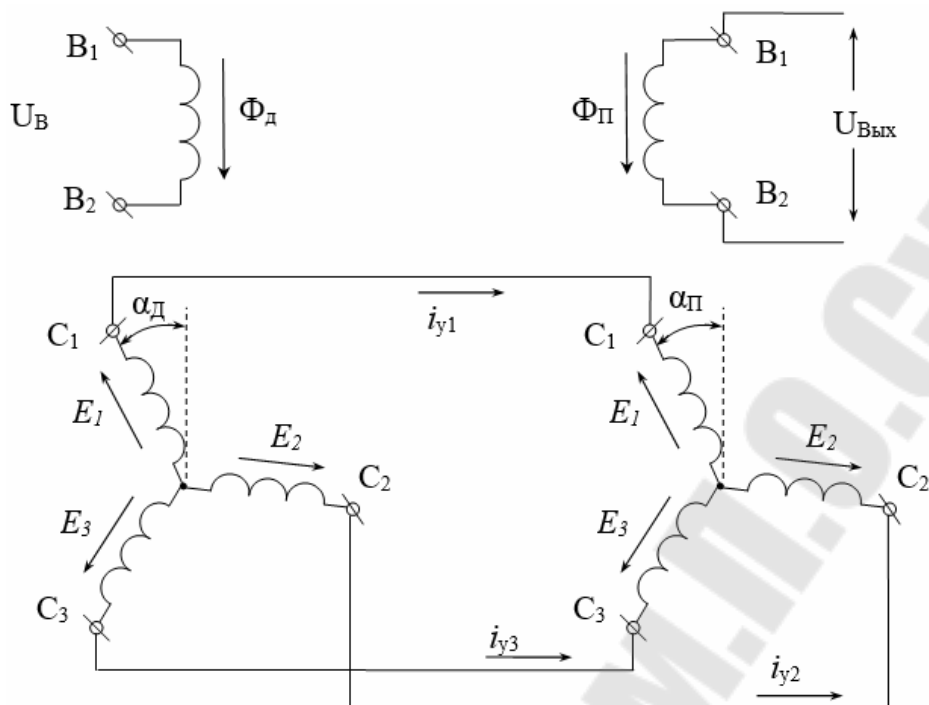


Рис. 6.3. Схема соединения сельсинов в трансформаторном режиме

Важнейшей характеристикой сельсинов как элементов систем автоматики и вычислительной техники является точность выполняемых ими функциональных преобразований, которую принято характеризовать величинами основных и дополнительных погрешностей.

Основные погрешности – это погрешности, которые присущи изделиям при работе в нормальных условиях в режиме холостого хода при номинальных значениях питающего напряжения и частоты питающего напряжения и обусловлены принципом их работы, конструктивными и технологическими ограничениями.

Погрешности от конструктивных ограничений представляют собой погрешности из-за несинусоидального распределения обмоток, наличия пазов на статоре и роторе (вследствие чего изменяется магнитная проводимость воздушного зазора), нелинейности кривой намагничивания, явления гистерезиса. К наиболее существенным погрешностям от технологических ограничений относятся погрешности, связанные с неточностью изготовления, которые определяются величинами эксцентриситетов расточек статора и ротора, магнитной асимметрией их пакетов, неточностью скоса паза. Электрическая асимметрия вызывается неравенством электрических сопротивлений фаз обмотки синхронизации. Магнитная асимметрия является следствием неравенства магнитных сопротивлений пакета стали статора или ротора в различных радиальных направлениях. Причиной магнитной

асимметрии может оказаться и неравномерный воздушный зазор.

Дополнительными погрешностями называются погрешности, которые возникают при изменении температуры окружающего воздуха, питающего напряжения и частоты питающего напряжения. Возникновение дополнительных погрешностей связано с изменением под воздействием указанных выше факторов, магнитной проводимости по продольной и поперечной осям, комплексных сопротивлений обмоток статора и ротора, индуктивных сопротивлений рассеяния и геометрии машины, что приводит к изменению амплитуды и фазы выходного напряжения.

Точностные возможности с учетом основных и дополнительных погрешностей оцениваются комплексом параметров:

1. Погрешность следования – отклонение угла поворота ротора индикаторного сельсина-приемника от угла поворота индикаторного сельсина-датчика в положении согласования. Определяется как наибольшая по абсолютному значению погрешность в пределах оборота ротора.

2. Асимметрия нулевых положений ротора сельсина-датчика (*asymmetry of the selsyn transmitter rotor null positions*) – отклонение ротора от углов, кратных  $60^\circ$ , когда выходная ЭДС двух фаз обмотки синхронизации минимальна (остаточная ЭДС).

3. Остаточная ЭДС сельсина – ЭДС на выводах выходной обмотки при нулевых положениях ротора сельсина. Определяется как наибольшая остаточная ЭДС по основной гармонике во всех нулевых положениях ротора при поданном напряжении возбуждения.

Класс точности сельсина определяется как полусумма абсолютных максимальных значений положительного ( $\theta_{\text{макс}(+)}$ ) и отрицательного ( $\theta_{\text{макс}(-)}$ ) углов рассогласования:

$$\Delta = 0,5 \left( \left( \theta_{\text{макс}(+)} \right) + \left( \theta_{\text{макс}(-)} \right) \right). \quad (6.3)$$

В соответствии со значением  $\Delta$  сельсины в индикаторной системе разделяются на три класса точности:

1-й класс: ...  $\Delta = 0,4-0,75^\circ$ ;

2-й класс: ...  $\Delta = 0,76-1,50^\circ$ ;

3-й класс: ...  $\Delta = 1,51-2,50^\circ$ .

## Ход работы

1. Ознакомиться с конструкцией сельсинов, записать их паспортные данные.

2. Собрать схему индикаторной передачи рис. 6.2 и после проверки ее преподавателем проверить работоспособность индикаторной системы. Затем, поворачивая ротор сельсина-датчика, наблюдают за поворотом ротора сельсина-приемника. Если ротор сельсина-приемника поворачивается в сторону, противоположную повороту ротора сельсина-датчика, то это свидетельствует о присоединении некоторых соединительных проводов к разноименным зажимам.

3. Выполнить необходимые измерения и построить график углов рассогласования; определить класс точности сельсина. График углов рассогласования представляет собой зависимость углов рассогласования ( $\theta = \alpha_d - \alpha_n$ ) от угла поворота ротора сельсина-датчика  $\alpha_d$  при номинальном напряжении на обмотках возбуждения и отсутствия какой-либо нагрузки на валу сельсина-приемника. Прежде чем приступить к выполнению опыта, проверяют совпадение нулевых положений стрелок на шкалах сельсина-датчика и сельсина-приемника. Если требуемого совпадения нет, то его следует добиться поворотом корпуса сельсина-приемника. На сельсине-датчике задаются углом поворота через каждые  $10^\circ$  – всего полный оборот  $360^\circ$ . Разность между показаниями углов поворота на датчике  $\alpha_d$  и приемнике  $\alpha_n$ , выраженная в градусах, и представляет собой угол рассогласования ( $\theta = \alpha_d - \alpha_n$ ).

4. Значения углов заносят в табл. 6.1, а затем строят график углов рассогласования. Опыт по измерению углов рассогласования проводят дважды: при повороте ротора, сельсина-датчика по часовой стрелке и против часовой стрелки.

Таблица 6.1

По часовой стрелке			Против часовой стрелки		
$\alpha_d$ , град	$\alpha_n$ , град	$\theta$ , град	$\alpha_d$ , град	$\alpha_n$ , град	$\theta$ , град

5. Определить удельный синхронизирующий момент сельсина-приемника. Для определения удельного синхронизирующего момента необходимо закрепить ось сельсина-датчика в нулевом положении,



подать напряжение на обмотки возбуждения, согласовать ротор приемника с ротором датчика, т. е. выставить его в нулевое положение и подвесить груз к нити, закрепленной на шкиве сельсина-приемника. При этом ротор приемника выйдет из согласованного положения и стрелка приемника отклонится на угол рассогласования  $\theta$ . Удельный синхронизирующий момент определяют по формуле  $M_y = 0,5D_{ш}G$ , где  $D_{ш}$  – диаметр шкива;  $G$  – вес груза, вызвавшего отклонение, при этом синхронизирующий момент выражают в Н · см. Для более точного определения удельного синхронизирующего момента измеряют угол рассогласования четыре раза: два раза при отклонении ротора приемника по часовой стрелке и два – против часовой. При этом угол рассогласования определяют как среднее арифметическое.

