

Государственный комитет СССР по народному образованию

С. А. ШЕСТОВ

ДАТЧИКИ УГЛА, ПОВОРОТНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

Издательство МГТУ
1990

Государственный комитет СССР по народному образованию

С.А. Шестов

ДАТЧИКИ УГЛА, ПОВОРОТНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

Методические указания к лабораторным работам по курсу
"Расчет и конструкции элементов инерциальных систем"

Под редакцией С.Ф. Коновалова

Издательство МГТУ

1990

2

ББК 34.9
Ш51

Ш51

Шестов С.А. Датчики угла, поворотные трансформаторы:
Методические указания к лабораторным работам по курсу
"Расчет и конструкции элементов инерциальных систем"/
Под ред. С.Ф. Коновалова. - М.: Изд-во МГТУ, 1990. - 39 с.,
ил.

ISBN 5-7038-0466-3

Методические указания содержат описания конструкций,
методику снятия экспериментальных характеристик датчиков
угла и поворотных трансформаторов.
Предназначены для студентов четвертого курса, изуча-
ющих специальность "Гирскопические приборы и системы".

Ил. 15. Табл. 3.

Рецензент И.С. Потапцев

ББК 34.9

ISBN 5-7038-0466-3 © МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1990.

Работа № I. ИНДУКЦИОННЫЕ ДАТЧИКИ УГЛА

Цель работы - изучение конструкций и характеристик индукционных датчиков угла (ДУ), применяемых в гироскопических приборах, и получение навыков составления технических отчетов.

После выполнения работы студент должен:

знать устройство, принцип действия, основные характеристики индукционных ДУ;

знать состав контрольно-измерительной аппаратуры, применяемой в работе, целевое назначение каждого прибора и устройства, их характеристики, уметь пользоваться ими;

знать методику проведения эксперимента, уметь рассчитывать характеристики ДУ;

иметь отчет по лабораторной работе, содержащий:

- 1) название лабораторной работы и ее цель;
- 2) результаты выполнения упражнений 1...6;
- 3) результаты изучения нулевого сигнала ДУ;
- 4) результаты изучения работы фазочувствительного выпрямителя и фильтра;
- 5) результаты изучения полезного сигнала ДУ, таблицу значений выходного сигнала ДУ и построенную по ним характеристику ДУ.

I. Краткие теоретические сведения

Датчики угла - устройства, преобразующие угол поворота одного узла прибора относительно другого в электрический сигнал. В гироскопических приборах возникают различные задачи, связанные с измерением углов. Если нужно измерять большие углы поворота ($\geq 360^\circ$), то чаще всего применяют поворотные трансформаторы (ПТ). В двухстепенных гироблоках и маятниковых акселерометрах измеряют достаточно малые углы ($\leq 1^\circ$), поэтому применяют различные типы датчиков угла.

Датчики угла состоят из двух частей: статора и ротора, устанавливаемых на неподвижной и подвижной частях прибора соответственно. В гироскопических приборах наиболее часто применяют индукционные ДУ и значительно реже - фотоэлектрические, потенциометрические, емкостные, индуктивные. Объясняется это, в основном, тем, что индукционные ДУ имеют наиболее стабильные характеристики.

Индукционный ДУ представляет собой миниатюрный трансформатор, у которого потокоцепление вторичной обмотки меняется в за-

зависимости от угла поворота ротора ДУ. Являясь трансформатором, индукционный ДУ может работать только на переменном токе. В гиросприборах среднего класса точности для питания ДУ используют напряжения, получаемые от централизованных источников питания со стандартными частотами: 400, 500, 1000 Гц. В прецизионных приборах питание ДУ осуществляют от автономных электронных источников, разработанных специально для данного ДУ. При этом частота питающего напряжения подбирается такой, чтобы ДУ обеспечивал высокое качество работы. Номинальные значения частот в этом случае составляют единицы, десятки и даже сотни кГц.

На рис. I представлена типичная схема включения индукционного ДУ. Основными элементами схемы являются: индукционный датчик угла (ИДУ), предварительный усилитель (ПУ), усилитель-преобразователь (УП), исполнительное устройство (ИУ).

