

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Кафедра «Конструирование и производство приборов»

А. Л. Савченко

В. Т. Минченя

В. А. Бурак

АВТОМАТИКА

Пособие

для обучающихся по специальностям 6-05-0716-03
«Информационно-измерительные приборы и системы»,
6-05-0716-05 «Технические системы обеспечения безопасности»
и 6-05-0716-06 «Биомедицинская инженерия»

*Рекомендовано учебно-методическим объединением
высших учебных заведений Республики Беларусь
по образованию в области приборостроения*

Минск
БНТУ
2025

УДК 681.51 (075.8)
ББК 32.965я7
С13

Рецензенты:

кафедра электронной техники и технологии УО «Белорусский
государственный университет информатики и радиоэлектроники»
(зав. кафедрой, канд. техн. наук, доцент *С. И. Мадвейко*);
ведущий научный сотрудник лаборатории физики
электромагнитных потерь Института прикладной физики
Национальной академии наук Беларуси,
канд. техн. наук *А. А. Осипов*

Савченко, А. Л.

С13 Автоматика: пособие для обучающихся по специальностям
6-05-0716-03 «Информационно-измерительные приборы и системы»,
6-05-0716-05 «Технические системы обеспечения безопасности»
и 6-05-0716-06 «Биомедицинская инженерия» / А. Л. Савченко,
В. Т. Минченя, В. А. Бурак. – Минск : БНТУ, 2025. – 76 с.
ISBN 978-985-31-0159-1.

Пособие предназначено для проведения лабораторных занятий со студентами специальностей 6-05-0716-03 «Информационно-измерительные приборы и системы», 6-05-0716-05 «Технические системы обеспечения безопасности» и 6-05-0716-06 «Биомедицинская инженерия». Пособие является дополненным и переработанным вариантом издававшихся ранее лабораторных практикумов по дисциплинам «Основы автоматизации» и «Основы автоматизации производственных процессов».

В каждой работе приводятся теоретические сведения, необходимые для выполнения работ, порядок выполнения работ, содержание отчета и контрольные вопросы.

УДК 681.51 (075.8)
ББК 32.965я7

ISBN 978-985-31-0159-1

© Савченко А. Л., Минченя В. Т.,
Бурак В. А., 2025
© Белорусский национальный
технический университет, 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
Лабораторная работа № 1	5
Лабораторная работа № 2	13
Лабораторная работа № 3	25
Лабораторная работа № 4	33
Лабораторная работа № 5	44
Лабораторная работа № 6	56
Литература	76

ВВЕДЕНИЕ

Лабораторные работы наряду с практическими занятиями закрепляют теоретические знания, полученные на лекциях по дисциплине «Автоматика», и содействуют приобретению практических умений и навыков. В ходе курса лабораторных работ студенты знакомятся:

- с работой систем автоматического регулирования угла поворота;
- с основными понятиями об устойчивости систем, способами их обеспечения и оценки;
- с динамическими звеньями на примере широко используемых в электронике и схемотехнике дифференцирующих и интегрирующих RC -цепей;
- с оценкой точности работы систем автоматического регулирования и их отдельных элементов.

На основании усвоенных при выполнении теоретического материала и результатов обработки экспериментальных данных студенты делают выводы, проводят аналогии и сопоставления, что приводит к формированию у них инженерного мышления.

Результатом выполнения студентом лабораторной работы является отчет, содержание которого должно соответствовать указанному в лабораторной работе.

Лабораторная работа № 1

ИССЛЕДОВАНИЕ СЛЕДЯЩЕЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ С РЕОСТАТНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

Цель работы: ознакомиться с принципом работы и устройством следящей САР с реостатной обратной связью на постоянном токе; исследовать статическую характеристику системы; определить качество процесса регулирования.

Инструменты и принадлежности к работе

1. Лабораторная установка (1 шт.).
2. Источник питания (1 шт.).

Основные положения

Следящей САР называется такая система, алгоритм функционирования которой содержит предписание изменять управляемую величину в зависимости от неизвестного заранее значения переменной величины на входе автоматической системы. Следящие системы являются частью семейства систем, известных как системы регулирования с обратной связью.

В зависимости от физической природы различают:

- системы воспроизведения угла;
- частоты вращения;
- момента;
- электрических величин.

Во всех перечисленных случаях входная величина может быть различной. Чаще всего используют входное воздействие в виде напряжения или угла поворота.

Рассмотрим конструкцию следящих САР на примере систем для воспроизведения угла поворота. Они предназначены для передачи на расстояние информации об углах поворота различных объектов (информационные системы) или для поворота на заданный угол удаленных объектов, например, антенн, артиллерийских орудий, подвижных элементов станков и другого технологического оборудования (силовые системы).

Функциональная схема САР показана на рис. 1.1.

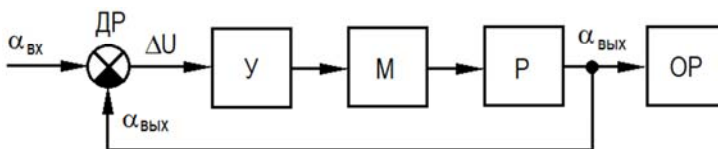


Рис. 1.1. Функциональная схема САР угла поворота

Сравнивающее устройство в таких системах принято называть датчиком рассогласования (ДР на схеме). Он имеет парную конструкцию. Один из элементов пары устанавливается на входе в качестве датчика входного угла, второй – на выходе в качестве датчика выходного угла. Результатом их взаимодействия является сигнал рассогласования в виде электрического напряжения ΔU , которое зависит от углового рассогласования $\Delta\alpha = \alpha_{\text{вх}} - \alpha_{\text{вых}}$. Далее это напряжение усиливается и питает электродвигатель ЭД, который через редуктор Р поворачивает объект регулирования ОР. Система постоянно стремится к состоянию покоя, когда $\Delta\alpha = 0$ и напряжение рассогласования $\Delta U = 0$.

В качестве датчиков рассогласования используют мостовые схемы на потенциометрических датчиках, сельсины, вращающиеся трансформаторы. Возможно также использование механических дифференциалов, но потребуются протяженная механическая связь между входом и выходом системы, а также дополнительный преобразователь углового рассогласования в электрическое напряжение.

В цифровых системах для измерения рассогласования часто используют импульсные энкодеры, которые устанавливают на входе и на выходе и подключают к контроллеру, вырабатывающему сигнал управления электроприводом.

Задающее устройство на схеме отсутствует, так как задающее воздействие может формироваться человеком-оператором, объектом, угол которого измеряется на расстоянии, специальным командным элементом.

По структурной схеме следящие системы могут быть одно- и двухканальными, с одним или несколькими принимающими устройствами, с последовательными или параллельными корректирующими устройствами, простыми и взаимосвязанными сложными и т. п.

На практике наиболее распространенными являются одноканальные следящие системы. Для повышения точности применяются двух-

канальные следящие системы, известные как системы с грубым и точным отсчетами.

В случае, когда суммарная погрешность исчисляется угловыми секундами при большом передаточном отношении электрической редукции, применяются трехканальные следящие системы.

По типу измерительных элементов следящие системы могут иметь индуктивные, индукционные, потенциометрические, фотоэлектрические, емкостные, генераторные и другие датчики.

По типу исполнительных устройств следящие системы могут быть гидравлическими, пневматическими и комбинированными (с муфтами), с электродвигателями переменного и постоянного токов, шаговыми двигателями, моментными двигателями и т. п.

В зависимости от типа исполнительных устройств в маломощных системах применяются, главным образом, полупроводниковые усилители постоянного и переменного токов. В системах средней мощности возможно применение магнитных и тиристорных усилителей. В мощных системах применяются электромашинные усилители и тиристорные преобразователи.

По принципу управления исполнительным двигателем наибольшее распространение имеют следящие системы непрерывного действия с пропорциональным изменением сигнала. На обмотку управления двигателем подается напряжение, пропорциональное углу рассогласования, и, соответственно, частота вращения исполнительного двигателя пропорциональна сигналу рассогласования.

Применяется также управление релейного типа, при котором на обмотку управления двигателя при определенном угле рассогласования или при определенном значении управляющего сигнала подается максимальное напряжение. При частотном управлении двигателем на обмотку управления подаются импульсы определенной длительности во времени, но изменяется частота их следования, или при постоянной частоте следования импульсов изменяется их длительность. При этом частота вращения двигателя пропорциональна частоте импульсов или, соответственно, длительности импульсов.

Возможны схемы управления, в которых при малом рассогласовании имеется линейный участок изменения сигнала, а при некоем заданном угле рассогласования применяется релейное управление.

При создании следящих систем в технических требованиях задаются следующие параметры: точность, диапазон работы, максималь-

ная скорость и ускорение входной оси, величина и характер нагрузки, род источника питания, габариты и надежность, а также условия эксплуатации систем – температура, влажность окружающей среды, вибрации и пр. В соответствии с этими требованиями предварительно выбирают измерительные элементы, отвечающие требованиям точности в заданном диапазоне работ.

Исходя из значений нагрузки, скорости и ускорения, а также из режима работы, выбирают исполнительное устройство и передаточное отношение редуктора привода. В маломощных следящих системах в качестве исполнительного элемента получили широкое распространение двухфазные асинхронные двигатели. При проектировании необходимы малые люфты и малый момент инерции редуктора. Момент инерции редуктора должен быть меньше момента инерции ротора двигателя, поэтому необходимо предельно уменьшать момент инерции трибки на валу двигателя. Для уменьшения диаметра шестерни, зацепляющейся с трибкой, передаточное отношение первой пары шестерен редуктора следует выбирать в пределах 2–3, передаточное отношение второй пары должно быть не более 4–6. Приведенный момент инерции последующих пар будет пренебрежимо малым. Тип усилителя и входящие в него преобразовательные элементы выбирают в соответствии с выходными параметрами измерительных элементов (выходным сопротивлением приемника, остаточным и максимальным выходными напряжениями приемника и т. д.) и исполнительного элемента (сопротивлением нагрузки и максимальной выходной мощностью) с учетом принципа управления двигателем. В маломощных следящих системах используются полупроводниковые усилители. Постоянные времени всех цепей и элементов, коэффициенты усиления преобразователей и усилителей, передаточные отношения и прочие параметры элементов определяются расчетным или экспериментальным путем, а также по справочным данным. Далее выбирается структурная схема и составляются дифференциальные уравнения звеньев системы и передаточные функции звеньев для расчета системы на устойчивость и выбора корректирующих цепей в целях обеспечения необходимого запаса устойчивости и необходимого качества переходного процесса.

При расчете погрешностей следящих систем учитывают, что суммарная погрешность состоит из статической $\Delta_{\text{фст}}$ и динамической $\Delta_{\text{фдин}}$ погрешностей.

Статическая погрешность следящей системы представляет собой разность между угловыми наложениями входной и выходной осей после отработки двигателем системы заданного угла. Эта погрешность складывается из погрешностей измерительных элементов $\Delta_{\text{физ}}$ датчика и приемника системы, погрешностей преобразователей аналоговых сигналов в код в цифровых следящих системах $\Delta_{\text{фак}}$, погрешности зоны нечувствительности $\Delta_{\text{фз}}$, обусловленной моментом нагрузки, погрешности от дрейфа нулевого положения датчика и приемника, усилительно-преобразовательного устройства $\Delta_{\text{фз}}$, погрешности изготовления зубчатых колес редуктора в системах грубого и точного отсчетов $\Delta_{\text{фзк}}$, погрешности люфта в них $\Delta_{\text{фл}}$. Часто необходимо учитывать погрешности от температуры окружающей среды $\Delta_{\text{фт}}$, изменения напряжения и частоты питания и от каких-либо других факторов. Так как перечисленные источники погрешностей являются взаимно независимыми, суммарную погрешность можно определить как среднеквадратическую, т. е.:

$$\Delta_{\text{фст}} = \sqrt{\Delta_{\text{физ}}^2 + \Delta_{\text{фак}}^2 + \Delta_{\text{фзз}}^2 + \Delta_{\text{фзк}}^2 + \Delta_{\text{фл}}^2 + \Delta_{\text{фт}}^2}.$$

Динамическая погрешность следящей системы $\Delta_{\text{фдин}}$ представляет собой разность между угловыми положениями входной и выходной осей при произвольном законе вращения входной оси. Слежение за положением входной оси осуществляется с определенной точностью в зависимости от выбранных параметров системы. Оценку динамической погрешности, как правило, производят либо при непрерывном вращении, либо при гармонических колебаниях входной оси. При допустимой динамической погрешности требуемый переходной процесс должен обеспечиваться выбором необходимых корректирующих устройств и их параметров. Погрешность в установившемся режиме при вращении входной оси с постоянной скоростью называют кинетической погрешностью. Она зависит от коэффициента усиления усилителя и параметров следящей системы. Отношение частоты вращения $\Omega_{\text{вх}}$ входного вала системы к установившемуся значению скоростной погрешности $\Delta_{\text{фск}}$ носит название добротности системы по скорости K : $K = \Omega_{\text{вх}} / \Delta_{\text{фск}}$.