Результаты измерений и вычислений заносят в табл. 6.2.

Определить время успокоения сельсина-приемника. Для определения времени успокоения сельсина-приемника роторы сельсинов устанавливают так, чтобы в согласованном положении нулю на шкале датчика соответствовал нуль на шкале приемника. Ротор датчика закрепляют в нулевом положении и выключают возбуждение. Затем стрелку приемника вместе с его ротором отклоняют на угол  $179^\circ$  или  $181^\circ$  и включают тумблер возбуждения, подав номинальное напряжение на обмотки возбуждения сельсинов. Одновременно включают секундомер и измеряют время, в течение которого ротор приемника успокаивается, приходя в согласованное с ротором датчика положение. Это и есть время успокоения. Для получения более точного результата опыт повторяют три раза, а затем определяют среднее значение времени успокоения (с).

Таблица 6.2

Угол рассогласования при повороте ротора, град		$\theta_{ср}$ , град	$G$ , Н	$D_{ш}$ , см	$M$ , Н · см
по часовой стрелке	против часовой стрелки				
$\theta_1 =$	$\theta_2 =$				
$\theta_3 =$	$\theta_4 =$				

6. Собрать схему трансформаторного режима сельсина (рис. 6.3) и зафиксировать вал ротора сельсина приемника. Затем, поворачивая

ротор сельсина-датчика, наблюдают за изменением выходного напряжения и фазы сельсина приемника.

7. Выполнить измерение характеристики трансформаторной системы передачи угла. На сельсине-датчике задаются углом поворота через каждые  $10^\circ$  – всего полный оборот  $360^\circ$ , при этом записывают значения выходного напряжения и разности фаз между напряжением  $U_{в}$  и  $U_{вых}$  через каждые  $10^\circ$ . Результаты измерений записывают в табл. 6.3. По результатам измерений строят графики выходных значений напряжения и угла в функции угла поворота.

Таблица 6.3

Угол поворота, град	Входное напряжение, В	Выходное напряжение, В	Разность фаз, град

8. Выполнить оценку отклонения полученных результатов от теоретических. Определить класс точности трансформаторной системы передачи.

9. Составить отчет и сделать заключение о проделанной работе.

### Контрольные вопросы

1. Каково назначение и принцип действия сельсинов?
2. Из каких функциональных узлов состоит сельсин? Пояснить принцип индикаторной системы передачи.
3. Пояснить принцип действия трансформаторной системы передачи. Какие параметры выходного сигнала трансформаторной системы являются информационными?
4. Перечислить основные параметры сельсина, объяснить влияние этих параметров на результаты проведенных измерений.
5. Что такое удельный синхронизирующий момент сельсина приемника и как его определить экспериментально?
6. С какой целью сельсин-приемник снабжают демпфером?
7. Привести схемы и перечислить параметры системы дистанционной передачи трансформаторного и индикаторного режимов.
8. Чем вызвано наличие погрешностей в системе передачи сельсинами? Каковы классы точности сельсинов? Определить класс точности сельсина, находящегося в лабораторном стенде.

9. Как связана погрешность отображения угла с классом точности сельсина?

10. Сопоставить точность отображения угла в индикаторной и трансформаторной системе передачи. Чем вызваны отличия этих значений?

## **ИЗУЧЕНИЕ ПРИНЦИПА ДЕЙСТВИЯ ВРАЩАЮЩИХСЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ**

**Цель работы:** изучение конструкции, основных параметров вращающихся трансформаторов, а также работы схем измерения угловых перемещений.

### **Основные теоретические сведения**

Вращающиеся трансформаторы (ВТ) представляют собой индукционные электрические машины, у которых выходное напряжение является функцией входного напряжения и угла поворота ротора. При этом зависимость выходного напряжения от входного линейная, а от угла поворота ротора может быть как линейной, так и синусной (косинусной). Используются ВТ как счетно-решающие элементы аналоговых и аналого-цифровых вычислительных устройств, датчики цифровых преобразователей угла в код, а также как измерители угловых перемещений (или функционально связанных с ними напряжений) различных следящих систем и систем дистанционных передач.

По своей конструкции ВТ имеют много общего с другими электрическими машинами, а особенности этих изделий определяются спецификой выполняемых ими функций.

Так, синус-косинусные ВТ (СКВТ) представляют собой электрические машины неявнополюсного типа. На статоре и роторе, собранных из листов электротехнической стали или пермаллоя, имеются равномерно распределенные пазы, в которых размещаются, как правило, по две одинаковые взаимно перпендикулярные обмотки. Первичные обмотки (которые у большинства СКВТ располагаются на статоре) называются: одна – обмоткой возбуждения ( $V_1; V_2$ ), другая – квадратурной обмоткой ( $V_3; V_4$ ); вторичные – синусной ( $C_1; C_2$ ) и косинусной ( $K_1; K_2$ ) (рис. 7.1).

Токосъем (токоподвод) к подвижным частям машины осуществляется контактными (при помощи контактных колец и щеток) и бесконтактными (посредством кольцевых трансформаторов или спиральных пружин) способами.

Принцип действия вращающихся трансформаторов заключается в следующем. При подаче на обмотку возбуждения ВТ переменного на-

пряжения  $U_B = u_m \sin(\omega t)$  в воздушном зазоре возникает пульсирующий магнитный поток  $\Phi_B$ , который, пронизывая вторичные обмотки, будет наводить в них ЭДС, пропорциональные синусу и косинусу угла поворота ротора  $\alpha$ :

$$\begin{cases} \bar{E}_c = k\bar{U}_B \sin \alpha; \\ \bar{E}_k = k\bar{U}_B \cos \alpha, \end{cases} \quad (7.1)$$

где  $k$  – коэффициент трансформации (отношение эффективных витков вторичной обмотки к эффективным виткам первичной обмотки).

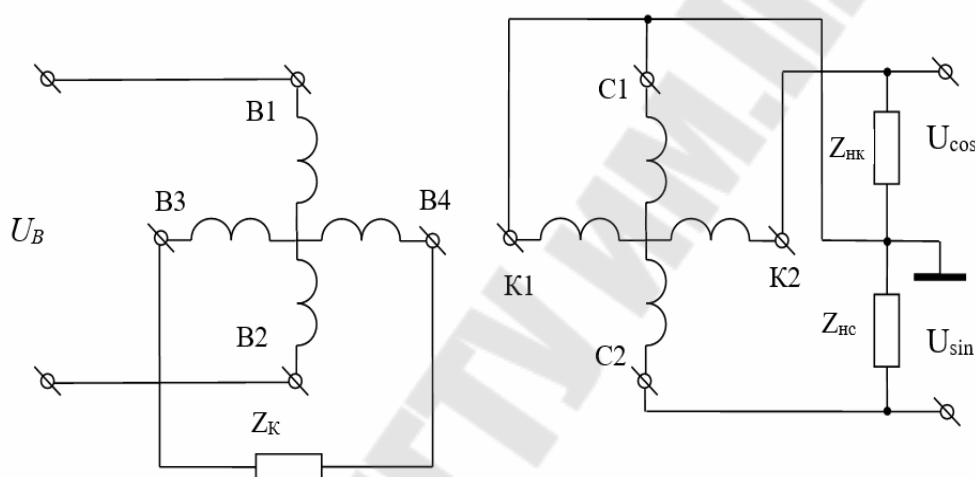


Рис. 7.1. Схема включения вращающегося трансформатора в режиме синус-косинус вращающегося трансформатора

Режим СКВТ (рис. 7.1) является одним из наиболее распространенных режимов работы ВТ. В этом режиме напряжения на сопротивлениях нагрузки  $Z_H$  будут изменяться по синусоидальному и косинусоидальному законам в зависимости от угла поворота ротора.

Уравнения (7.1) справедливы для режима холостого хода. При конечном сопротивлении нагрузки одной из вторичных обмоток (например, синусной) появится ток  $i_c$ , а следовательно, и соответствующая намагничивающая сила, направленная вдоль оси обмотки. Под действием этой намагничивающей силы образуется магнитный поток  $\Phi_c$  (реакция синусной обмотки).