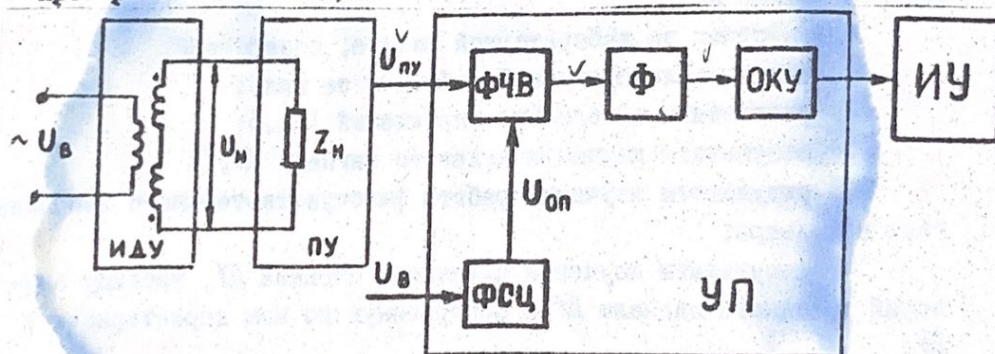


Рис. I

Введение предварительного усилителя способствует снижению помех (наводок) в выходном сигнале ДУ, поэтому он должен быть установлен как можно ближе к ДУ и соединен с ним экранированными проводами. Входное сопротивление предварительного усилителя Z_H (которое должно быть достаточно велико) является нагрузкой вторичной (сигнальной) обмотки ДУ.

Усилитель-преобразователь, который может устанавливаться как внутри гиросприбора, так и за его пределами, в своем составе может иметь: подаватель помех сигнала, усилитель мощности, преобразователь тока. Выход УП подключается к обмотке управления какого-либо исполнительного устройства: датчика момента, двигателя стабилизации, двигателя отработки.

В индукционных ДУ ток в сигнальной цепи обуславливает ряд отрицательных явлений: упругие моменты сопротивления повороту

ротора, снижение линейной зоны рабочей характеристики и др. Вследствие этого ток в сигнальной цепи стремятся свести к минимуму. Наиболее простой путь - увеличение входного сопротивления Z_H предварительного усилителя. Обычно Z_H имеет значение порядка десятков килоом. При таком большом нагрузочном сопротивлении индукционный ДУ работает практически в режиме холостого хода.

2. Конструкция индукционных датчиков угла

Изготовленные промышленностью образцы индукционных ДУ представлены на демонстрационном стенде. В левой его части находятся индукционные ДУ с ферромагнитным ротором, в правой - индукционные рамочные ДУ, и под № 5 (см. стенд) - ДУ с ротором в виде короткозамкнутого витка. В нижней части стенда приведены числовые значения основных характеристик индукционных ДУ.

ДУ с ферромагнитным ротором. Магнитопровод (ротора и статора) этих ДУ набирается из пластин магнитомягкого материала, например пермаллоев типа 50 Н, 79 НМ, реже выполняется из низкочастотных ферритов и нешихтованного (сплошного) материала. Зазор между полюсами статора и ротора обычно составляет 0,1...0,2 мм. На стенде под № 3, 4, 5 представлены 6-полюсный, 12-полюсный и двухкоординатный 5-полюсный ДУ. Базовым элементом для них является 3-полюсная секция (рис. 2).

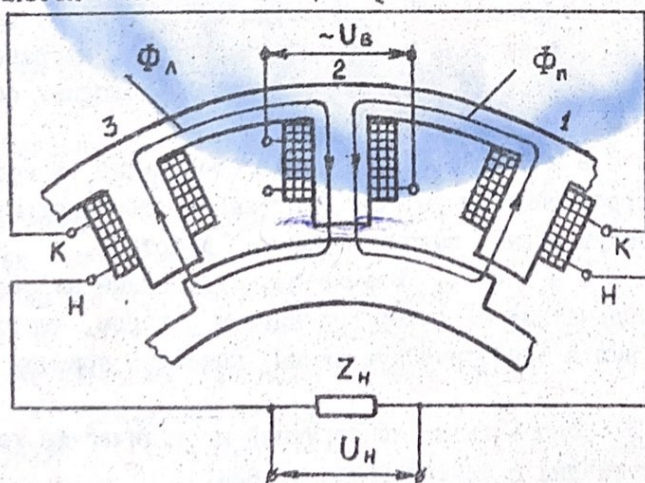


Рис. 2

На среднем полюсе 2 статора расположена катушка возбуждения, которая питается напряжением возбуждения $U_{\text{в}}$. На крайних по-

лках 1 и 3 статора помещены сигнальные катушки, включенные между собой электрически — последовательно, а магнитно — встречно (т.е. конец одной катушки подключен к концу другой). Выходные концы сигнальной цепи подключены к сопротивлению нагрузки Z_n .