Перечисленные динамические погрешности должны быть либо одного порядка со значением основной погрешности – погрешности

измерительных элементов, либо меньше ее даже в тех случаях, когда погрешность измерительных элементов исчисляется угловыми секундами. Таким образом, суммарная погрешность всей системы $\Delta_{\varphi\Sigma}$ может быть определена как

$$\Delta_{\varphi\Sigma} = \sqrt{\Delta_{\varphi_{\text{ст}}}^2 + \Delta_{\varphi_{\text{дин}}}^2}.$$

На рис. 1.2 представлена следящая система автоматического регулирования (САР), состоящая из потенциометра-датчика ПД и потенциометра-приемника ПП, включенных параллельно к общему источнику питания $U_{\text{п}}$. Подвижные контакты потенциометров соответственно соединены механически с задающим и исполнительным рабочими органами. Напряжение ΔU , снимаемое с подвижных контактов потенциометров, является напряжением сигнала рассогласования системы. При согласованном положении рабочих органов, когда $\alpha_{\text{вх}} = \alpha_{\text{вых}}$, напряжение сигнала равно нулю. Напряжение сигнала рассогласования ΔU поступает на вход электронного усилителя У, а далее на исполнительный асинхронный двигатель М. Вал двигателя через зубчатую передачу ЗП связан с подвижным контактом потенциометра приемника. Система работает на устранение ошибки рассогласования.

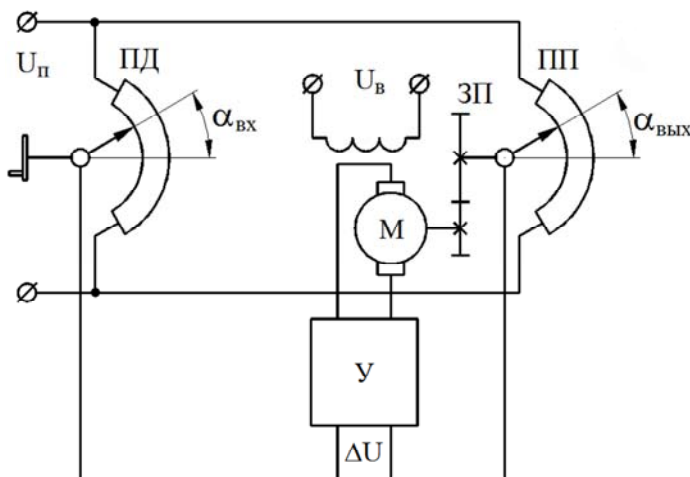


Рис. 1.2. Следящая САР угла поворота

Лабораторный макет показан на рис. 1.3.

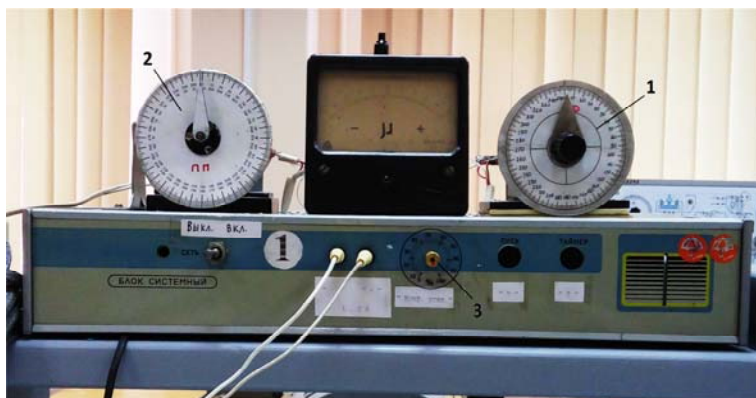


Рис. 1.3. Лабораторный макет

Справа на макете расположен потенциометр-датчик с рукояткой задания угла и шкалой 1, справа – потенциометр-приемник с электроприводом и шкалой 2. Коэффициент усиления можно изменять ручкой 3.

Порядок выполнения работы

1. Включить установку и источник питания.
2. Установить минимальный коэффициент усиления усилителя при помощи ручки регулятора «УСИЛЕНИЕ».
3. Установить шкалы потенциометра-датчика и потенциометра-приемника на «НОЛЬ».
4. Поворачивая движок потенциометра-датчика по часовой стрелке на углы, кратные 20° , снять показания значений угла поворота с отсчетных устройств (X – угол поворота потенциометра-датчика $\alpha_{\text{ВХ}}$, Z – угол поворота потенциометра-приемника $\alpha_{\text{ВЫХ}}$). После поворота на 360° измерения повторить, поворачивая рукоятку против часовой стрелки (стрелку отсчетного устройства потенциометра-приемника оставить в последней позиции, на «0» не смещать!).
5. Пункты 3 и 4 повторить для среднего и максимального значения коэффициента усиления усилителя.
6. Полученные данные занести в таблицу.

Таблица 1.1

№	По часовой стрелке			Против часовой стрелки		
	X	Z	σ	X	Z	σ

7. Определить для каждого направления вращения потенциометра-датчика и коэффициента усиления усилителя максимальную погрешность передачи угла в установившемся режиме $\sigma = X - Z$.

8. Построить графики зависимости $z = f(x)$ для поворота по часовой и против часовой стрелки для каждого коэффициента усиления.

Содержание отчета

1. Результаты измерений в виде таблиц.
2. Графики зависимости $z = f(x)$ для различных коэффициентов усиления.
3. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Принцип действия и классификация следящих САР.
2. Основные источники погрешностей следящих САР.
3. Потенциометрические следящие САР угла поворота.
4. Какие параметры задаются в технических требованиях при создании следящих систем?
5. Как определить добротность следящей САР?

Лабораторная работа № 2

ИССЛЕДОВАНИЕ СИНХРОННОЙ ПЕРЕДАЧИ НА СЕЛЬСИНАХ

Цель работы: ознакомление с конструкцией, назначением, схемами включения при работе в различных режимах и принципом работы сельсинов в системах электроавтоматики.

Инструменты и принадлежности к работе

1. Стенд НТЦ-12 (1 шт.).
2. Осциллограф (1 шт.).
3. Набор грузов.

Основные положения

Сельсин (англ. *selsyn* = *self* + *synchronizing* – самосинхронизирующийся) – электрическая машина, имеющая на статоре (роторе) смещенные в пространстве на 120° и соединенные звездой три обмотки, называемые обмоткой синхронизации или трехфазной обмоткой, а на роторе (статоре) – однофазную обмотку. Внешне похожи на электродвигатели (рис. 2.1).



Рис. 2.1. Сельсины ДИ-423

Сельсины предназначены:

- для осуществления поворотов или синхронного вращения мало-нагруженного исполнительного вала от механически не связанного с ним командного вала, т. е. в дистанционных системах управления, для передачи на расстояние угловых перемещений или синхронного вращения;

- для использования в качестве датчиков угла поворота в системах автоматики, для преобразования угла рассогласования двух механически не связанных валов в электрическую величину.

Простота устройства, однотипность датчика и приемника, способность к самосинхронизации, малая погрешность, устойчивость работы при колебаниях напряжения в сети питания, очень высокая надежность относятся к основным преимуществам систем синхронной связи на сельсинах.

По конструктивному исполнению сельсины подразделяются на контактные и бесконтактные.

Основным в конструкции любого сельсина является равномерное распределение трех обмоток синхронизации по окружности статора или ротора и смещение их полюсов относительно друг друга на 120° . Это необходимо для того, чтобы результирующий магнитный поток обмотки синхронизации, равный геометрической сумме потоков трех обмоток, мог поворачиваться относительно статора (ротора) при перераспределении токов между тремя обмотками.

Большой недостаток контактных сельсинов – наличие контактных колец и щеток, которые увеличивают момент трения, уменьшают точность работы и ухудшают надежность. Указанные недостатки устранены в бесконтактных сельсинах.

В системах автоматики используются две системы синхронной передачи угла: индикаторная и трансформаторная.

Индикаторная система синхронной связи применяется там, где момент сопротивления на ведомой оси практически отсутствует (ось нагружена шкалой, стрелкой или чем-то похожим). Здесь сельсин-приемник самостоятельно отрабатывает угол, задаваемый сельсин-датчиком.

Трансформаторная система синхронной связи применяется там, где на ведомой оси имеется значительный момент сопротивления. Сельсин-приемник отрабатывает угол с помощью механически связанного с ним двигателя.

Простейшая индикаторная система синхронной связи для дистанционной передачи угла состоит как минимум из двух сельсинов. Сельсины соединяются по схеме, приведенной на рис. 2.2. Сельсин, вал ротора которого является командным, называется сельсин-датчик (СД). Сельсин, вал которого является исполнительным, называется сельсин-приемник (СП).

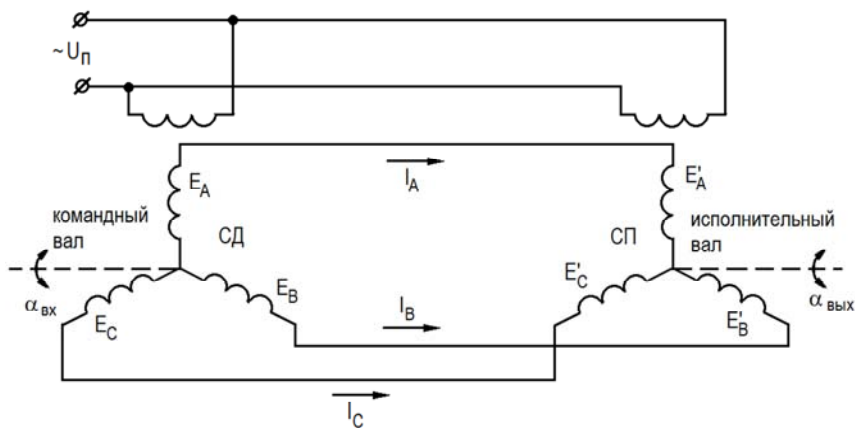


Рис. 2.2. Индикаторная схема синхронной связи

Обмотки возбуждения СД и СП подключаются к сети переменного тока. Выводы одноименных фаз соединяются между собой. При протекании тока по обмоткам возбуждения в обмотках синхронизации индуцируются ЭДС, величина которых зависит от углового расположения ротора относительно статора. В положении равновесия, когда $\alpha_{вх} = \alpha_{вых}$, эти ЭДС попарно равны, следовательно, фазные токи в линиях связи равны нулю:

$$\begin{aligned} E_A &= E_{A'}, & I_A &= 0, \\ E_B &= E_{B'}, & I_B &= 0, \\ E_C &= E_{C'}, & I_C &= 0. \end{aligned}$$

При повороте командного вала равновесие ЭДС нарушается, и по линиям связи текут фазные токи:

$$I_A = \frac{E_A - E_{A'}}{2Z},$$

$$I_B = \frac{E_B - E_{B'}}{2Z},$$

$$I_C = \frac{E_C - E_{C'}}{2Z},$$

где Z – полное сопротивление одной из трех обмоток синхронизации. Токи вызовут пульсирующие потоки в обмотках синхронизации, которые, взаимодействуя с потоками возбуждения, создают так называемый синхронизирующий момент, стремящийся уменьшить угол рассогласования $\Delta\alpha = \alpha_{\text{вх}} - \alpha_{\text{вых}}$. Следовательно, если все обмотки СД и СП соединены правильно, при вращении ротора СД ротор СП будет вращаться в ту же сторону.