Результирующий магнитный поток в воздушном зазоре создается за счет взаимодействия потоков обмотки возбуждения и синусной обмотки. Наличие составляющей потока реакции синусной обмотки приво-

дит к искажению синусоидальной зависимости ЭДС вторичной обмотки (7.1), при этом степень искажения определяется величиной соотношения сопротивлений намагничивания и нагрузки.

Основное требование, предъявляемое к ВТ, состоит в том, чтобы выходное напряжение как можно точнее изменялось по синусоидальному закону. Для выполнения этого требования необходимо устранить влияние поперечной составляющей магнитного потока, что может быть достигнуто путем выбора соответствующей нагрузки квадратурной  $Z_k$  (первичное симметрирование) или косинусной  $Z_{н.к}$  (вторичное симметрирование) обмоток.

Условием первичного симметрирования является равенство симметрирующего сопротивления внешнему сопротивлению цепи обмотки возбуждения, т. е. выходному сопротивлению источника питания. Если ВТ питается от мощного источника питания, выходное сопротивление которого можно принять равным нулю, то условие первичного симметрирования выполняется при замыкании квадратурной обмотки накоротко. При первичном симметрировании входное сопротивление ВТ зависит от угла поворота ротора, а выходное сопротивление вторичных обмоток остается постоянным. Для того чтобы обеспечить постоянство входного сопротивления при любом положении ротора, необходимо выполнить условие вторичного симметрирования: вторичные обмотки должны быть нагружены одинаково.

Для достижения наименьшего искажения выходных функциональных зависимостей ВТ первичное и вторичное симметрирование практически всегда применяют совместно.

Вращающиеся трансформаторы являются достаточно универсальными электрическими машинами и в зависимости от схемы включения могут работать (выполняя различные функции) в следующих основных режимах: синусно-косинусного вращающегося трансформатора, линейного вращающегося трансформатора, преобразователя координат фазовращателя и трансформаторной дистанционной передачи. В настоящее время наибольшее распространение получили схемы синусно-косинусного (рис. 7.1) и фазовращателя (рис. 7.2).

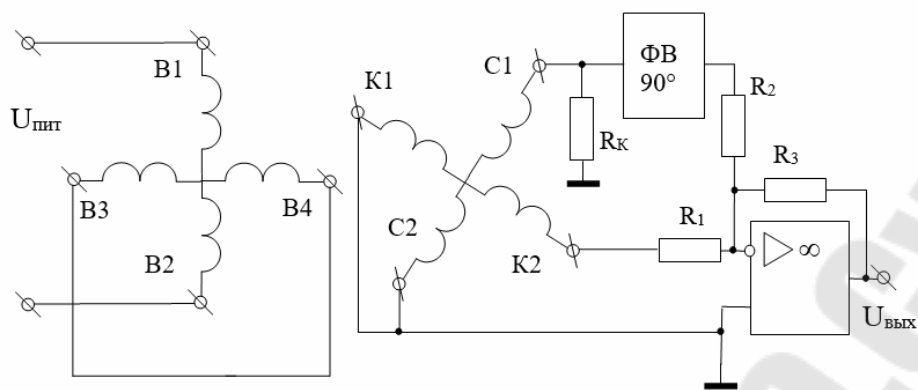


Рис. 7.2. Схема включения вращающегося трансформатора в режиме фазовращателя

$$U_{\text{вых}} = AU_{\text{пит}} e^{-j\alpha}, \quad (7.2)$$

где  $A$  – коэффициент преобразования схемы и ВТ.

Параметры, характеризующие основные погрешности ВТ, следующие:

1. Погрешность отображения синусной зависимости – отклонение действующего значения выходного напряжения (в зависимости от угла поворота ротора) от идеальной синусоиды (косинусоиды). Она равна полусумме абсолютных значений максимальных положительной и отрицательной погрешностей и выражается в процентах или угловых минутах. Погрешность отображения синусной зависимости вызывается технологическими погрешностями при производстве ВТ, а также является следствием объективных свойств конструкции. При этом наиболее существенное влияние оказывает зубцовая структура статора и ротора, эксцентриситет расточек и магнитная асимметрия пакетов статора и ротора.

2. Асимметрия нулевых точек в угловых минутах характеризует электрическую неперпендикулярность статорных и роторных обмоток. Под асимметрией нулевых точек понимают отклонение ротора (при питании ВТ со стороны каждой из первичных обмоток) от углов, кратных  $90^\circ$ .

3. Остаточная ЭДС в нулевых точках представляет собой квадратурную составляющую ЭДС, которая наводится во вторичных обмотках паразитным эллиптическим вращающимся магнитным полем. Величина остаточной ЭДС также определяется по основной гармонике в процентах от максимального значения выходного напряжения.

4. Разность коэффициентов трансформации между обмотками –

неидентичность синусной и косинусной обмоток и различие их потокоцеплений с магнитным потоком возбуждения (вследствие неодинаковой магнитной проводимости вдоль осей обмоток) приводят к различной величине коэффициентов трансформации этих обмоток, выражаемой в процентах.

5. Погрешность следования в трансформаторной дистанционной передаче – отклонение положения согласования ВТ-приемника от углового положения, задаваемого ВТ-датчиком. За погрешность следования, выражаемую в угловых минутах, принимают полусумму абсолютных значений наибольших отклонений.

В соответствии со значениями погрешностей ВТ в режиме СКВТ разделяются на следующие классы точности (табл. 7.1).

Таблица 7.1

Параметр точности		Класс точности					
СКВТ	Погрешность отображения синусной зависимости, %	± 0,005	± 0,01	± 0,02	± 0,05	± 0,1	± 0,2
	Асимметрия нулевых точек	± 10"	± 20"	± 40"	± 1'40"	± 3'20"	± 6'40"
	Остаточная ЭДС, %	0,003	0,006	0,01	0,025	0,05	0,1
	Разность коэффициентов трансформации, %	0,005	0,01	0,02	0,05	0,1	0,2

Наряду с параметрами, определяющими качество функциональных преобразований, ВТ характеризуются также совокупностью параметров, определяющих возможность их сопряжения между собой и с другими элементами аппаратуры:

1. Номинальное напряжение питания. В технической документации указывается номинальное значение напряжения питания ВТ, которое выбирается из ряда: 127; 60; 40 (36); 27; 12; 6 В. Значение номинального напряжения питания задается с допуском ±5 %.

2. Номинальная частота напряжения питания. Номинальная частота питающего напряжения регламентируется следующим рядом частот: 400; 1000; 2000; 4000 Гц с допусками ±(3–5) %. Большинство существующих ВТ, рассчитанных на номинальную частоту 400 Гц, могут работать в диапазоне частот 400–4000 Гц. Следует отметить, что при увеличении частоты некоторые точностные характеристики ВТ могут от-



личаться от значений, указанных в технической документации для номинальной частоты.

3. Полное входное сопротивление холостого хода. Сопротивление переменному току, оказываемое входной обмоткой ВТ при разомкнутых вторичных обмотках. Типовые значения этого параметра находятся в пределах от 100 до 4000 Ом.

4. Коэффициент трансформации – отношение максимального действующего значения ЭДС вторичной обмотки к действующему значению напряжения возбуждения, измеренных по основной гармонике в режиме холостого хода. Регламентированные номинальные значения коэффициентов трансформации в пределах 0,25–1,1.

5. Сдвиг фазы выходного напряжения относительно входного – временное смещение выходного напряжения по отношению к входному. Сдвиг фазы является следствием комплексного характера входного сопротивления ВТ.

6. Момент трения, Н · см – это сопротивление повороту ротора ВТ, которое возникает вследствие трения в подшипниках и щеточно-коллекторном узле (у контактных машин), небаланса ротора и реактивного момента (при подключении напряжения питания). Момент трения у разных типов машин колеблется в широких пределах.

7. Допустимая частота вращения – наибольшая частота, после превышения которой значительно ухудшаются параметры ВТ и сельсинов: увеличивается погрешность вследствие влияния ЭДС вращения, выпадение из синхронизма. Кроме того, с увеличением частоты вращения уменьшается наработка ВТ и сельсинов. Как правило, ВТ и сельсины работают в режиме датчиков поворота с частотой вращения от 0 до 100 об/мин. Бесконтактные машины рассчитаны на эксплуатацию при частоте вращения до 500–2000 об/мин.