Полос ротора в начальном положении полностью перекрывает полюс 2 и наполовину полюса 1 и 3 статора.

Принцип действия 3-полюсного ДУ заключается в следующем. Магнитный поток возбуждения Φ_e , создаваемый катушкой возбуждения в роторе ДУ, разделяется на два потока Φ_A и Φ_B , которые, замыкаясь через крайние полюса статора, наводят в сигнальных катушках ЭДС. Если предположить, что датчик изготовлен идеально, то при симметричном расположении ротора относительно статора магнитные сопротивления зазоров под левым и правым полюсами будут равны между собой, следовательно, будут равны потоки Φ_A и Φ_B и наводимые ими в сигнальных катушках ЭДС. Поскольку сигнальные катушки включены встречно, то результирующая ЭДС в сигнальной цепи будет равна нулю.

При повороте ротора на угол β относительно симметричного положения перекрытие ротором поверхности левого полюса увеличится (магнитное сопротивление левого зазора уменьшится), а перекрытие правого полюса уменьшится (магнитное сопротивление правого зазора увеличится). В результате этого $\Phi_A > \Phi_B$ и ЭДС, наводимая в сигнальной катушке левого полюса, станет больше ЭДС, наводимой в сигнальной катушке правого полюса. В сигнальной цепи ДУ возникнет результирующая ЭДС, амплитуда которой будет пропорциональна углу β , а ее фаза будет характеризовать направление угла β . Если в составе ДУ имеется несколько 3-полюсных секций, то наведенные в них ЭДС суммируются.

У п р а ж н е н и е 1. Изучив представленный на стенде под № 2 ДУ с ферромагнитным ротором, составить его конструктивную и электрическую схемы, пояснить принцип действия.

У п р а ж н е н и е 2. Изучив представленный на стенде под № 5 двухкоординатный ДУ с ферромагнитным ротором, составить его конструктивную и электрическую схемы, пояснить принцип действия.

Рамочные ДУ. Варианты их конструкций и технические характеристики представлены в правой части стенда.

Статоры рамочных ДУ изготовлены из пермаллоя, роторы представляют собой плоские сигнальные катушки, наклеенные на немагнитные кронштейны.

6

Принцип действия рамочного ДУ поясним на примере ДУ, дифференциального по ЭДС, который представлен на стенде под № 2. Конструктивная и электрическая схемы этого ДУ представлены на рис. 3.

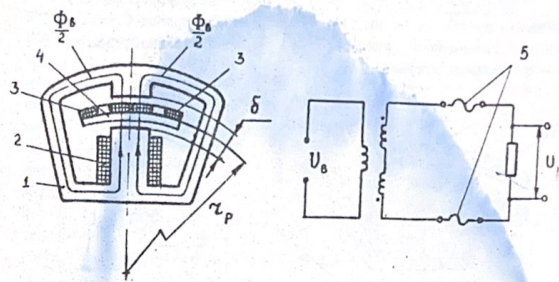


Рис. 3

В ДУ катушка возбуждения 2 расположена на среднем стержне магнитопровода 1 статора. В воздушном зазоре устанавливается ротор 4 с двумя плоскими сигнальными катушками ("рамками") 3, которые включены последовательно — встречно через токоподводы 5 на нагрузку.

Магнитный поток Φ_e , создаваемый катушкой возбуждения, проходя через зазор магнитопровода, разветвляется на два потока и замыкается через крайние стержни магнитопровода. В нулевом положении обе сигнальные катушки пронизываются одинаковыми по фазе и значению ($\Phi_e/2$) магнитными потоками. Так как сигнальные катушки включены магнитно — встречно, то в них наводятся равные по значению и противоположные по фазе ЭДС. Следовательно, при нулевом положении ротора с сигнальными катушками с выхода ДУ теоретически будет сниматься нулевой сигнал.