Следует отметить, что одинаковый по величине, но противоположный по направлению синхронизирующий момент возникает как в сельсине-датчике, так и в сельсине-приемнике. Поэтому сельсин-датчик должен быть предохранен от самопроизвольного вращения либо за счет повышенного трения, намеренно вводимого в конструкцию сельсина, либо за счет самоторможения в механизме задания угла.

Сельсины в индикаторном режиме часто применяются для визуального снятия показаний стрелки, закрепленной на валу СП. Сельсинная пара в этом случае является указателем или индикатором (отсюда происхождение названия режима) относительного положения удаленных от мест наблюдения предметов: телекамеры, кинокамеры, поворота антенн, ворот шлюза и т. д.

При малых углах рассогласования (до 10° – 15°) синхронизирующий момент практически пропорционален синусу угла рассогласования:

$$M_c(\Delta\alpha) = M_{c_{\max}} \sin \Delta\alpha,$$

где M_c – синхронизирующий момент;

$M_{c_{\max}}$ – максимальный синхронизирующий момент.

$M_c(0) = M_c(180) = 0$, но положение сельсинов при $\Delta\alpha = 180^\circ$ является неустойчивым. Поэтому сельсинная пара в индикаторном

режиме обеспечивает синхронизацию угла в пределах одного оборота. Величина

$$M_{\text{уд}} = \left. \frac{dM_c}{d\Delta\alpha} \right|_{\Delta\alpha=0}$$

называется удельным синхронизирующим моментом, который может определяться экспериментально из снятой кривой $M_c(\Delta\alpha)$.

На основании формул можно сделать вывод, что с точностью до 1 % соблюдается практически линейная зависимость $M_c(\Delta\alpha) = M_{\text{уд}}\Delta\alpha$ в диапазоне углового рассогласования $\pm 30^\circ$.

Если на валу СП имеется момент нагрузки M_n , то процесс синхронизации будет всегда заканчиваться при

$$M_c = M_n = M_{\text{уд}}\Delta\alpha,$$

откуда

$$\Delta\alpha = \theta = \frac{M_n}{M_{\text{уд}}},$$

где θ – абсолютная статическая ошибка сельсинного датчика, которая для одного и того же M_n тем меньше, чем больше $M_{\text{уд}}$.

Точность отработки угла сельсинов-приемников характеризуется статической ошибкой. Величину статической ошибки сельсинной пары в индикаторном режиме принято характеризовать средней максимальной ошибкой $\Delta\theta_m$, которая определяется как полусумма абсолютных значений максимальных ошибок для двух противоположных направлений вращения в пределах одного оборота:

$$\theta_m = \frac{|\theta_m^+| + |\theta_m^-|}{2}.$$

Погрешность в статическом режиме определяется путем поворота ротора датчика сначала по часовой стрелке на 360° , а затем против часовой тоже на 360° .

Точность работы сельсинов-приемников в индикаторном режиме определяют следующие основные факторы:

– момент сопротивления, который складывается из момента трения M_T и нагрузки на валу СП. Момент трения можно охарактеризовать с помощью такого показателя, как добротность сельсина:

$$D = M_{уд} / M_T;$$

- магнитная несимметрия – неравенство магнитных сопротивлений на пути его потока возбуждения при разных положениях ротора;
- электрическая несимметрия – неравенство сопротивлений фаз обмоток синхронизации сельсинов и проводов линии связи, неравенство переходных сопротивлений в контактах щеток;
- небаланс ротора, а также шкалы или стрелки.

Время успокоения влияет на динамическую устойчивость и точность работы сельсина. Обычно время успокоения равняется 0,5–1,5 с. Для его уменьшения применяют демпфирующие устройства.

Для дистанционного поворота на заданный угол различных удаленных или недоступных объектов, а также в случаях, когда нагрузка на валу сельсина-приемника приводит к недопустимой погрешности, используют трансформаторную схему включения сельсинов (рис. 2.3).

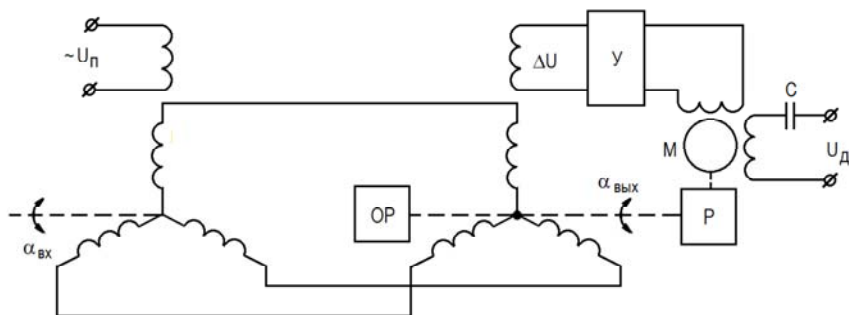


Рис. 2.3. Схема системы на сельсинах в трансформаторном режиме

С однофазной обмотки сельсина-приемника СП снимается напряжение синхронизации ΔU , она не подсоединяется к сети и, следовательно, не является обмоткой возбуждения. В этом режиме сельсин-приемник выполняет функции трансформатора (с него снимается не момент, а напряжение) и поэтому часто называется сельсином-

трансформатором СТ. Сельсинная пара в трансформаторном режиме является датчиком угла рассогласования. В этом режиме токи в линиях связи всегда не равны нулю, и, следовательно, всегда магнитный поток обмотки синхронизации сельсина-трансформатора $\Phi_{СТ} \neq 0$. Надо отметить, что суммарный магнитный поток постоянен по величине, а угол расположения его вектора зависит от угла рассогласования сельсинов.

Поток $\Phi_{СТ}$ наводит во вторичной обмотке сельсина-трансформатора ЭДС, которая определяется зависимостью

$$\Delta U = U_m \cos \Delta \alpha,$$

где U_m – амплитудное значение ЭДС.

Видно, что положение равновесия, соответствующее $\Delta U = 0$, наблюдается при угловом рассогласовании $\Delta \alpha = 90^\circ$. Это следует учитывать при сборке системы и установке начальных положений шкал и подвижных элементов.

При задании угла на входе система выходит из равновесия, значение ΔU становится не равным нулю, и двигатель М начинает поворачивать объект ОР и ротор СП до нового положения равновесия.

Качество работы сельсинов в трансформаторном режиме зависит от следующих факторов:

- величина остаточного напряжения на выходной обмотке в согласованном положении;
- удельное выходное напряжение $U_{уд}$ – напряжение при рассогласовании в 1° ;
- удельная выходная мощность $P_{уд}$ – максимальная мощность выходной обмотки при рассогласовании в 1° ;
- электрическая и магнитная несимметрия;
- сопротивление линии связи;
- количество приемников.

Так как точность датчика рассогласования в большой степени определяет точность всей системы, при выборе сельсинов ориентируются на их класс точности, который выбирается из ряда: 0,1; 0,2; 0,3; 0,5; 1; 2; 3; 5; 10; 20; 30. Цифра обозначает погрешность следования в трансформаторном режиме в угловых минутах. Для сельсинов, работающих в индикаторном режиме, предусмотрены классы точности 30; 45; 60; 90.

В лабораторную установку (рис. 2.4) входят стенд НТЦ-12 и осциллограф.

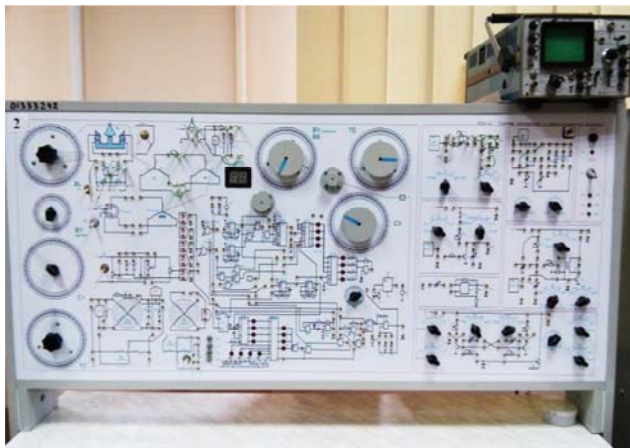


Рис. 2.4. Лабораторная установка

Порядок выполнения работы

Исследование сельсинов в индикаторном режиме

Определение максимальной статической погрешности $\Delta\theta_m$

1. Собрать схему согласно рис. 2.5.

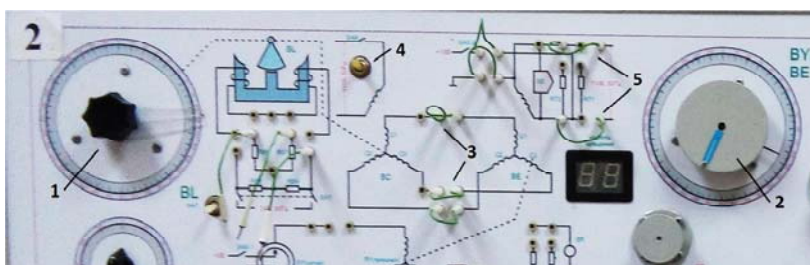


Рис. 2.5. Собранная схема для исследования сельсинов в индикаторном режиме:
1 – рукоятка сельсина-датчика; 2 – ротор сельсина-приемника; 3 – переключки для соединения обмоток синхронизации сельсинов (должны быть установлены); 4 – выключатель питания обмотки возбуждения сельсина-датчика (должен быть во включенном положении); 5 – переключки для подключения питания к обмотке возбуждения сельсина-приемника (должны быть установлены)

2. Включить стенд.
3. Совместить указатели шкал СД и СП с нулевой отметкой.
4. Поворачивая ротор сельсина-датчика, снимать показания по шкале сельсина-приемника. Измерения производить по часовой стрелке (при положительном) и против часовой стрелки (при отрицательном) вращении ротора сельсина-датчика в пределах оборота через каждые 10° . Результаты измерения занести в табл. 2.1.

Таблица 2.1

По часовой стрелке			Против часовой стрелки		
α_1	α_2	$\Delta\theta^+ = \alpha_1 - \alpha_2$	α_1	α_2	$\Delta\theta^- = \alpha_1 - \alpha_2$
град	град	град	град	град	град

Здесь α_1 – угол поворота ротора сельсина-датчика; α_2 – угол поворота ротора сельсина-приемника; $\Delta\theta^+$, $\Delta\theta^-$ – погрешности для двух направлений вращения.

5. Определить статическую ошибку $\Delta\theta_m$.

Определение зависимости синхронизирующего момента от угла рассогласования $M_c = M_c(\theta)$

1. Установить на ротор СП крючок для подвеса гири.
2. Поворачивая ротор СД, установить шкалу СП так, чтобы рычаг с крючком находился в горизонтальном положении. Установить стрелку отсчетного устройства СП на ноль.
3. Навешивать на крючок гири, постепенно увеличивая нагрузку добавлением гири, и поворотом ротора сельсина-датчика добиваться такого положения, чтобы шкала ротора сельсина-приемника возвратилась в исходное нулевое положение. Для каждого веса гири снимать показания шкалы сельсина-датчика. Результаты измерения занести в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Опытные данные	Расчетные данные	
θ , град	P , Н	M_c , Н·м

Здесь P – суммарный вес гирь, H ; $z = 35$ мм – радиус подвеса гирь; M_c – синхронизирующий момент.

Из статической характеристики $M_c(\theta)$ определить удельный синхронизирующий момент (2) и опрокидывающий момент M_m – максимальный синхронизирующий момент, при котором исчезает устойчивое состояние сельсина-приемника.