### Ход работы

1. Изучить конструкцию и состав лабораторного стенда.
2. Собрать схему синусно-косинусного ВТ (рис. 7.1).
3. Задаваясь углом поворота через каждые  $10^\circ$ , делают полный оборот  $360^\circ$ , при этом записывают значения выходного напряжения через каждые  $10^\circ$  и разности фаз между напряжением  $U_B$  и  $U_{\sin}$ ,  $U_{\cos}$ . Результаты измерений записывают в табл. 7.2.
4. По результатам измерений строят графики выходных значений напряжения и угла в функции угла поворота.

5. Собрать схему фазовращателя на ВТ (рис. 7.3).

6. Задаваясь углом поворота через каждые  $10^\circ$ , делают полный оборот  $360^\circ$ , при этом записывают значения выходного напряжения через каждые  $10^\circ$  и разности фаз между напряжением  $U_{\text{пит}}$  и  $U_{\text{вых}}$ .

Таблица 7.2

Угол поворота, град	Входное напряжение, В	Выходное напряжение $U_{\text{sin}}$		Выходное напряжение $U_{\text{cos}}$	
		В	разность фаз, град	В	разность фаз, град
0					
10					

7. По результатам измерений строят графики выходных значений напряжения и угла в функции угла поворота.

Таблица 7.3

Угол поворота, град	Напряжение питания, В	Выходное напряжение $U_{\text{вых}}$	
		В	разность фаз, град
0			
10			

### Контрольные вопросы

1. Перечислить области применения и функциональное назначение ВТ.
2. Перечислить, из каких функциональных узлов состоят ВТ.
3. Каков принцип действия ВТ?
4. С какой целью и как выполняют симметрирование ВТ?
5. Начертить схему синусно-косинусного ВТ, пояснить назначение элементов схемы.
6. Начертить схему фазовращателя на ВТ, пояснить назначение элементов схемы.
7. Перечислить параметры сопряжения ВТ и раскрыть их смысл.
8. Перечислить параметры, характеризующие основные погрешности ВТ.

## Дополнительные вопросы

1. Как изменится результат измерения угла поворота в схеме фазовращателя, если измерение производить между выходным напряжением и током в первичной обмотке ВТ. Почему это произойдет?

2. Как изменится результат измерения угла поворота в схеме СКВТ, если при измерении выходных напряжений использовать фазочувствительные выпрямители?

## Лабораторная работа № 8

### ИЗМЕРЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЕМКОСТНЫХ ДИСКРЕТНЫХ ДАТЧИКОВ УРОВНЯ

**Цель работы:** изучение принципа действия и метрологических характеристик дискретных сигнализаторов уровня.

#### Краткие теоретические сведения

Дискретные емкостные датчики уровня – это сигнализаторы уровня, в которых чувствительным элементом служит конденсатор. Они предназначены для дискретной (релейной) сигнализации достижения предельных (максимального или минимального) значений уровня жидкости и активно применяются в составе систем контроля, регулирования и поддержания уровня жидкости (воды, растворов, светлых нефтепродуктов и иных жидких сред, в том числе и агрессивных, за исключением коррозионно-активных к материалу датчика) в различных резервуарах.

Чувствительная поверхность емкостного сигнализатора образуется двумя concentrically расположенными металлическими электродами. Их поверхности *A* и *B* расположены в цепи обратной связи высокочастотного генератора, который настроен таким образом, что он не генерирует при отсутствии объекта детектирования. Если объект приближается к чувствительной поверхности датчика, то он попадает в электрическое поле перед поверхностями электродов и способствует повышению емкости связи между пластинами *A* и *B*. При этом амплитуда генератора начинает возрастать. Амплитуда колебаний регистрируется оценочной схемой (состоящей из детектора и компаратора) и преобразуется в команду включения (рис. 8.1).

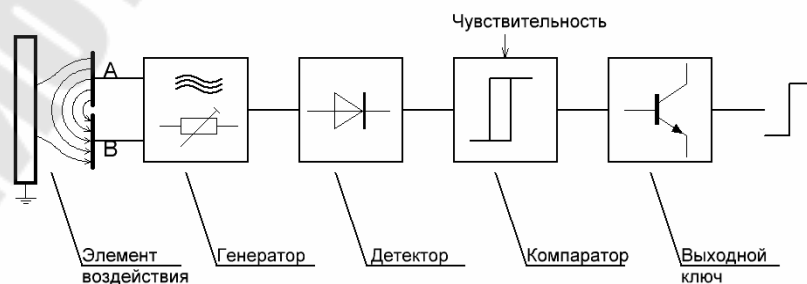


Рис. 8.1. Функциональная схема двухэлектродного емкостного сигнализатора

Емкостные выключатели обнаруживают как металлические, так и диэлектрические объекты. Металлы из-за их высокой проводимости наиболее сильно воздействуют на емкостные выключатели. Если между пластинами конденсатора расположить изолятор, то емкость конденсатора повышается в зависимости от его диэлектрической постоянной. При обнаружении органических материалов (древесина, зерно и т. д.) нужно обращать внимание на то, что содержание в них воды очень сильно влияет на их диэлектрические свойства (так как  $\epsilon_{\text{воды}} = 80$ ).

Для подавления шумов (быстрых переключений) в момент достижения уровня жидкости порога срабатывания в датчик вводится *гистерезис* – различные уровни (пороги) срабатывания для включения и отключения датчика.

### Описание лабораторного стенда

Схема лабораторного стенда изображена на рис. 8.2.

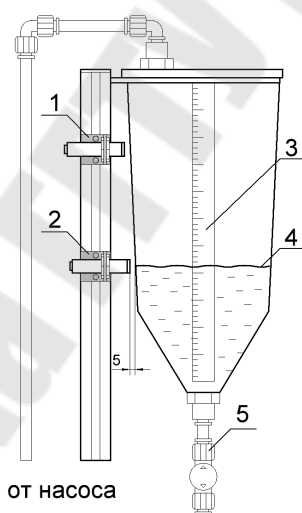


Рис. 8.2. Схема лабораторного стенда:

- 1 – верхний емкостной сигнализатор уровня; 2 – нижний емкостной сигнализатор уровня; 3 – измерительная линейка; 4 – бак с водой; 5 – сливной кран

### Ход работы

1. Установите датчики таким образом, как изображено на рис. 8.2 1: нижний датчик на уровне  $1/3$  высоты бака, верхний датчик –  $2/3$  высоты бака.

2. Согласно документации на датчик номинальное расстояние срабатывания датчика составляет 5–10 мм. Установите датчики на расстояние 8 мм от жидкости, что соответствует расстоянию 5 мм от стенки резервуара. Настройте датчик на *срабатывание* по уровню 50 % от площади чувствительного элемента.

Ввиду наличия гистерезиса настройку уровня срабатывания нужно проводить следующим образом:

- установить уровень воды на 50 % площади датчика;
- снизить чувствительность датчика так, чтобы он отключился (погас светодиод);
- плавно увеличивать чувствительность до тех пор, пока датчик не работает (засветится светодиод);
- для проверки правильности настройки нужно слить воду из колбы ниже уровня срабатывания датчика, после чего снова ее набрать – включение датчика должно происходить на уровне 50 %.

3. Определите, при каком уровне воды срабатывают датчики во время набора бака. Полученные данные запишите в табл. 8.1.

4. Определите, при каком уровне воды срабатывают датчики во время слива воды из бака. Полученные данные запишите в табл. 8.1.

5. Рассчитайте разницу между уровнями срабатывания (гистерезис).

6. Настройте датчик на срабатывание по уровню 80 %.

7. Повторите пункты № 2–4.

8. Настройте датчик на срабатывание по уровню 20 %.

9. Повторите пункты № 2–4.

10. Повторите пункты № 1–9 для нижнего датчика. Результаты занесите в табл. 8.2, аналогичную табл. 8.1.

11. Постройте на одном графике зависимости величины гистерезиса от чувствительности и расстояния от детектируемой жидкости.