При перемещении ротора на угол β одну из катушек будет пронизывать магнитный поток $\Phi_e/2 + \Delta\Phi$, а другую $\Phi_e/2 - \Delta\Phi$. Амплитуды ЭДС, наводимых в сигнальных катушках, не будут равны между собой, и с выхода ДУ будет сниматься сигнал, амплитуда которого пропорциональна углу β , а фаза характеризует направление угла.

7

У п р а ж н е н и е 3. Изучив представленный на стенде под № 1 рамочный ДУ, составить его конструктивную и электрическую схемы, пояснить принцип действия.

✓ 3. Датчики угла с ротором в виде короткозамкнутого витка

Конструктивная схема ДУ с ротором в виде короткозамкнутого витка приведена на рис. 4, где 1 – магнитопровод (статор); 2 – короткозамкнутый виток (ротор), 3 – катушка возбуждения; 4 – сигнальная катушка.

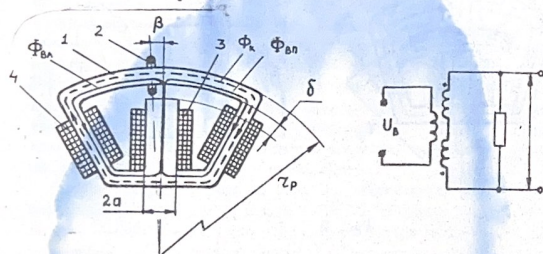


Рис. 4

Статор, как и в рамочных ДУ, набирается из пластин пермаллоя; ротор представляет собой кольцо, выполненное из медной проволоки. Диаметр кольца определяется конструкцией ДУ. Диаметр провода, из которого изготавливается кольцо, обычно составляет 0,3...0,5 мм. Катушки возбуждения и сигнальные катушки наматываются медным проводом диаметром 0,12...0,07 мм.

На рис. 4 представлен ДУ с двумя последовательно-встречно включенными сигнальными катушками, расположенными на крайних стержнях магнитопровода. Такая схема ДУ позволяет уменьшить периметр короткозамкнутого витка и длину рабочего зазора, заметно повысить крутизну характеристики ДУ и снизить потребление мощности. Однако эта схема не позволяет регулировать положение электрического центра ДУ, что отрицательно сказывается на его моментных характеристиках.

На стенде под № 5 представлен ДУ с одной сигнальной катушкой, расположенной на перемычке магнитопровода. Такая схема от-

крывает принципиальную возможность совмещения электрического центра ДУ с его геометрическим путем перемещения сигнальной катушки вдоль перемычки магнитопровода. Недостатки схемы – увеличение длины рабочего зазора и периметра короткозамкнутого витка.

Принцип действия ДУ с ротором в виде короткозамкнутого витка заключается в изменении потокоцепления сигнальных катушек, обусловленного магнитным потоком Φ_k , создаваемым короткозамкнутым витком. Например (см. рис. 4), магнитный поток возбуждения, разделяясь на две половины Φ_{c1} и Φ_{c2} , проходит внутри сигнальных катушек 4, наводя в них ЭДС. Если короткозамкнутый виток 2 отклонится от центрального положения на угол β , причем $\sin \beta < \alpha$, то часть потока Φ_{c1} будет проходить внутри витка и наводить в нем ЭДС. Эта ЭДС создает в короткозамкнутом витке ток, а последний – намагничивающую силу и магнитный поток Φ_k , который будет проходить по периметру магнитопровода, как показано пунктиром на рис. 4. По отношению к потоку Φ_k сигнальные катушки оказываются включенными согласно, поэтому ЭДС, наводимые в них потоком Φ_k , суммируются. Эта суммарная ЭДС и является выходным сигналом ДУ, ее амплитуда пропорциональна углу β , а фаза характеризует направление угла.

У п р а ж н е н и е 4. Изучив представленный на стенде под № 5 ДУ с ротором в виде короткозамкнутого витка, составить его конструктивную и электрическую схемы, пояснить принцип действия.