Исследование сельсинов в трансформаторном режиме

Определение зависимости ЭДС, наводимой в однофазной обмотке сельсина-приемника, от угла рассогласования $E_{ст} = E_{ст}(\theta)$

1. Собрать трансформаторную схему синхронной связи согласно рис. 2.6. Для этого в схеме на рис. 2.5 убрать перемычки для подключения питания к обмотке возбуждения сельсина-приемника и подключить к обмотке возбуждения осциллограф (рис. 2.7). Ротор СП затормозить.



Рис. 2.6. Схема для исследования трансформаторного режима

Контрольные вопросы

1. Почему при $\theta = \alpha_1 - \alpha_2 = 180^\circ$ сельсины в индикаторном режиме неустойчивы, хотя $M_c(180^\circ) = 0$?
2. Почему обмотка синхронизации сельсинов делается трехфазной и равномерно распределенной по окружности статора (ротора)?
3. Почему удельный синхронизирующий момент определяется в точке $\theta = 0$?
4. При каком режиме работы сельсинов токи во всех трех фазах обмоток синхронизации могут быть равны нулю и при каком они всегда не равны нулю?
5. Почему сельсинную пару в трансформаторном режиме называют сельсинным датчиком угла рассогласования?

Лабораторная работа № 3

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

Цель работы: изучить устройство системы автоматического регулирования (САР) температуры в электрической печи; построить график переходного процесса (временную характеристику) САР температуры в печи; по переходной характеристике определить основные качественные показатели переходного процесса.

Инструменты и принадлежности к работе

1. Шкаф сушильный ВШ-0,035М (1 шт.).
2. Терморегулятор УТК-4 (1 шт.).
3. Термометр электроконтактный (1 шт.).
4. Термопара (1 шт.).
5. Вольтметр (1 шт.).

Основные положения

Первым и важнейшим условием нормальной работы системы автоматического регулирования (САР) является требование ее устойчивости.

Устойчивостью САР называется способность системы возвращаться в исходное состояние, из которого она была выведена под действием внешних возмущений после прекращения действия этих возмущений. Устойчивость – это необходимое, но не достаточное условие для практического использования САР. Затухание переходного процесса может происходить быстро и медленно, с большими и малыми отклонениями регулируемой величины от заданного значения, с большим или малым числом колебаний и определяется по графику переходного процесса. Качество регулирования характеризуется следующими основными показателями: временем разгона, временем переходного процесса или временем регулирования, величиной перерегулирования, статической ошибкой.

Процессы в нелинейных системах автоматического регулирования имеют целый ряд весьма существенных особенностей, которые не встречаются в линейных системах.

Благодаря этим существенным особенностям вопрос об устойчивости системы становится здесь более сложным. Кроме структуры системы и значений ее параметров для устойчивости того или иного установившегося процесса имеют значение, в отличие от линейных систем, также и начальные условия. Возможен новый вид установившегося процесса – автоколебания, т. е. устойчивые собственные колебания с постоянной амплитудой при отсутствии внешних колебательных воздействий. Когда в системе возникают автоколебания, то установившееся состояние, соответствующее постоянному значению регулируемой величины, часто становится невозможным.

Следовательно, в общем случае на плоскости параметров системы могут быть не два вида областей (устойчивости и неустойчивости), как в линейных системах, а больше: 1) область устойчивости равновесного состояния с постоянным значением регулируемой величины; 2) область устойчивых автоколебаний; 3) область неустойчивости системы; 4) области, соответствующие другим, более сложным случаям.

Если процессы в системе имеют вид, указанный на рис 3.1, *а*, то равновесное состояние ($x = 0$) неустойчиво. В том случае, когда оба указанных на рис. 3.1, *а*, колебания в переходных процессах стремятся к одной и той же амплитуде и к одной и той же частоте, система будет обладать устойчивыми автоколебаниями с амплитудой a .

На рис. 3.1, *б* и *в*, показаны случаи, когда равновесное состояние ($x = 0$) системы устойчиво «в малом», т. е. при начальных условиях, не выводящих отклонения в переходном процессе за определенную величину a , и неустойчиво «в большом», т. е. при начальных условиях, выводящих отклонение в переходном процессе за пределы величины a . Здесь граничным процессом является неустойчивый периодический процесс собственного движения системы с амплитудой a (переходные процессы расходятся от него в обе стороны).

На рис. 3.1, *г*, показан случай трех возможных установившихся состояний: 1) равновесное состояние ($x = 0$); 2) колебания с постоянной амплитудой a_1 ; 3) колебания с постоянной амплитудой a_2 . При этом колебания с амплитудой a_1 неустойчивы. В результате система будет устойчива «в малом» по отношению к равновесному состоянию $x = 0$, а «в большом» система будет обладать устойчивыми автоколебаниями с амплитудой a_2 .

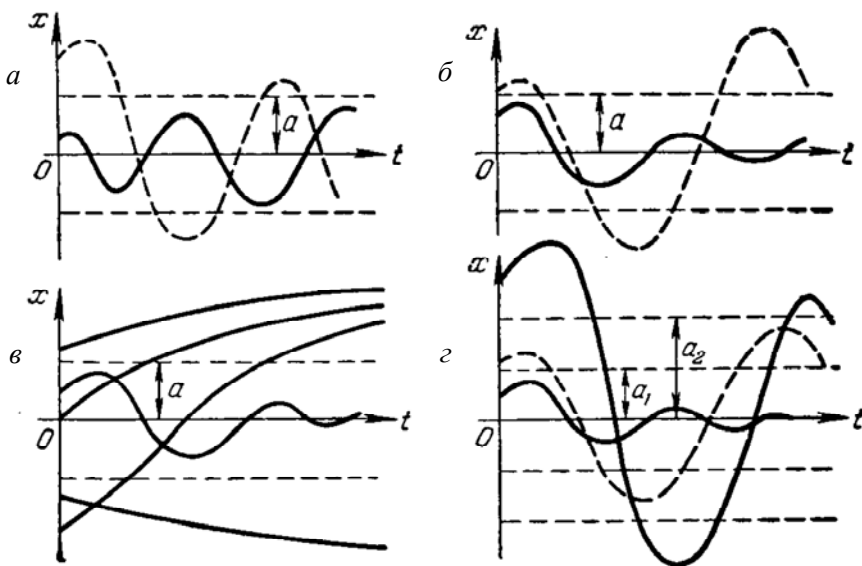


Рис. 3.1. Переходные процессы в нелинейной системе

Требования к качеству процесса регулирования определяются характером протекания технологического процесса, особенностями объекта регулирования, а также технико-экономическими соображениями. Чем выше качество регулирования, тем сложнее и дороже регулятор, и наоборот, чем ниже требования к качеству, тем проще и дешевле будет регулятор.

Построить переходную характеристику САР – это значит вычислить закон изменения во времени регулируемой величины. Ее можно построить экспериментальным методом или аналитически – решением дифференциальных уравнений САР.

В данной работе переходная характеристика строится экспериментальным методом. Имея переходную характеристику, можно определить качественные показатели САР (рис. 3.2), где T_p – время разгона, в течение которого регулируемая величина с момента включения системы достигает заданного значения; $T_{пп}$ – время переходного процесса или время регулирования, отсчитываемое от момента приложения воздействия до момента практического затухания колебаний (обычно переходный процесс считают закончившимся, когда фактическое значение регулируемой величины отличается от задан-

ного не более чем на 1–5 %); σ – перерегулирование или максимальное отклонение регулируемой величины от заданного значения (обычно это бывает при первом колебании вследствие инерционности системы); $\Delta_{\text{ст}}$ – отклонение регулируемой величины от заданного значения после переходного процесса (статическая ошибка); T_0 – постоянная времени или время, в течение которого регулируемая величина достигла бы заданного значения при неизменной скорости протекания переходного процесса, равной скорости в начальный момент времени.

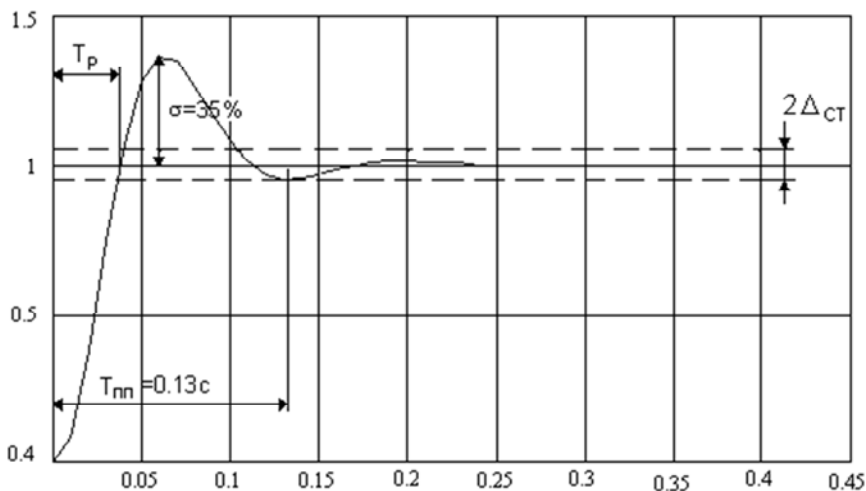


Рис. 3.2. Качественные показатели САП

Если известна кривая разгона объекта, можно графически определить постоянную времени объекта, проведя касательную к кривой разгона до пересечения с линией заданного значения регулируемой величины. Проекция этой касательной на горизонтальную ось и будет постоянной времени.

Основными показателями качества переходного процесса считают статическую ошибку $\Delta_{\text{ст}}$ и время переходного процесса $T_{\text{пп}}$.

В настоящей работе рассматривается нелинейная САП с двухпозиционным регулятором. Ее переходная характеристика имеет вид, показанный на рис. 3.3. Время переходного процесса в этом случае

определяется до момента перехода в состояние автоколебаний (A – амплитуда автоколебаний).

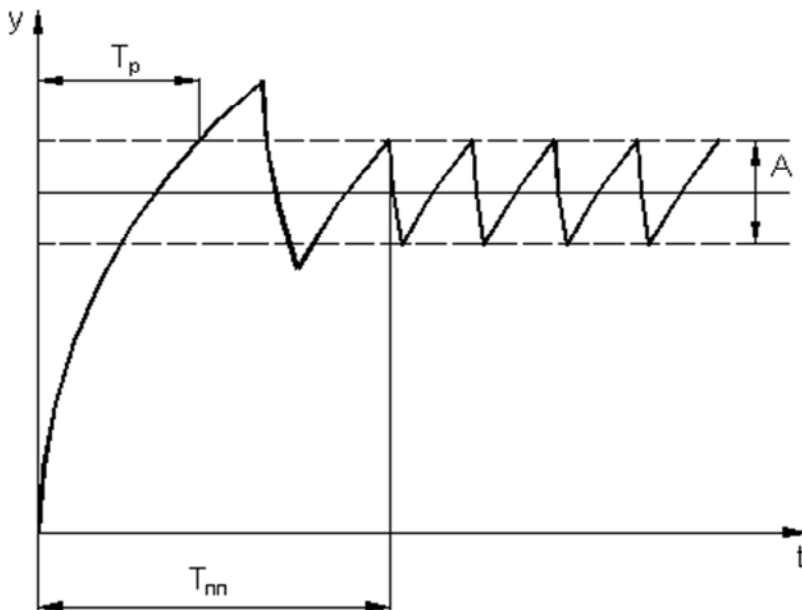


Рис. 3.3. Переходный процесс в нелинейной системе

Установка для снятия переходной характеристики САР представляет собой электрическую цепь с терморегулятором типа ТРК (см. рис. 3.4). Система предназначена для автоматического регулирования заданной температуры в печи.