Таблица 8.1

**Уровень срабатывания верхнего сигнализатора**

Настройка	Состояние	Уровень срабатывания (отпускания), мм, при расстоянии...		
		1 мм	5 мм	15 мм
<i>Нижний датчик</i>				
50 %	Срабатывание			
	Отключение			
	Δ			

Настройка	Состояние	Уровень срабатывания (отпускания), мм, при расстоянии...		
		1 мм	5 мм	15 мм
20 %	Срабатывание			
	Отключение			
	Δ			
80 %	Срабатывание			
	Отключение			
	Δ			
<i>Верхний датчик</i>				
50 %	Срабатывание			
	Отключение			
	Δ			
20 %	Срабатывание			
	Отключение			
	Δ			
80 %	Срабатывание			
	Отключение			
	Δ			

### Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать: титульный лист; цель и задачи работы; описание хода работы; схему установки датчика; таблицу с полученными результатами; график зависимостей; выводы по работе.

### Контрольные вопросы

1. Что такое дискретный датчик уровня?
2. Каков принцип действия емкостного сигнализатора уровня?
3. Что такое гистерезис срабатывания?
4. Для чего в дискретном сигнализаторе присутствует гистерезис уровней срабатывания?
5. Как повлияет на качество работы датчика его неправильная установка?
6. Чем дискретные датчики отличаются от непрерывных (аналоговых)?

## Лабораторная работа № 9

### ИЗУЧЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК УЛЬТРАЗВУКОВЫХ НЕПРЕРЫВНЫХ ДАТЧИКОВ УРОВНЯ

**Цель работы:** изучить принцип работы и практически исследовать технические характеристики ультразвуковых непрерывных датчиков уровня.

#### Краткие теоретические сведения

1. *Принцип работы ультразвуковых датчиков уровня.* Работа ультразвуковых датчиков уровня основана на излучении пьезокерамическим элементом ультразвуковой волны, которая после отражения от границы раздела сред возвращается обратно к пьезокерамическому приемнику и выражается формулой (9.1):

$$h = \frac{vt}{2}, \quad (9.1)$$

где  $h$  – расстояние до жидкости;  $v$  – скорость распространения звука в воздухе;  $t$  – измеренное время между излучением и принятием ультразвуковой волны.

Принцип работы изображен на рис. 9.1.

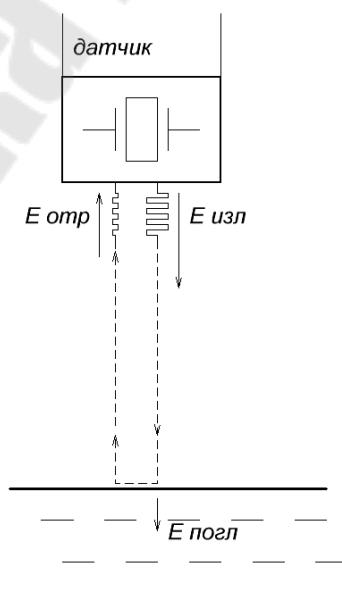


Рис. 9.1. Принцип работы ультразвукового датчика уровня



Однако у данного метода измерений существует целый ряд особенностей и ограничений, которые влияют как на точность, так и на саму возможность измерения.

2. *Влияние скорости звука на точность измерения.* Общепромышленные ультразвуковые датчики калибруются в воздухе: скорость распространения звука в нем составляет 330 м/с при 0 °С температуры окружающей среды. Соответственно, эксплуатировать датчик расстояния, например, в CO<sub>2</sub> невозможно, поскольку скорость звука при 0 °С будет составлять уже 260 м/с и измерение не будет достоверным.

Скорость распространения звука в воздухе  $v$  в основном зависит от температуры, если при  $v(0\text{ °С}) = 330\text{ м/с}$ , то для  $v(60\text{ °С}) = 360\text{ м/с}$ , что существенно влияет на точность. Для компенсации этой зависимости в корпус датчика встраивают температурный сенсор (удаётся достичь относительной погрешности измерения  $\delta = \pm 1\%$ ).

3. *Затухание звука и максимальное рабочее расстояние датчика.* Затухание – это уменьшение амплитуды звукового давления с увеличением расстояния от источника звука (излучателя датчика). Если измеряемый объект находится на расстоянии большем, чем *максимальное рабочее расстояние*, то отправленная и затем отразившаяся обратно волна успевает полностью поглотиться средой и измерение становится невозможным.

На рабочее расстояние датчика влияют следующие параметры среды:

- Температура: влияет на вязкость, плотность и скорость распространения звука. С ростом температуры затухание увеличивается и максимальное расстояние уменьшается.
- Давление: с повышением давления затухание уменьшается и максимальное расстояние увеличивается.
- Относительная влажность: влияет на несколько параметров аналогично температуре.

Как правило, чем выше частота, тем выше разрешающая способность датчика, но ниже максимальное расстояние. Например, для рабочего диапазона 0,5–5 м распространена частота УЗИ 80 кГц, а для диапазона 0,05–0,35 – частота 400 кГц.

4. *Отражающие свойства объектов.* Помимо поглощения звука самой средой ультразвук взаимодействует с самим объектом, отражаясь от его поверхности. При достижении ультразвуковой волной поверхности объекта часть энергии волны проходит внутрь объекта, а остальная отражается обратно  $E_{\text{полн}} = E_{\text{отр}} + E_{\text{погл}}$  (рис. 9.1).

Чем больше коэффициент отражения, тем большая часть энергии волны  $E_{отр}$  отразится обратно и тем больше расстояние, на котором может происходить измерение. В свою очередь, чем меньше акустическое сопротивление объекта, тем большая часть энергии  $E_{погл}$  проникает внутрь среды и тем сильнее уменьшается максимальное рабочее расстояние вместе с уменьшением  $E_{отр}$ .

К объектам с высоким акустическим сопротивлением относятся: жидкости, сталь, дерево, стекло, пластик. В случае если параметры окружающего воздуха (температура, влажность, давление) соответствуют нормальным условиям, то измерение расстояния ультразвуковым датчиком до объектов из подобных материалов возможно на максимальном рабочем расстоянии.

К объектам с низким акустическим сопротивлением относятся: пена, шерсть, поролон, пух. По причине высокой пористости большая часть энергии волны сквозь эти поры попадает внутрь объекта и «гасится» во внутренних полостях. При работе с подобными материалами, даже если параметры окружающей среды соответствуют нормальным, измерение может стать невозможным даже в пределах рабочего диапазона.

5. *Слепая зона.* Еще одной важной особенностью работы ультразвуковых датчиков является невозможность измерения уровня на близком от датчика расстоянии. Это связано с тем, что излучатель датчика является одновременно и его приемником.

В основе датчика лежит пьезокерамический элемент, который начинает колебаться при подаче на него напряжения. В зависимости от его характеристик он излучает ультразвуковую волну определенной частоты, после чего переходит в режим приема и ожидает возвращения отраженной от объекта волны. После прекращения подачи напряжения в пьезокерамическом элементе наблюдаются затухающие автоколебания, которых невозможно избежать. Если объект находится слишком близко, то отраженная волна вернется к излучателю в тот момент, пока автоколебания еще не прекратились. И как следствие, измерение станет невозможным. Слепая зона – это расстояние, которое ультразвуковая волна проходит за время полного затухания автоколебаний. Это фиксированная величина, являющаяся характеристикой конкретной модели датчика, не подлежит настройке и не зависит от параметров окружающей среды.

### Описание лабораторного стенда

Схема лабораторного стенда изображена на рис. 9.2, на котором приняты следующие обозначения: 1 – ультразвуковой датчик уровня; 2 – бак; 3 – измерительная линейка; 4 – граница раздела сред.