4. Основные характеристики индукционных датчиков угла

На рис. 5 представлен типичный вид рабочей характеристики ДУ $|U_n| = f(\beta)$, где U_n – выходной сигнал (напряжение ДУ); β – угол поворота ротора ДУ относительно его статора. Пунктиром показана характеристика идеального ДУ, сплошной линией – характеристика реального ДУ. Видно, что характеристика в некотором диапазоне углов отклонения ротора относительно статора близка к линейной.

Основными параметрами, характеризующими работу ДУ, являются:

$k_{\Delta U} = U_n / \beta$ – крутизна характеристики выходного сигнала (передающий коэффициент ДУ), В/рад; обычно значения $k_{\Delta U}$ составляют 10...20 В/рад (3...6 мВ/угл.мин);

β_m – максимальный угол поворота ротора ДУ, при котором сохраняется (с определенной точностью) линейная зависимость меж-

ДУ выходным сигналом и углом поворота ротора, град; обычно $\beta_A = 1 \dots 10$ град;
 P - мощность, потребляемая ДУ; обычно $P = 10^{-3} \dots 10^{-1}$ Вт.

Поскольку ЛУ изготавливаются с определенными погрешностями и монтаж их в приборах не идеален, то и работа ДУ сопровождается рядом отрицательных явлений, одни из которых обуславливают появление моментов тяжения, а другие являются причиной появления помех в выходном сигнале.

Геометрически центральное положение ротора ДУ относительно статора назовем геометрическим центром ДУ (см. рис. 5, точка O_3).

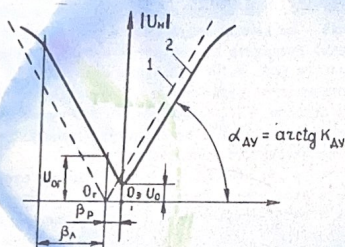


Рис. 5

Угловое положение ротора относительно статора, при котором выходной сигнал ДУ минимален по абсолютной величине, назовем электрическим центром ДУ (см. рис. 5, точка O_2). В результате неидеальности изготовления геометрический и электрический центры ДУ, как правило, не совпадают. При сборке прибора ротор всегда устанавливается в электрический центр, при этом ротор оказывается отклоненным от своего геометрически центрального положения на угол β_S , называемый углом регулировки. Наличие угла регулировки часто обуславливает появление моментов тяжения и ложных сигналов ДУ при радиальных (нерабочих) смещениях ротора.

Неидеальность работы ДУ обычно характеризуется следующими параметрами:

M_C - моментом тяжения при электрически центральном поло-

жении ротора (нулевой момент);

$M = f(\beta)$ - моментами, порождаемыми углом поворота ротора относительно статора (упругий момент);

U_0 - выходным сигналом при электрически центральном положении ротора (нулевой сигнал);

ложными сигналами, возникающими в результате наводок, нерабочих (например, радиальных) смещений ротора и т.д.

Важной характеристикой датчиков углов является стабильность их параметров, т.е. стабильность крутизны нулевого сигнала, моментов тяжения и других параметров в условиях эксплуатации.

Для сравнения между собой различных типов датчиков угла вводятся относительные показатели:

$$U_0/K_{DY}; M_0/K_{DY}; \sqrt{P}/K_{DY}.$$

5. Электронные устройства, обслуживающие работу датчиков угла

Структура электронного устройства во многом определяется наличием у индукционных ДУ нулевых сигналов U_0 . Нулевой сигнал - явление вредное, затрудняющее получение полезной информации с ДУ в наиболее ответственном случае, т.е. в диапазоне малых углов отклонения ротора ДУ от его электрически центрального положения. Кроме того, нулевой сигнал при большом коэффициенте усиления предусилителя может приводить к насыщению его выходных каскадов. При этом усилитель теряет работоспособность. Чтобы этого не происходило, предусилитель выполняют с малыми коэффициентами усиления (10...20), а недостающее значение коэффициента усиления реализуют с помощью оконечного усилителя (ОКУ). Обычно в составе нулевого сигнала имеются первая и высшая гармоники. Причем первая гармоника доминирует по амплитуде над высшими и сдвинута по фазе по отношению к полезному сигналу на 90°. Эта особенность нулевого сигнала позволяет отличить его от полезного сигнала и устранить.