Технические характеристики УТК-4 (терморегулятор):

- | | |
|---|---------------|
| а) ток, коммутируемый при активной нагрузке,
не более | 4А; |
| б) напряжение питания УТК-4 | 220 В ± 10 %; |
| в) ток, проходящий через замкнутые контакты
термометра, не более | 0,0002 А; |
| г) напряжение на разомкнутых контактах термо-
метра, не более | 0,05 В; |
| д) мощность электронагревателя, не более | 800 Вт. |

Терморегулятор типа ТРК представляет собой усилительный блок типа УТК-4 в комплекте с ртутным контактным датчиком: термоконтактором или термометром электроконтактным.

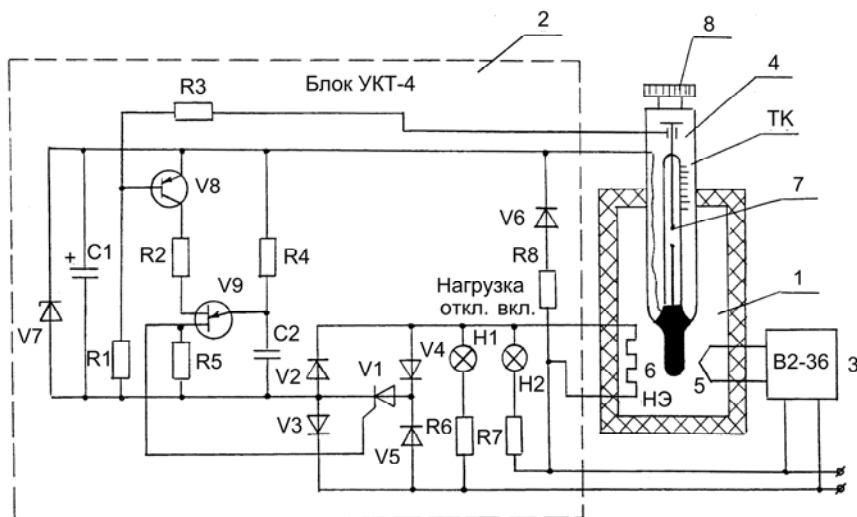


Рис. 3.4. САР температуры:

- 1 – термокамера; 2 – блок УТК-4; 3 – вольтметр; 4 – контактный термометр;
- 5 – термопара; 6 – нагревательный элемент; 7 – регулируемый контакт;
- 8 – винт для перемещения регулируемого контакта

Принцип работы терморегулятора заключается в том, что сигнал с контактного датчика температуры используется для поддержания необходимого температурного режима. По принципу действия усилительное устройство УТК-4 представляет собой тиристорный выключатель, управляемый генератором на однопереходном транзисторе (ОПТ) и транзисторным ключом. УТК-4 работает следующим образом. После подачи питающего напряжения на устройство при разомкнутых контактах термоконтактора ТК транзистор V8 открыт отрицательным потенциалом, подаваемым на его базу через резистор R1. Генератор на ОПТ, состоящий из однопереходного транзистора V9, резисторов R2, R4, R5 и конденсатора C2, включается в работу и генерирует ряд импульсов с частотой около 7,5 кГц. Эти импульсы открывают тиристор V1, осуществляя тем самым подклю-

чение нагрузки НЭ к цепи переменного тока. Контакты ТК при этом находятся под напряжением, не превышая величины падения напряжения на переходе открытого транзистора V8 (не более 0,5 В).

При замыкании контактов ТК транзистор V8 закрывается, базовая цепь однопереходного транзистора обесточивается, генератор на ОПТ прекращает свою работу, и тиристор отключает нагрузку от цепи переменного тока. Ток, проходящий через замкнутые контакты ТК, при этом определяется напряжением питания схемы управления и величиной суммы сопротивлений $R1 + R3$ (около 0,2 А).

Питание схемы управления осуществляется от сети переменного тока через гасящий резистор R8, выпрямитель V6, стабилитрон V7 и сглаживающий конденсатор C1.

Конструктивно устройство представляет собой малогабаритный компактный блок, состоящий из печатной платы, на которой монтируются элементы управления и силовой части устройства, обрамления с вентиляционными пазами. На переднюю стенку имеют выход элементы индикации нагрузки «ВКЛ» и «ОТКЛ». Для подключения устройства к внешним цепям блок снабжен установленной на задней стенке вилкой РП-10-11 «3» и розеткой РП 10-11 ЛУ.

Порядок выполнения работы

1. При помощи задающего устройства ртутного термометра установить температуру регулирования методом совмещения верхнего указателя термометра с соответствующей цифрой на шкале.

2. Включить макет в сеть 220 В.

3. Включить тумблер «ВКЛ» в верхнее положение (при этом должна гореть индикаторная лампа «НАГРУЗКА ВКЛ»).

4. Через равные промежутки времени (1 мин) производить запись показаний электронного вольтметра В2-36 до окончания переходного процесса.

5. По полученным данным построить в масштабе график переходного процесса (временную характеристику). Определить по характеристике: время разгона T_p , время переходного процесса $T_{пп}$, величину перерегулирования σ , статическую ошибку $\Delta_{ст}$.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Принципиальная схема и перечень используемых приборов.
3. Таблица результатов измерения и график экспериментальной характеристики.
4. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Качественные показатели переходного процесса и методика их определения.
2. Принцип работы САР температуры.
3. Переходные процессы и устойчивость в нелинейных САР.

Лабораторная работа № 4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕЛЕ

Цель работы: ознакомиться с устройством электромагнитных нейтральных реле, их работой и схемой включения. Определить параметры срабатывания и отпускания.

Инструменты и принадлежности к работе

1. Лабораторная установка (1 шт.).
2. Набор электромагнитных реле (1 шт.).

Основные положения

К релейным элементам автоматики (реле) относятся устройства, преобразующие плавное изменение входной величины в скачкообразное изменение выходной, причем скачок появляется при одном и том же значении входной величины. Реле широко применяют в системах автоматики в качестве элементов управления и защиты, дискретных датчиков и усилителей, логических элементов, в электрических установках, при автоматическом управлении и регулировании различных технологических процессов.

Простейший коммутационный аппарат такого типа приведен на рис. 4.1 в начальном положении. Будем постепенно увеличивать ток $I_{\text{вх}}$ в его обмотке 5 ($I_{\text{вх}}$ – входной сигнал X). При некотором его значении якорь 3 притянется к сердечнику 4. В процессе этого движения верхний конец якоря изогнет плоскую контактную пружину 1 вверх до соприкосновения ее контакт-детали 2 с контакт-деталью 2' контактной пружины 1' – произойдет замыкание контакта. По выходной цепи аппарата будет протекать ток, который после окончания переходного процесса станет равным $I_{\text{вых}}$ ($I_{\text{вых}}$ – выходная величина Y). Выходной ток не изменится при дальнейшем увеличении входного. Если теперь уменьшать входной ток, то при некотором его значении изогнутые пружины 1 и 1' преодолечат силу притяжения якоря к сердечнику и вернут якорь в исходное положение. При этом контакт разомкнется, а выходная цепь обесточится. Под входной величиной X и выходной Y такого аппарата можно иметь в виду

и другие величины, например, напряжение на обмотке и напряжение на сопротивлении нагрузки R_n .

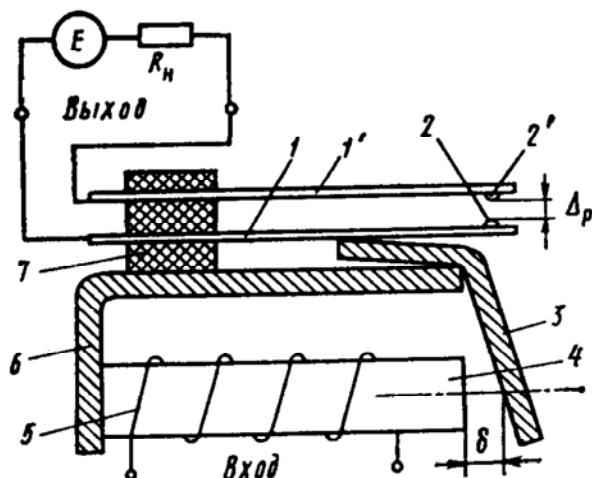


Рис. 4.1. Простейшее электромагнитное реле с замыкающим контактом из плоских консольно закрепленных контактных пружин:

1 и 1' — соответственно подвижная и неподвижная контактные пружины;
2 и 2' — контакт-детали; 3 — якорь; 4 — сердечник; 5 — обмотка; 6 — ярмо;
7 — изоляционная планка. Контактная пружина 1 и контактная деталь 2 вместе —
контактный элемент (то же 1' и 2'); 1, 2, 2', 1' и 7 — контакт (контактный узел);
 Δ_p — растрор контакта

Из электрических реле в современных дискретных схемах автоматики широко используют электромеханические реле, являющиеся контактными устройствами, магнитные, электронные (ламповые) и полупроводниковые реле, являющиеся бесконтактными устройствами. В контактных реле скачкообразное изменение выходной величины достигается замыканием или размыканием выходной цепи; в бесконтактных реле — путем резкого изменения параметров выходной цепи (R , C , L).

Зависимость выходной величины реле от входной называется статической характеристикой. Для статических характеристик большинства реле характерным является наличие гистерезисной релейной петли, объясняющейся неоднозначностью характеристик при увеличении и уменьшении входного сигнала.

Основные виды статических характеристик реле приведены на рис. 4.2; видно, что при достижении входной величины определенного значения происходит скачкообразное изменение выходной величины Y . Характеристики на рис. 4.2 (а, б) принадлежат двухпозиционным нейтральным реле, не реагирующим на знак входного сигнала. При изменении входного сигнала от 0 до X_2 (рис. 4.1, а) реле не изменяет своего состояния. При достижении входным сигналом значения X_2 (параметр срабатывания) выходной сигнал скачкообразно изменяется от $Y_{\min}$ до $Y_{\max}$. Дальнейшее увеличение входного сигнала не изменяет величину выходного сигнала, т. е. $Y = Y_{\max} = \text{const}$.

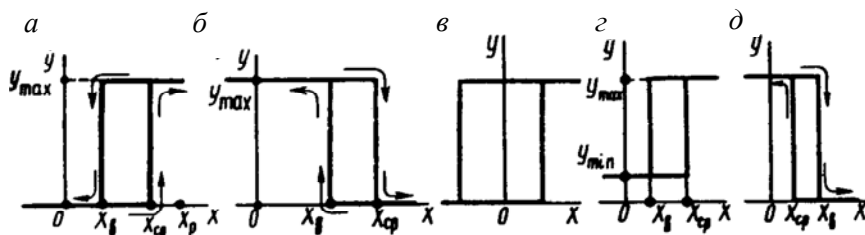


Рис. 4.2. Типичные характеристики управления аппаратов релейного действия:
а, б, в, д – электромеханических; г – статических электрических; а, б, г, д – одностабильных; в – двустабильных; а, б, г – максимальных; д – минимальных;
а, г, д – работающих на замыкание; б – работающих на размыкание

При уменьшении входного сигнала от значения $X_1 > X_2$ до значения $X = X_1$ величина выходного сигнала не изменяется, т. е. $Y = Y_{\max}$, а при достижении входным сигналом значения X_1 (параметр отпущения) выходная величина скачкообразно изменяется от $Y_{\max}$ до $Y_{\min}$. Отличием устройств, имеющих характеристику, изображенную на рис. 4.2, б, является инвертирование сигнала. При отсутствии входного сигнала ($X = 0$) величина выходного $Y = Y_{\max}$; при наличии входного сигнала ($X = X_2$) выходной сигнал отсутствует или имеет минимальное значение ($Y = Y_{\min}$).

К основным характеристикам реле относятся:

1. Мощность срабатывания $P_{\text{ср}}$ – это минимальная электрическая мощность, потребляемая катушкой, при которой реле надежно срабатывает, т. е. замыкает управляемую цепь.

2. Мощность управления или коммутируемая мощность $P_{\text{упр}}$ (Вт) – это произведение максимально отключаемого тока на напряжение

источника питания выходной цепи, при котором контакты реле еще надежно работают.