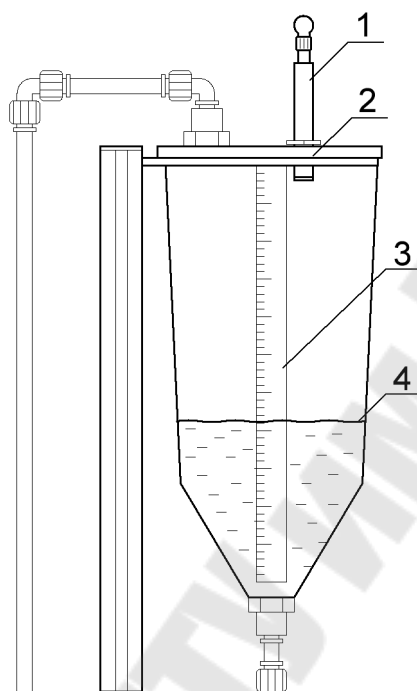


Рис. 9.2. Схема лабораторного стенда

### Ход работы

1. Установить бак в горизонтальном положении.
2. Насосом 3 дискретно увеличить уровень воды в баке. В табл. 9.1 занести текущий уровень и значение выходного сигнала датчика давления для каждой дискреты измерения.
3. Рассчитать измеренный уровень. Выражение для перевода выходного сигнала в уровень получается на основании технической документации на установленный в стенде датчик. Полученные данные занести в табл. 9.1.
4. Наклонить бак на угол  $\alpha = 10^\circ$ .
5. Повторить пункты 2 и 3. Заполнить табл. 9.1 для полученных значений.
6. Наклонить бак на угол  $\alpha = 30^\circ$ .
7. Повторить пункты 2 и 3. Заполнить табл. 9.1.

8. Построить график зависимости измеренного значения от действительного для разных углов наклона. Сделать выводы о метрологических характеристиках датчика уровня и влиянии угла наклона датчика на результат измерения.

Таблица 9.1

### Результаты эксперимента

$\alpha = 0^\circ$				
$h_d$ , мм	$U$ , В	$h_{изм}$ , мм	$\Delta$ , мм	$\delta$ , %
10				
20				
...				
250				

### Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать: титульный лист; цель и задачи работы; описание хода работы; схему установки датчика; таблицу с полученными результатами; графики зависимостей; выводы по работе.

### Контрольные вопросы

1. Что такое непрерывный датчик уровня?
2. Каков принцип действия ультразвукового датчика?
3. Какие параметры влияют на точностные характеристики ультразвукового датчика?
4. От чего зависит затухание отраженной волны?
5. От каких параметров зависит максимальное рабочее расстояние срабатывания датчика?

## ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ДАТЧИКОВ РАСХОДА

**Цель работы:** изучение принципа действия и метрологических характеристик электромагнитного и постоянного перепада давления расходомеров.

### Краткие теоретические сведения

*Расход* – это физическая величина, равная пределу отношения приращения массы, объема или количества жидкости, протекающих в трубопроводе через сечение, перпендикулярное направлению скорости потока, к интервалу времени, за который это приращение произошло, при неограниченном уменьшении интервала времени. Расход обозначается буквой  $Q$ , т. е.:  $Q_m$  – массовый,  $Q_o$  – объемный,  $Q_{кол}$  – количественный расход.

*Расходомер* – измерительный прибор или совокупность приборов, предназначенных для измерения расхода.

1. *Расходомеры постоянного перепада давления.* К данным типам расходомеров относятся такие приборы, принцип действия которых основан на зависимости вертикального перемещения поплавка, изменяющего при этом площадь проходного отверстия трубопровода таким образом, что перепад давления по обе стороны поплавка остается постоянным от расхода жидкости или газа. Широко распространенным расходомером постоянного перепада давления является ротаметр, в котором поплавок перемещается внутри измерительной трубки, имеющей переменную площадь сечения.

Ротаметр представлен на рис. 10.1, а, где обозначено: 1 – поплавок; 2 – нижний ограничитель хода поплавка; 3 – верхний ограничитель хода поплавка; 4 – коническая стеклянная трубка; 5 – поток. Диаметр поплавка равен внутреннему диаметру трубки в ее нижней части. Трубка постепенно расширяется в направлении снизу вверх. В этом же направлении движется жидкость, увлекая поплавок вверх. По мере подъема поплавок кольцевой зазор между его краями и внутренней поверхностью трубки увеличивается до тех пор, пока подъемная сила, создаваемая разностью давлений сверху и снизу поплавка, не станет равной его весу.

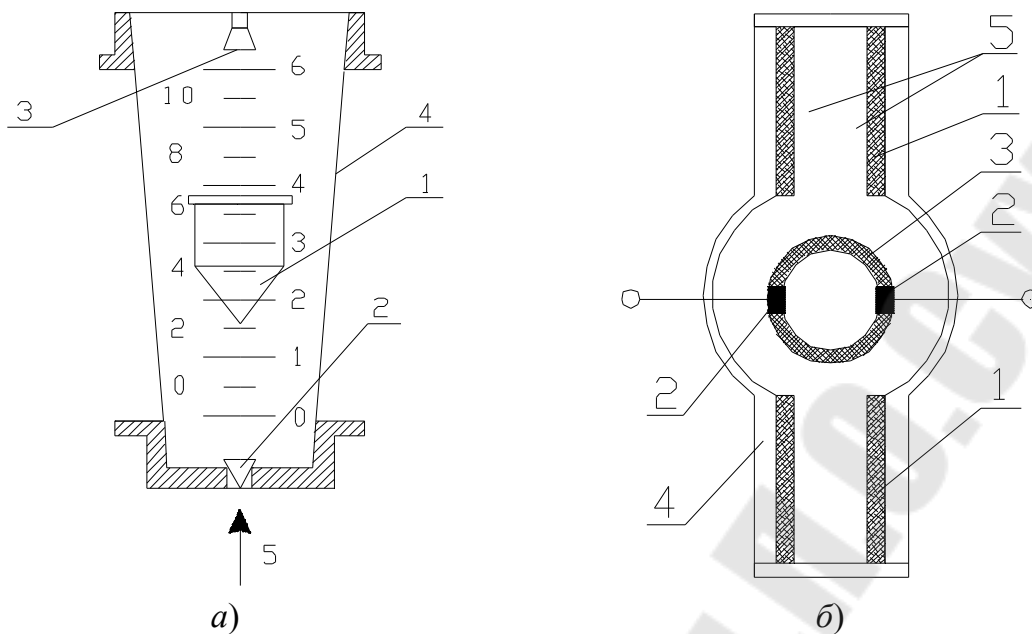


Рис. 10.1. Принцип действия расходомеров:  
*а* – постоянного перепада давления; *б* – электромагнитного

При малых расходах поплавков взвешен в жидкости вблизи нижнего конца трубки. При повышении расхода он поднимается к верхнему концу трубки. Расстояние от нижнего конца трубки до точки, в которой поплавок достиг равновесного состояния, линейно зависит от расхода. Обычно погрешность ротаметров равна 12 % в диапазоне расходов 10 : 1.

2. *Электромагнитные расходомеры.* Работа электромагнитного расходомера основана на открытом Фарадеем законе линейной зависимости между ЭДС, наводимой в проводнике, движущемся в магнитном поле, и скоростью его движения. На рис. 10.1, *б* представлен внешний вид расходомера, где приняты следующие обозначения: 1 – обмотка возбуждения; 2 – электроды, при помощи которых снимается ЭДС с движущейся жидкости; 3 – внутренняя немагнитная труба, футерованная диэлектрическим материалом, в которой и происходит измерение расхода; 4 – внешний магнитопровод; 5 – магнитные силовые линии.

Электромагнитный расходомер состоит из трубы, выполненной из немагнитной (как правило нержавеющей) стали, покрытой изнутри изолирующим материалом. Катушки возбуждения, расположенные снаружи трубы, создают магнитное поле. Жидкость, протекающая по трубе, играет роль проводника. ЭДС, наводимая в жидкости, пропорциональна скорости потока.

Два небольших электрода, расположенных друг против друга заподлицо с поверхностью изолирующего слоя, воспринимают ЭДС. Наводимая ЭДС не может быть использована непосредственно, так как она мала и источник ЭДС обладает высоким внутренним сопротивлением. Воспринимаемый электродами сигнал направляется в устройство, которое осуществляет усиление, фильтрацию и нормирование выходного сигнала.

Датчик в виде простого отрезка трубы с внутренней футеровкой и двумя электродами не создает препятствия потоку, и потеря давления в данном случае не превышает потерю давления в прямой трубе такой же длины.

### Описание лабораторного стенда

Схема лабораторного стенда изображена на рис. 10.2.