Между предусилителем и оконечным усилителем ставят устройство, устраняющее нулевой сигнал. Это устройство включает в себя фазочувствительный выпрямитель (ФЧВ), фазосдвигающую цепь (ФЦ), фильтр (Ф), устраняющий вторую и высшие гармоники в выпрямленном сигнале. Таким образом, структурная схема электронного устройства, обслуживающего работу ДУ, принимает вид, представленный на рис. 1.

Омечный усилитель в зависимости от типа исполнительного устройства ИУ может выполняться либо как усилитель переменного тока, либо как усилитель постоянного тока. В первом случае на его входе устанавливается модулятор сигнала. Схема ФЧВ, построенного на базе операционного усилителя (ОУ), приведена на рис. 6.

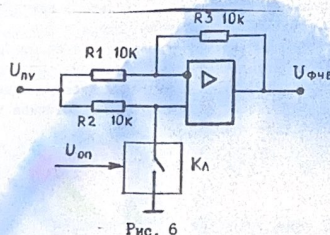


Рис. 6

В состав схемы входит электронный ключ (Кл), коммутируемый управляющим опорным напряжением $U_{оп}$. Если на ключ подается положительная полуволна опорного напряжения, то ключ разомкнут, если отрицательная — замкнут.

При разомкнутом ключе схема ФЧВ работает как неинвертирующий усилитель с коэффициентом усиления, равным +1, т.е. $U_{ФЧВ} = U_{нв}$. При замкнутом ключе потенциалы обоих входов ОУ становятся, равными нулю (так как один из них подключается к "земле"), поэтому схема ФЧВ работает как инвертирующий усилитель с коэффициентом усиления, равным -1, т.е. $U_{ФЧВ} = -U_{нв}$.

С помощью регулировки ФЧВ добиваются совпадения по фазе опорного напряжения $U_{оп}$ и полезного сигнала ДУ $U_{нв}$.

У п р а ж н е н и е 6. Пояснить работу ФЧВ и фильтра с помощью временных диаграмм $U_{нв}(t)$, $U_{оп}(t)$, $U_{ФЧВ}(t)$, $U_{ф}(t)$, если а) $\beta > 0$, б) $\beta = 0$, в) $\beta < 0$.

6. Аппаратура, используемая в работе

а. На массивной плате размещены:

испытываемый ремочный ДУ, установленный в устройстве, позволяющем осуществлять поворот ротора ДУ относительно статора двумя способами: прецизионным — с помощью рычага и двух микрометрических винтов (минимальный шаг равен $1''$) и грубым — с помощью

маховичка, расположенного в верхней части устройства (шаг равен $2'$). Прецизионный способ поворота используется для выявления нулевого сигнала ДУ, грубый — для снятия его характеристики в пределах угла отклонения ротора от электрического центра ДУ, равного $\pm 2^\circ$;

скрытый электромагнит и электронные блоки;
милливольтметр ВЗ-38, предназначенный для измерения выходного сигнала ДУ после его усиления;
осциллограф СГ-90, предназначенный для наблюдения формы кривых выходных напряжений ДУ;
стрелочный вольтметр постоянного тока, предназначенный для измерения выходного напряжения ФЧВ;
тумблер К2, подключающий вход осциллографа либо к выходу предусилителя, либо к выходу ФЧВ;
тумблер К3, подключающий к выходу ФЧВ фильтр;
ручка "фаза", регулирующая фазу опорного напряжения ФЧВ;
сигнальная лампа (Л), контролирующая подключение лабораторной установки к сети.

Питание лабораторной установки осуществляется сетевым трехфазным напряжением 40 В, 1 000 Гц.

б. Стенд с конструкциями и характеристиками ДУ.

7. Постановка задачи по исследованию ДУ

Исследовать нулевой сигнал ДУ (фазу, значение, форму кривой).

Наблюдать работу электронных блоков.

Снять характеристики ДУ $|U_n| = f(\beta)$ и определить передаточный коэффициент ДУ $K_{ДУ}$.

У п р а ж н е н и е 6. Уяснив постановку задачи, самостоятельно составить:

схему испытаний ДУ;
продумать план проведения экспериментов и расчетов;
продумать форму представления конечных результатов.