3. Время срабатывания $t_{ср}$ – это время от момента подачи на вход реле управляющего сигнала до появления (исчезновения) сигнала на выходе (замыкания и размыкания выходных контактов).

4. Время отпускания $t_{отп}$ – это время от момента снятия входного сигнала до размыкания (замыкания) выходных цепей, равное сумме времени трогания и времени движения якоря, т. е. $t_{отп} = t_{тр} + t_{дв}$.

Графически это показано на рис. 4.3.

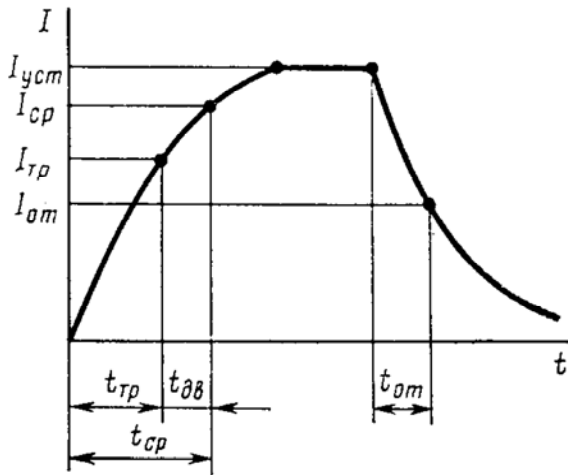


Рис. 4.3. Временная диаграмма работы реле

5. Коэффициент возврата реле K_v есть отношение параметра отпускания реле к параметру срабатывания ($K_v = X_{отп} X_{ср}^{-1}$). Коэффициент возврата характеризует относительную ширину релейной петли статической характеристики; для контактных электрических реле K_v представляет собой отношение тока отпускания $I_{отп}$ к току срабатывания $I_{ср}$:

$$K_v = I_{отп} I_{ср}^{-1} < 1.$$

6. Коэффициент запаса K_z – это отношение магнитодвижущей силы (МДС) катушки реле при установившемся режиме к МДС при

токе срабатывания, т. е. $K_3 = I_{уст}W / I_{ср}W$; для электрических контактных реле коэффициент запаса представляет собой отношение установившегося значения тока $I_{уст}$ к току срабатывания $I_{ср}$:

$$K_3 = I_{уст} I_{ср}^{-1}.$$

В зависимости от условий работы этот коэффициент может принимать различные значения от 1,5 до 2. Объясняется это тем, что после срабатывания реле ток в обмотке продолжает увеличиваться до тех пор, пока не достигнет установившегося значения.

7. Коэффициент управления (усиления) K_y – это отношение управляемой мощности к мощности срабатывания реле:

$$K_y = P_{упр} P_{ср}^{-1} > 1.$$

Обычно $K_y = 10^2 \dots 10^9$.

В зависимости от рода тока электромагнитные реле разделяют на реле постоянного и переменного тока. В свою очередь реле постоянного тока делят на нейтральные и поляризованные. Нейтральные реле не реагируют на знак входного сигнала, в то время как поляризованные реле, имеющие реверсивную статическую характеристику, реагируют на полярность сигнала, подаваемого на вход поляризованного реле.

Принцип действия электромагнитных нейтральных реле основан на взаимодействии магнитного потока, создаваемого электрическим током, протекающим по катушке реле с подвижным якорем. Электромагнитные реле выполняют с поворотным якорем.

Существуют две основные конструктивные схемы реле: с угловым движением якоря (рис. 4.4, а) и поступательно перемещающимся втягивающимся якорем (рис. 4.4, б). При прохождении тока через катушку 2 возникает магнитный поток, проходящий через сердечник 1, ярмо 7, якорь 4 и воздушный зазор. Под действием магнитного поля возникает сила, перемещающая якорь. Происходит замыкание контактов 5, закрепленных на контактнонесущих пружинах 6. При обесточивании катушки якорь занимает первоначальное положение либо под действием собственного веса (рис. 4.4, б), либо под действием пружины 3 (рис. 4.4, а).

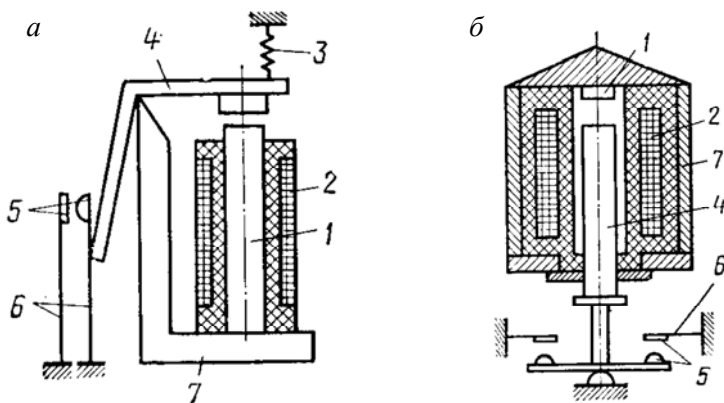


Рис. 4.4. Основные конструктивные схемы реле: с угловым движением якоря (а) и поступательно перемещающимся втягивающимся якорем (б)

Схемы коммутации реле разнообразны (рис. 4.5). Они могут содержать контакты, которые при подаче тока в обмотку катушки замыкаются (условное обозначение – «но», нормально открытые или NO, normal opened, на рисунке обозначены K1.1), размыкаются (условное обозначение – «нз», нормально закрытые или NC, normal closed, на рисунке обозначены K1.2) или переключаются (условное обозначение – «п» или NO/NC, на рисунке обозначены K1.3). Если на схеме указывается «1NO – 2NO/NC», то это означает, что реле имеет один замыкающий (нормально открытый) и два переключающих контакта.

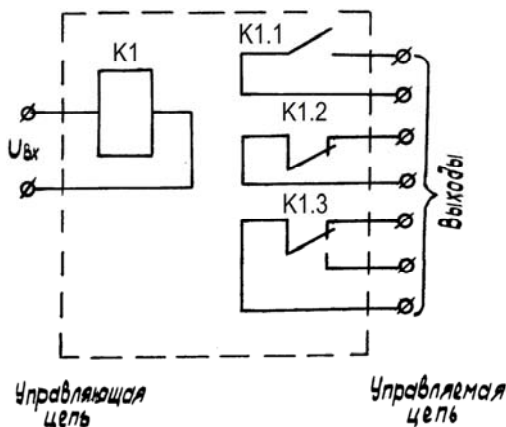


Рис. 4.5. Схемы коммутации реле

В конструкциях электромагнитных реле разных типов общим является наличие электромагнита, состоящего из стального магнитопровода (сердечника с якорем) и катушек, а также контактных групп и пружин.

Магнитоуправляемые контакты (МК), называемые также герконами (герметизированные контакты) (рис. 4.6), представляют собой герметичную оболочку 1, в которую заключены пластины 2 и 3, выполненные из материала с высокой магнитной проницаемостью (например, из сплава железа с никелем). На пластинах укреплены контакты 4 и 5. Оболочка находится внутри управляющей катушки 6. При подаче в катушку напряжения магнитный поток замыкается через пластины 2 и 3. В межконтактном промежутке возникает электромагнитная сила. При определенном значении этой силы пластины 2 и 3 изгибаются так, что происходит замыкание контактов 4 и 5. При снятии управляющего электрического сигнала контакты размыкаются. Стеклопленочная оболочка 1 вакуумирована или заполнена инертным газом – смесью азота с гелием или водородом. Вакуумирование позволяет применять для контактов износостойкие и эрозийно-устойчивые материалы – вольфрам, молибден и др., окисляющиеся в обычных условиях; применять малые контактные силы, так как окисные и газовые пленки на контактах отсутствуют; использовать малые межконтактные зазоры, так как электрическая прочность вакуума больше, чем у воздуха (при $\Delta = 1$ мм $U_{\text{вак}} = 80$ кВ, а $U_{\text{возд}} = 20$ кВ). Для уменьшения переходного сопротивления контактов на концах пластин-контактов наносится слой серебра, золота, родия или благородных металлов. Этот слой выполняет также роль немагнитной прокладки, не допускающей залипания контактов.

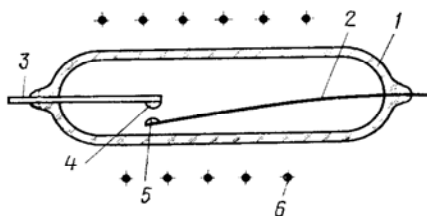


Рис. 4.6. Геркон

Герконы обладают большим сроком службы с числом срабатываний, достигающим 10^6 – 10^9 . Благодаря малому расстоянию между

контактами и малой инертности пластинок-контактов реле с МК обладают большим быстродействием ($\tau = 0,5\text{--}2,0$ мс). Реле выпускаются на различные токи и напряжения с замыкающими, размыкающими и переключающими контактами (рис. 4.7). Внутри катушки может находиться один или несколько герконов (рис. 4.8). Управление МК может осуществляться с помощью постоянных магнитов. Реле на магнитоуправляемых контактах предназначены для использования в схемах автоматики в качестве промежуточных реле, реле защиты, запоминающих элементов и др.

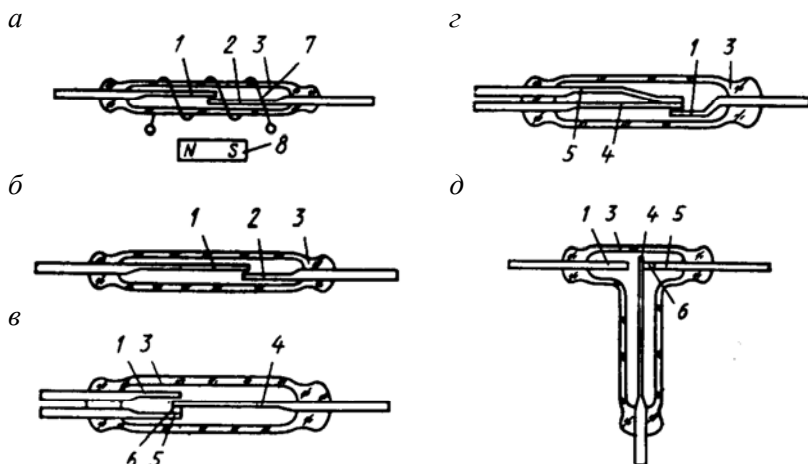


Рис. 4.7. Язычковые герметизированные магнитоуправляемые контакты: а – симметричный замыкающий МК; б – асимметричный замыкающий МК; в – переключающий МК вида РЗ-П; г – переключающий МК вида РП-3; д – переключающий Т-образный МК; 1, 2 – замыкаемые КС; 3 – герметизированный баллон; 4 – переключающий КС; 5 – размыкаемый КС; 6 – немагнитная контакт-деталь; 7 – обмотка; 8 – постоянный магнит

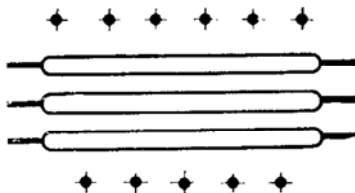


Рис. 4.8. Схема блокирования герконов, при которой несколько стеклянных капсул охватываются одной управляющей обмоткой

Схема установки для снятия статической характеристики электромагнитных реле приведена на рис. 4.9.

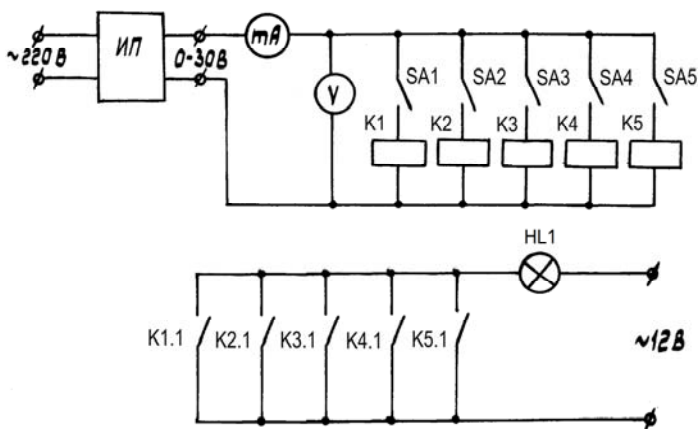


Рис. 4.9. Принципиальная электрическая схема установки испытания реле

Катушки реле подключаются к выходу регулируемого источника питания УИП с помощью выключателей SA₂, SA₃, SA₄, SA₅. Величину напряжения, подводимого к реле, можно изменять с помощью регулятора, установленного на блоке УИП. Токи и напряжения в процессе срабатывания и отпускания реле измеряются при помощи миллиамперметра mA и вольтметра V. Срабатывание реле фиксируется сигнальной лампочкой, которая загорается при замыкании контактов (1P₁...1P₄).