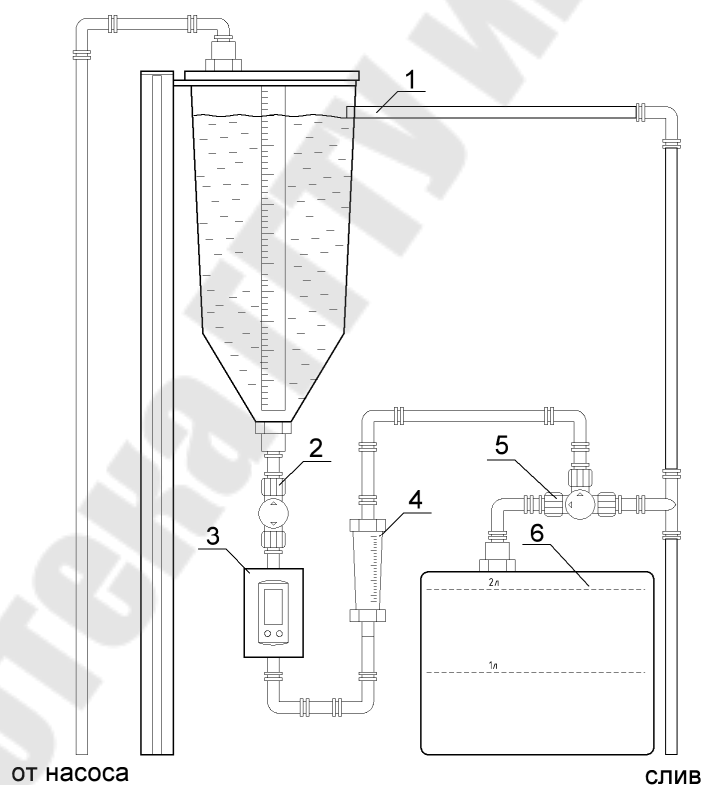


Рис. 10.2. Схема лабораторного стенда:

- 1 – бак с переливной трубкой, которая обеспечивает постоянный уровень воды;
- 2 – кран, предназначенный для регулирования расхода воды;
- 3 – электромагнитный датчик расхода;
- 4 – поплавковый датчик расхода;
- 5 – трехходовой кран;
- 6 – мерная емкость

Фиксированный уровень воды в баке обеспечивает постоянное гидростатическое давление столба жидкости. Это позволит заполнять мерную емкость с постоянным расходом (считаем, что за время проведения эксперимента температура жидкости и проходное сечение контура с датчиками расхода не меняются).

Истинное значение расхода будет измеряться объемным методом, при котором жидкость поступает в тарированную мерную емкость, а время его наполнения точно фиксируется секундомером. Объемный расход будет равен объему жидкости в мерном баке, деленному на время его наполнения. Значение расхода, полученное объемным методом, примем за истинное значение измерения:

$$Q_{и} = \sum_{i=1}^5 \frac{V_i}{t_i}, \quad (10.1)$$

где  $Q_{и}$  – истинный расход, измеренный объемным методом;  $V$  – объем воды, поступившей в мерную емкость;  $t$  – время, за которое в мерную емкость поступала вода;  $i$  – количество измерений.

Для повышения точности эксперимента рекомендуется проводить несколько измерений с последующим их усреднением.

### Описание эксперимента

Измерение проводится следующим образом:

- 1) краном 2 производят регулирование расхода воды, заполняющей мерную емкость;
- 2) после установки требуемого расхода краном 2, при необходимости изменяют производительность водяной помпы так, чтобы незначительная часть воды переливалась в сливную трубку 1 (таким образом в баке будет поддерживаться постоянный уровень жидкости).
- 3) подачу воды краном 5 переключают на слив и опустошают мерную емкость 6;
- 4) краном 5 переключают подачу воды в пустую мерную емкость 6, в момент переключения включают секундомер;
- 5) в процессе заполнения мерной емкости в табл. 10.1 записывают показания ротаметра и электромагнитного датчика расхода (ЭМДР);
- 6) в момент заполнения мерной емкости до отметки выключают секундомер, полученное время записывают в табл. 10.1;
- 7) по формуле (10.1) рассчитывается истинный расход, заполняется табл. 10.1.



## Результаты эксперимента

Номер измерения	Мерная емкость		ЭМДР		Поплавковый	
	$t, c$	$Q_{zi}, л/мин$	$Q_z, м^3/мин$	$Q_{zi}, л/мин$	$Q_z, м^3/с$	$Q_{zi}, м^3/с$
1			–		–	
2						
3						–
4						
5						
Среднее						
$\Delta$						
$\delta$	–	–	–		–	

## Ход работы

1. Установить краном 2 минимальный расход воды, отображаемый электромагнитным датчиком. Заполнить табл. 10.1.

2. Установить краном 2 минимальный расход воды, при котором ротаметр начинает отображать расход. Заполнить таблицу, аналогичную табл. 10.1.

3. Установить краном 2 максимальный расход воды, отображаемый расходомерами. Заполнить таблицу, аналогичную табл. 10.1.

4. Установить краном 2 расход воды, равный среднему значению расходов, полученных в пунктах 1 и 3. Заполнить таблицу, аналогичную табл. 10.1.

5. На основании таблиц, полученных в пунктах 1–4, сделать выводы о метрологических характеристиках исследуемых датчиков расхода.

## Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать: титульный лист; цель и задачи работы; описание хода работы; схему установки датчика; таблицу с полученными результатами; графики зависимостей; выводы по работе.

## Контрольные вопросы

1. Что такое расход жидкости?
2. Каков принцип действия поплавкового датчика расхода?
3. Каков принцип действия электромагнитного датчика расхода?
4. От каких параметров зависят показания поплавкового датчика?
5. Можно ли измерять расход диэлектрических жидкостей электромагнитным датчиком расхода? Почему?

## Лабораторная работа № 11

# ИССЛЕДОВАНИЕ ДАТЧИКОВ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ

**Цель работы:** изучить принцип работы датчиков гидростатического давления. Изучить гидростатический метод измерения уровня жидкости.

### Краткие теоретические сведения

Датчики давления – это устройство, предназначенное для преобразования давления среды (жидкости, газа или пара) в унифицированный выходной сигнал.

Датчики давления конструктивно состоят из чувствительного элемента, воспринимающего давление, и преобразователей (перемещений, деформации, силы), собранных в корпусе, конструкция которых обладает большим разнообразием.

По виду измеряемого давления датчики давления различают:

- абсолютные (для измерения абсолютного давления);
- дифференциальные (для измерения разности давлений);
- относительные (для измерения избыточного над атмосферным давлением);
- вакуумные (для измерения степени разрежения).

Принцип действия датчиков давления изображен на рис. 11.1.

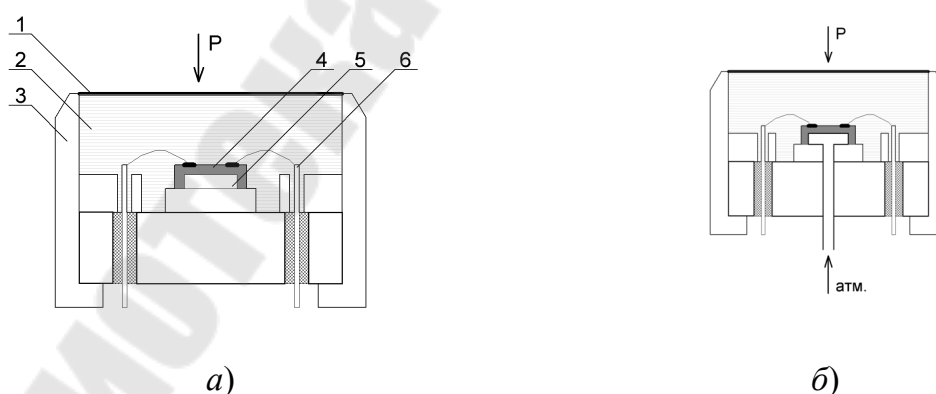


Рис. 11.1. Схематическое изображение принципа действия датчиков давления:

- а* – абсолютного: 1 – мембрана; 2 – несжимаемое силиконовое масло; 3 – корпус; 4 – чувствительный элемент на стеклянном основании; 5 – вакуумная камера; 6 – выводы, подключенные к чувствительному элементу; *б* – относительного

В датчике абсолютного давления с обратной стороны чувствительного элемента расположена камера с нулевым давлением (рис. 11.1, а). В датчике относительного давления с обратной стороны камера подключена к атмосфере с помощью тонкой трубки, обычно расположенной в кабеле (рис. 11.1, б). В датчике дифференциального давления трубка подключена к емкости с избыточным давлением, отличным от атмосферного.