8. Порядок выполнения работы

1. Приступить к оформлению отчета:

записать название и цель работы;

выписать заинтересовавшие сведения из предыдущих параграфов.

2. Привести результаты выполнения упражнений 1...6.

3. Составить структурную схему испытаний ДУ.
4. Подготовить испытательную установку к проведению эксперимента:
 - тумблеры "сеть" на панелях милливольтметра и осциллографа поставить в положение "выкл."; переключатель пределов измерения милливольтметра поставить в положение "100 В"; режим синхронизации осциллографа установить от источника опорного напряжения, для чего кнопку синхронизации установить в положение "внешняя"; ручку "усилитель" поставить в положение "5"; ручку "развертка" поставить в положение "100"; тумблер К2 установить на массивной плите в положение "усилитель"; тумблер "40 В, 1 000 Гц" на распределительной коробке (на стенде) поставить в положение "выкл."; тумблер К3 перевести в положение "выкл."; подключить лабораторную установку к трехфазному напряжению "40 В, 1 000 Гц", а измерительные приборы - к сетевому напряжению 220 В.
 - б. Включить измерительные приборы, поставив тумблер "сеть" в положение "вкл.", и прогреть их в течение 5 мин.
 - в. Подать питание на лабораторную установку, для чего тумблер "40 В, 1 000 Гц" поставить в положение "вкл.". При этом должна загореться сигнальная лампа.
 - 7. Выделить и изучить нулевой сигнал ДУ:
 - регулируя с помощью микрометрических винтов угловое положение ротора ДУ и увеличивая чувствительность осциллографа (вращая ручку "усилитель" по часовой стрелке), получить изображение нулевого сигнала; зарисовать это изображение, обратив внимание на фазу нулевого сигнала; измерить значение нулевого сигнала по милливольтметру (при этом учесть, что коэффициент усиления предусилителя равен 20); после измерения переключатель пределов милливольтметра поставить в положение "100 В".
 - 8. Наблюдать полезный сигнал ДУ, для чего:
 - снизить чувствительность осциллографа; вращая маховичок, отклонять ротор ДУ относительно его статора на углы $\beta \approx +0,5^\circ$ и $\beta \approx -0,5^\circ$; наблюдать изменение

- полезного сигнала на экране осциллографа; зарисовать полезный сигнал, обратив внимание на его фазовые характеристики.
9. Наблюдать работу ФЧВ, для чего:
 - осциллограф включить в режим "открытый вход" (∞); тумблер К2 установить в положение "ФЧВ"; вращая маховичок, отклонять ротор ДУ и наблюдать за изменением полезного сигнала на выходе ФЧВ; вращая ручку "фаза", добиться качественного выпрямления полезного сигнала; возвратить ротор ДУ в электрически центральное положение и, увеличивая чувствительность осциллографа, наблюдать за прохождением нулевого сигнала ДУ через ФЧВ; зарисовать наблюдаемые сигналы, обратив внимание на их фазы.
 10. Наблюдать работу фильтра, для чего:
 - тумблер К3 поставить в положение "фильтр"; вращая маховичок, отклонять ротор ДУ и наблюдать на экране осциллографа форму отфильтрованного сигнала.
 11. Определить передаточный коэффициент (крутизну) ДУ $K_{\Delta y}$, для чего:
 - тумблер К2 поставить в положение "усилитель", тумблер К3 - в "выкл."; установить ротор ДУ в электрический центр, получив на выходе ДУ нулевой сигнал; вращая маховичок, отклонять ротор ДУ на углы $\pm 1^\circ$ с шагом $0,1^\circ$, с помощью вольтметра измерять выходной сигнал ДУ; результаты измерений занести в таблицу, построить график $|U_n| = f(\beta)$, по графику определить параметр $K_{\Delta y}$.
 9. Контрольные вопросы
 1. Пояснить принцип действия испытуемого рамочного ДУ.
 2. Изменится ли выходной сигнал рамочного ДУ при радиальных смещениях его ротора а) по вертикали, б) по горизонтали?
 3. Выбрать критерии сравнения и сравнить различные ДУ и ДУ с ферромагнитным ротором.
 4. Как скажется несимметричность ветвей характеристики ДУ при его работе в цепи обратной связи акселерометра?