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться со схемой установки и устройством входящих в нее элементов.
2. Установить регулятор напряжения источника питания ИП на «О», после чего его включить.
3. Плавно поворачивать рукоятку ИП, наблюдая за показаниями миллиамперметра и вольтметра до момента срабатывания электромагнитного реле (включения сигнальной лампочки). Во избежание перегорания катушки ЗАПРЕЩАЕТСЯ увеличивать ток питания после срабатывания реле.

4. Плавно поворачивать ручку регулятора постоянного напряжения в обратную сторону, определить момент размыкания контактов реле.

5. Записать показания миллиамперметра и вольтметра, при которых реле замыкает и размыкает контакты, в таблицу 4.1. Пункты 3–5 повторить три раза и определить средние значения токов и напряжений срабатывания и отпускания.

Таблица 4.1

Реле	№ опыта	Срабатывание		Отпускание	
		$U_{\text{ср}}, \text{ В}$	$I_{\text{ср}}, \text{ мА}$	$U_{\text{отп}}, \text{ В}$	$I_{\text{отп}}, \text{ мА}$
1	1				
	2				
	3				
	ср.				
2	1				
	2				
	3				
	ср.				
3	1				
	2				
	3				
	ср.				
4	1				
	2				
	3				
	ср.				
5	1				
	2				
	3				
	ср.				
6	1				
	2				
	3				
	ср.				

6. Пункты 2–5 повторить для остальных реле.

7. Построить статическую характеристику электромагнитных реле.

8. Определить:

- а) коэффициент возврата реле K_v ;
- б) коэффициент управления K_y .

Содержание отчета

- 1. Схема установки.
- 2. Результаты измерений для каждого типа реле.
- 3. Значения коэффициента возврата и коэффициента управления для каждого типа реле.
- 4. Статические характеристики для каждого типа реле.

Контрольные вопросы

- 1. Устройство и принцип работы электромагнитного реле.
- 2. Устройство и принцип работы геркона.
- 3. Основные характеристики реле.

Лабораторная работа № 5

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Цель работы: экспериментальное снятие кривых разгона (кривая переходного процесса) элементов системы и определение по ним их основных динамических параметров.

Инструменты и принадлежности к работе

1. Нагревательный элемент (резистор ПЭВ-75) (1 шт.).
2. Источник питания (1 шт.).
3. Терморезистор (1 шт.).
4. Термопара (1 шт.).
5. Мультиметр (1 шт.).

Основные положения

Одной из основных задач проектирования систем автоматического регулирования (САР) является обеспечение требуемых динамических характеристик системы. Для этого используют модели САР в аналитическом виде или построенные в специализированных компьютерных программах. В обоих случаях систему разбивают на элементы, типовые динамические звенья, имеющие типовые модели, то есть типовые дифференциальные уравнения, записанные в виде передаточных функций.

Каждое динамическое звено можно представить в виде, показанном на рис. 5.1.



Рис. 5.1. Динамическое звено

Входная $x(t)$ и выходная $y(t)$ величины связаны дифференциальным уравнением типового вида, при этом рассматриваются не сами величины, а их отклонения $\Delta x(t)$ и $\Delta y(t)$. Например, уравнение 1-го порядка имеет вид:

$$\Delta y + T \Delta \dot{y} = k \Delta x.$$

В левой части записана выходная величина и ее производные, в правой – входная. В символической (операторной) форме с использованием оператора дифференцирования $p = \frac{d}{dt}$

$$(1 + Tp) \Delta y = k \Delta x.$$

В автоматике вместо дифференциальных уравнений удобно использовать передаточные функции, которые представляют собой отношение оператора при входной величине (оператора воздействия) к оператору при входной (собственного). Для рассмотренного уравнения передаточная функция

$$W(p) = \frac{k}{1 + Tp}.$$

Таким дифференциальным уравнением и передаточной функцией описывается динамика так называемых апериодических звеньев 1-го порядка, которые являются наиболее распространенными в САР. Коэффициенты дифференциального уравнения T и k называются соответственно постоянной времени (характеризует инерционность элемента и измеряется в секундах), и коэффициентом передачи (характеризует преобразование сигнала по уровню, единицы измерения зависят от размерностей величин на входе и выходе).

Коэффициенты T и k для реальных устройств могут быть получены различными способами: расчетом, из паспортных данных устройства или экспериментально. В последнем случае получают кривую разгона или переходную характеристику, которая представляет собой изменение выходной величины $y(t)$ при скачкообразном из-

менении входной величины $x(t)$. Эксперимент проводят в следующей последовательности:

1. Задают скачкообразное изменение входной величины посредством включения – выключения, резкого изменения условий и т. д.
2. Регистрируют изменение выходной величины с момента изменения на входе до практического установления постоянного значения на выходе (наступления установившегося режима).
3. Полученные данные представляют в виде графика зависимости выходной величины от времени (разгонной или переходной характеристики). Экспериментальную кривую рекомендуется сглаживать.
4. По графику определяют постоянную времени, по полученным данным рассчитывают коэффициент передачи.

Для апериодических звеньев 1-го порядка T соответствует времени, за которое выходная величина достигает 63 % установившегося значения (рис. 5.2).

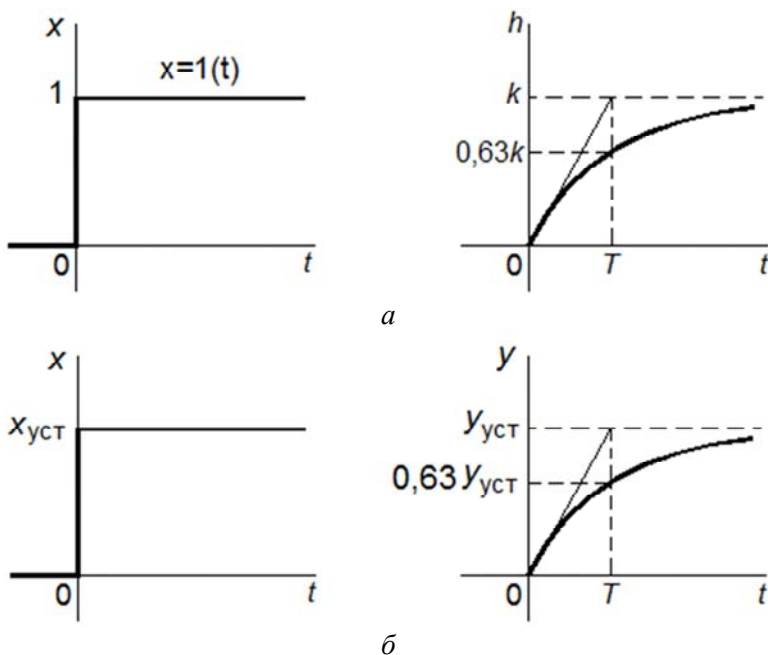


Рис. 5.2. Кривая переходной характеристики при единичном (а) и неединичном (б) входном сигнале

Постоянную времени также можно определить построением касательной в начальной точке переходной характеристики до момента пересечения с линией установившегося значения (рис. 5.2), то есть T является характеристикой скорости переходного процесса в начальный момент времени.

Кривая переходной характеристики описывается следующим уравнением:

$$h(t) = k \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right).$$

Как видно из рис. 5.2, в результате скачкообразного изменения входного воздействия x выходная величина y через некоторый промежуток времени приходит к новому равновесному состоянию $y_{уст}$.

Коэффициент передачи можно рассчитать как отношение изменения выходной величины до входа в установившийся режим к соответствующему изменению входной величины:

$$k = \frac{\Delta y_{уст}}{\Delta x_{уст}}.$$

В работе производится исследование динамических свойств объекта регулирования (камеры) и чувствительных элементов (терморезистора и термопары), которые также относятся к апериодическим звеньям 1-го порядка.

Для вывода дифференциального уравнения термокамеры запишем уравнение теплового баланса:

$$Cd\theta + A\theta dt = Qdt, \quad (1)$$

где C – теплоемкость термокамеры (энергия, которую нужно сообщить камере для увеличения ее температуры на 1°C), Дж/град;

θ – превышение температуры воздуха в камере над температурой окружающей среды, $^\circ\text{C}$;

A – теплопередача нагревательного элемента (энергия, которая отдается нагревательным элементом в камеру в одну секунду на 1°C

разности температуры нагревательного элемента и окружающей среды), Дж/с. град;

Q – мощность нагрева, Дж/с.

Поделив обе части уравнения (1) на $A dt$, получим:

$$T_1 [d\theta/dt] + \theta = k_1 Q, \quad (2)$$

где $T_1 = C/A$ – постоянная времени термокамеры, с;

$k_1 = 1/A$ – коэффициент передачи термокамеры, с · град/Дж.

Мощность нагрева является входной величиной для системы, превышение температуры над окружающей средой θ является выходной величиной, тогда дифференциальное уравнение термокамеры (1) примет вид:

$$T_1 \frac{dy}{dt} + y = k_1 x \quad (3)$$

или в операторной форме:

$$(T_1 p + 1)y = k_1 x.$$

Из данного уравнения видно, что термокамера является апериодическим звеном первого порядка. Решение этого уравнения имеет вид:

$$y = C e^{-t/T_1} + k_1.$$

Можно определить постоянную интегрирования C : при $t = 0$, $y = 0$, $0 = C + k_1$, тогда $C = -k_1$ и аналитическое выражение кривой разгона имеет вид:

$$y = k_1 (1 - e^{-t/T_1}).$$

Из уравнения (3), записанного в операторной форме, получим передаточную функцию апериодического звена (термокамеры):

$$W_1(p) = \frac{k_1}{1 + T_1 p}.$$

Коэффициент передачи термокамеры определяется следующим образом:

$$k_1 = \frac{\Delta\theta_{\text{уст}}}{\Delta Q_{\text{уст}}}, \text{ град/Дж.}$$

В теории автоматического регулирования терморезистор по своим динамическим свойствам является апериодическим звеном, которое описывается дифференциальным уравнением 1-го порядка:

$$T_2 \frac{dy}{dt} + y = k_2 x,$$

где T_2 – постоянная времени;

y – выходная величина (сопротивление, Ом);

x – входная величина (измеряемая температура);

k_2 – коэффициент передачи звена.

Передаточная функция звена:

$$W_2(p) = \frac{k_2}{1 + T_2 p}.$$

Коэффициент передачи терморезистора определяется следующим образом:

$$k_2 = \frac{\Delta R_{\text{уст}}}{\Delta\theta_{\text{уст}}}, \text{ Ом/град.}$$

Определим передаточную функцию термопары. Принцип действия термопары заключается в следующем. Если составить цепь из двух различных проводников (или полупроводников) А и В, соединив их между собой концами (рис. 5.3, а), причем температуру t_1 одного места соединения сделать отличной от температуры t_0 другого, то в цепи появится ЭДС, называемая термоэлектродвижущей силой (термоЭДС) и являющаяся разностью функций температур мест соединения проводников:

$$E_{AB}(t_1, t_0) = f(t_1) - f(t_0).$$

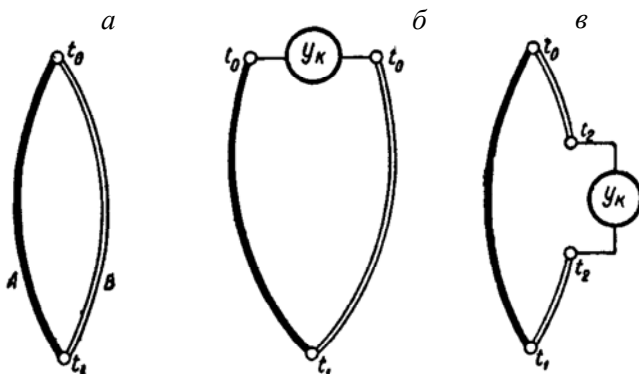


Рис. 5.3. Термоэлектрическая цепь

Подобная цепь называется термоэлектрическим преобразователем, или иначе термопарой; проводники, составляющие термопару, – термоэлектродами, а места их соединения – спаями.