Чувствительным элементом датчиков давления является тонкая, чаще кремниевая пластинка, которую условно можно назвать мембраной. Она может быть одинаковой по толщине, либо с жестким, недеформируемым центром, имеющим по контуру упругую перемычку. Мембраны датчиков давления прямого преобразования могут быть как без жесткого центра, так и с ним. В первом случае в качестве преобразователей деформаций используются диффузионные или эпитаксиальные тензорезисторы. В мембранах с жестким центром можно применять емкостные, магниторезистивные и другие преобразователи перемещений. В датчиках давления компенсационного преобразования используются мембраны с жестким центром, на котором размещаются элементы преобразователя перемещений и силовые элементы цепи обратной связи, которые могут быть электростатического или магнитоэлектрического типа, аналогично акселерометрам.

*Гидростатический метод измерения уровня.* В основе гидростатического метода измерения уровня лежит зависимость между высотой столба жидкости и гидростатическим давлением этого столба:

$$P = \rho gh, \quad (11.1)$$

где  $P$  – гидростатическое давление столба жидкости;  $\rho$  – плотность жидкости;  $g = 9,8 \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения;  $h$  – высота столба жидкости.

Для измерения уровня применяют датчики избыточного давления, которым необходима связь с атмосферой. У датчиков избыточного давления измеряемая среда ( $P_{\text{ср}}$ ) и атмосферное давление ( $P_{\text{атм.бак}}$ ) действуют с одной стороны чувствительного элемента и только атмосферное давление ( $P_{\text{атм}}$ ) – с другой. Для открытых емкостей  $P_{\text{атм.бак}} = P_{\text{атм}}$ . Таким образом, атмосферное давление в баке компенсируется атмосферным давлением вне его и датчик измеряет только давление среды. Для подачи атмосферного давления в корпус погружного датчика применяется специальный кабель, который помимо сигнальных ли-

ний несет еще и полую трубку, защищенную на обратном конце воздухопроницаемым, но водонепроницаемым фильтром. Корпус погружного датчика воздухопроницаем и должен быть водонепроницаем (степень пылевлагозащиты IP 68). Для измерения уровня в полностью закрытых емкостях, где создается избыточное давление ( $P_{изб}$ ) между крышкой емкости и жидкостью, наиболее оптимальным будет применение гидростатических датчиков дифференциального давления. В этом случае с помощью специального капилляра необходимо связывать датчик дифференциального давления с областью избыточного давления емкости.

### Описание лабораторного стенда

Схема лабораторного стенда изображена на рис. 11.2.

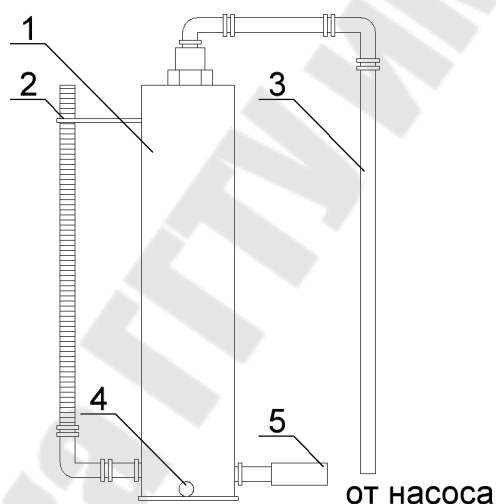


Рис. 11.2. Схема лабораторного стенда: 1 – высокий бак; 2 – измерительный сообщающийся сосуд; 3 – трубка для верхней подачи воды; 4 – сливной кран; 5 – датчик давления

Уровень воды в баке рассчитывается из выражения (11.1), при этом плотность воды зависит от температуры (табличное значение):

$$h = \frac{P}{\rho g}. \quad (11.2)$$

За действительное значение уровня  $h_d$  примем показания, снятые с сосуда 2.

## Ход работы

1. Измерить температуру воды. Записать в табл. 11.1 значение плотности  $\rho$  для данной температуры.

2. Насосом 3 дискретно увеличить уровень воды в баке. В табл. 11.1 занести текущий уровень и значение выходного сигнала датчика давления для каждой дискреты измерения.

3. По формуле (11.2) рассчитать измеренный уровень. Выражение для перевода выходного сигнала в давление получается на основании технической документации на установленный в стенде датчик. Полученные данные занести в табл. 11.1.

4. Повторить пункты 1–3 с другим значением температуры воды.

5. Сделать вывод о метрологических характеристиках датчика. Построить график зависимости измеренного значения от истинного.

Таблица 11.1

### Результаты эксперимента

$h_d$ , мм	$T$ , °C	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$U$ , В	$P$ , кПа	$H_{\text{изм}}$ , мм	$\Delta$ , мм	$\delta$ , %
50							
100							
150							
...							
2000							

### Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать: титульный лист; цель и задачи работы; описание хода работы; схема установки датчика; таблицу с полученными результатами; графики зависимостей; выводы по работе.

### Контрольные вопросы

1. Что такое абсолютное, относительное, дифференциальное давление?
2. Каков принцип действия датчика давления?
3. Как зависят от температуры показания датчика давления?
4. Можно ли измерять давление газа датчиком, предназначенным для жидкости? Почему?

## Литература

1. Кацман, М. М. Электрические машины автоматических систем / М. М. Кацман, Ф. М. Юферов. – М. : Высш. шк., 1979. – 248 с.
2. Чиликин, М. Г. Общий курс электропривода : учеб. для вузов / М. Г. Чиликин, А. С. Сандлер. – 6-е изд., доп. и перераб. – М. : Энергоиздат, 1981. – 567 с.
3. Гейлер, Л. Б. Основы электропривода / Л. Б. Гейлер. – Минск : Высш. шк., 1972. – 608 с.
4. Ультразвуковая технология / под ред. Б. А. Аграната. – М. : Металлургия, 1974. – 504 с.
5. ГОСТ 15528–86. Средства измерения расхода. Термины и определения. – М. : Изд-во стандартов, 1986.
6. ГОСТ 2755–74. Обозначения условные графические в схемах. Устройства коммутационные и контактные соединения. – М. : Изд-во стандартов, 1974.

## Содержание

Предисловие .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
<i>Лабораторная работа № 1. Измерение параметров трансформаторов</i> .....	4
<i>Лабораторная работа № 2. Измерение параметров импульсных трансформаторов</i> .....	10
<i>Лабораторная работа № 3. Измерение характеристик электромагнитных реле</i> .....	19
<i>Лабораторная работа № 4. Изучение характеристик двигателя постоянного тока</i> .....	26
<i>Лабораторная работа № 5. Изучение характеристик асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором</i> .....	33
<i>Лабораторная работа № 6. Изучение принципа работы сельсинов</i> .....	42
<i>Лабораторная работа № 7. Изучение принципа действия вращающихся трансформаторов</i> .....	52
<i>Лабораторная работа № 8. Измерение основных параметров емкостных дискретных датчиков уровня</i> .....	60
<i>Лабораторная работа № 9. Изучение характеристик ультразвуковых непрерывных датчиков уровня</i> .....	64
<i>Лабораторная работа № 10. Измерение характеристик датчиков расхода</i> .....	69
<i>Лабораторная работа № 11. Исследование датчиков гидростатического давления</i> .....	75
Литература .....	79



Учебное электронное издание комбинированного распространения

Учебное издание

# ЭЛЕМЕНТЫ И УСТРОЙСТВА СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Практикум  
по выполнению лабораторных работ  
по одноименной дисциплине  
для студентов специальности  
1-53 01 07 «Информационные технологии  
и управление в технических системах»  
дневной формы обучения

Составители: **Кухаренко Сергей Николаевич**  
**Хананов Валентин Андреевич**

**Электронный аналог печатного издания**

Редактор *Н. В. Гладкова*  
Компьютерная верстка *И. П. Минина*

Подписано в печать 08.07.21.  
Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».  
Ризография. Усл. печ. л. 4,88. Уч.-изд. л. 4,82.  
Изд. № 3.  
<http://www.gstu.by>

Издатель и полиграфическое исполнение  
Гомельский государственный  
технический университет имени П. О. Сухого.  
Свидетельство о гос. регистрации в качестве издателя  
печатных изданий за № 1/273 от 04.04.2014 г.  
пр. Октября, 48, 246746, г. Гомель