Термопара может быть применена для измерения температуры. Если один спай термопары, называемый рабочим спаем, поместить в среду с температурой t_1 , подлежащей измерению, а температуру другого, нерабочего спая поддерживать постоянной, то $f(t_0) = \text{const}$ и

$$E_{AB}(t_1, t_0) = f(t_1) - C = f_1(t_0)$$

независимо от того, каким образом произведено соединение термоэлектродов (спайкой, сваркой и т. д.). Последняя взаимосвязь и положена в основу измерения температур при помощи термопар. Таким образом, естественной входной величиной термопары является температура t_1 ее рабочего спая, а выходной величиной – термоЭДС, которую термопара развивает при строго постоянной температуре t_0 нерабочего спая.

Включить указатель в цепь термопары можно как по наиболее часто применяемой схеме рис. 5.3, б (здесь два нерабочих спая), так и по схеме рис. 5.3, в. Для того чтобы включение в цепь термопары указателя (т. е. третьего проводника) не изменило значения термоЭДС, места соединения указателя с термоэлектродами должны иметь одинаковую температуру.

В теории автоматического регулирования термopара по своим динамическим свойствам является апериодическим звеном, которое описывается дифференциальным уравнением 1-го порядка:

$$T_3 \frac{dy}{dt} + y = k_3 x,$$

где T_3 – постоянная времени;

y – выходная величина (термоЭДС, В);

x – входная величина (измеряемая температура);

k_3 – коэффициент передачи звена.

Передаточная функция звена:

$$W_3(p) = \frac{k_3}{1 + T_3 p}.$$

Коэффициент передачи термopары определяется следующим образом:

$$k_3 = \frac{\Delta E_{\text{уст}}}{\Delta \theta_{\text{уст}}}, \text{ В/град.}$$

Постоянная времени термopары зависит от ее размеров (чем больше величина рабочего спая, тем больше постоянная времени). В данной лабораторной работе для изменения размеров рабочего спая используются различные насадки.

Принципиальная схема лабораторной установки представлена на рис. 5.4. Установка состоит из камеры 1 с нагревательным элементом 2, который питается от источника 3. Для измерения температуры в камере предназначены два чувствительных элемента – терморезистор 4 и термopара 5, которые могут устанавливаться в камере поочередно и подключены к показывающим приборам 6 (мультиметр) и 7. Функциональная схема установки представлена на рис. 5.5. Она включает в себя объект регулирования (ОР) – камера, исполнительное устройство (ИУ) – нагревательный элемент, чувствительный элемент (ЧЭ) – терморезистор или термopара.

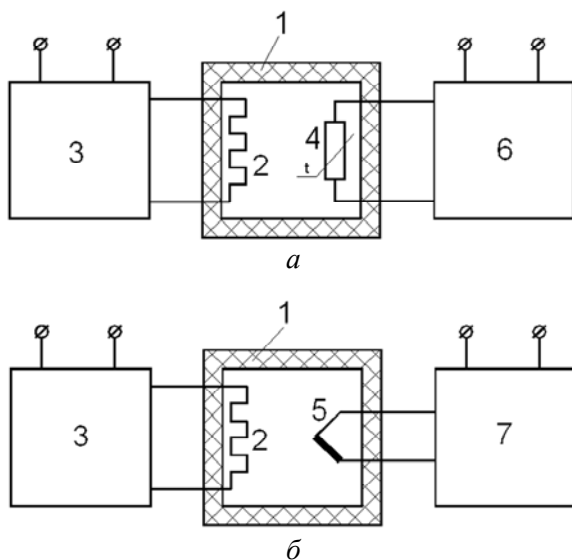


Рис. 5.4. Принципиальная схема лабораторной установки:
 а – с терморезистором; б – с термопарой

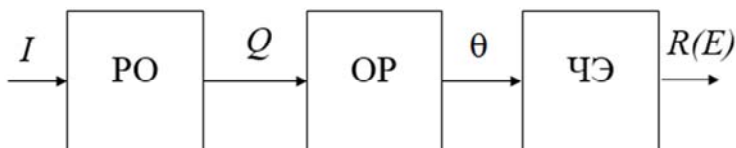


Рис. 5.5. Функциональная схема лабораторной установки

В случае, когда на вход динамического звена подается гармонический сигнал, рассматривают частотную передаточную функцию. Она получается из обычной передаточной функции подстановкой $p = j\omega$. Частотная передаточная функция может быть представлена в следующем виде:

$$W(j\omega) = A(\omega)e^{j\varphi} = U(\omega) + jV(\omega),$$

где $A(\omega)$ – модуль частотной передаточной функции;

$\varphi(\omega)$ – аргумент или фаза;

$U(\omega)$ и $V(\omega)$ – вещественная и мнимая составляющие частотной передаточной функции.

Для наглядного представления частотных свойств звена используются частотные характеристики, в частности, амплитудно-фазовая частотная характеристика. Она строится на комплексной плоскости и представляет собой геометрическое место концов векторов (годограф), соответствующих частотной передаточной функции при изменении частоты от нуля до бесконечности (рис. 5.6). По оси абсцисс откладывается вещественная часть $U(\omega) = \operatorname{Re} W(j\omega)$ и по оси ординат – мнимая часть $V(\omega) = \operatorname{Im} W(j\omega)$. Для каждой частоты на комплексной плоскости наносится точка. Полученные точки соединяются затем плавной кривой. Около нанесенных точек можно написать соответствующие им частоты: $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ и т. д.

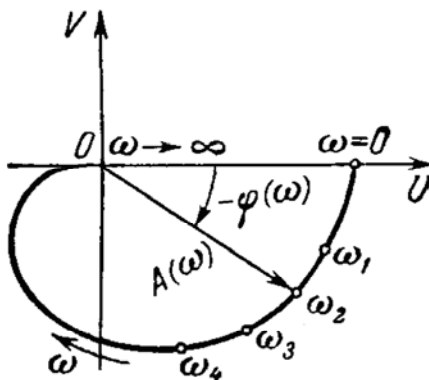


Рис. 5.6. Примерный вид АФЧХ некоторого звена

Порядок выполнения работы

1. Установить в камеру терморезистор.
2. Включить камеру и нагревать ее в течение 15 мин, снимая показания мультиметра каждую минуту.
3. Вынуть терморезистор из камеры и продолжить запись показаний охлаждения терморезистора до комнатной температуры (снимать показания каждые 15 сек).
4. Установить в камеру термопару и повторить пункты 2 и 3, снимая показания мультиметра.
5. Установить на рабочий спай термопары насадку. Повторить п. 4. Выполнить те же действия с другими насадками.

6. Построить графики кривых разгона камеры, терморезистора и термопары с различными насадками.

7. Графическим методом определить постоянные времени камеры, терморезистора и термопары и рассчитать их коэффициенты передачи (некоторые данные для расчета приведены в разделе «Справочные данные»). При нагреве камеры в работе участвует система, состоящая из камеры и чувствительного элемента, то есть аperiodическое звено второго порядка. Однако, так как постоянные времени чувствительных элементов намного меньше постоянной времени камеры, то ими можно пренебречь и считать, что исследуется только звено первого порядка (термокамера).

8. Подставить значения T_1 , T_2 , T_3 , k_1 , k_2 , k_3 в передаточные функции звеньев:

$$W(p) = k / (Tp + 1).$$

9. Для построения АФЧХ необходимо получить частотную передаточную функцию. Ее можно получить из передаточной функции путем замены p на $j\omega$.

$$W(j\omega) = k / [Tj\omega + 1].$$

Чтобы выделить вещественную и мнимую части функции $W(j\omega)$, числитель и знаменатель нужно умножить на сопряженное комплексное число $(-Tj\omega + 1)$:

$$W(p) = \frac{k(-Tj\omega + 1)}{T^2\omega^2 + 1} = \frac{k}{T^2\omega^2 + 1} + \frac{-kT\omega}{T^2\omega^2 + 1}j.$$

Подставляя ω от нуля до ∞ , находим значения действительной и мнимой части функции. Полученные данные необходимо свести в таблицу.

ω , Гц	0	0,001	0,01	0,1	1	∞
Re (ω)						
Im (ω)						

$$\text{Re}(\omega) = k / [T^2\omega^2 + 1]; \quad \text{Im}(\omega) = [-kT\omega] / [T^2\omega^2 + 1].$$

10. Построить АФЧХ для камеры, терморезистора и термопары.

Содержание отчета

1. Схема экспериментальной установки.
2. Таблицы параметров и расчеты.
3. Графики АФЧХ.

Контрольные вопросы

1. Временные характеристики динамических звеньев.
2. Частотные характеристики динамических звеньев.
3. Передаточная функция динамического звена.
4. Аperiodические звенья и их характеристики.
5. Экспериментальное определение характеристик динамических звеньев.

Справочные данные

$$\theta_1 = x_{\text{вх,уст}} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}; \quad \theta_2 = 52,5 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$k_1 = (\theta_2 - \theta_1) / Q,$$

где Q – количество тепла, [Дж], $Q = 3,603 \cdot P t \eta$;

θ_2 – конечная температура, [$^{\circ}\text{C}$];

θ_1 – начальная температура, [$^{\circ}\text{C}$];

η – коэффициент полезного действия, равный 0,5;

t – время нагрева камеры, [мин];

P – мощность нагревателя ($P = UI$), [Вт] (U , I – соответственно ток и напряжение в цепи нагревателя; $I = U / R$, [А]; R – сопротивление нагревателя камеры, [Ом]; U – напряжение питания, [В]).

Лабораторная работа № 6

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИФФЕРЕНЦИРУЮЩИХ И ИНТЕГРИРУЮЩИХ ДИНАМИЧЕСКИХ ЗВЕНЬЕВ

Цель работы: ознакомиться с практическими схемами дифференцирующих и интегрирующих динамических звеньев; исследовать временные характеристики динамических звеньев.

Инструменты и принадлежности к работе

1. Стенд НТЦ-12 (1 шт.).
2. Осциллограф (1 шт.).

Общие положения

Для расчета различных систем автоматического регулирования они обычно разбиваются на динамические звенья. Под динамическим звеном понимают устройство любого физического вида и конструктивного оформления, описываемое определенным дифференциальным уравнением.

В соответствии с этим классификация звеньев производится именно по виду дифференциального уравнения. Одним и тем же уравнением могут описываться весьма разнообразные устройства (механические, гидравлические, электрические и т. д.). Для теории автоматического регулирования это будет один и тот же тип звена. Конкретные же элементы автоматических систем, их теория, конструкция и расчеты излагаются в соответствующих учебниках и руководствах.

Обозначим входную величину звена через x_1 , а выходную – через x_2 (рис. 6.1). Возмущение, действующее на звено, обозначим $f(t)$.

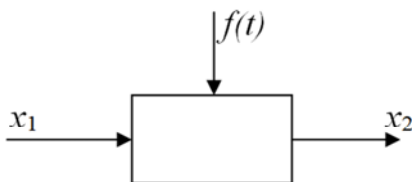


Рис. 6.1. Динамическое звено

Статическая характеристика любого звена может быть изображена прямой линией (рис. 6.2), так как пока будут рассматриваться линейные или, точнее, линеаризованные системы.

В звеньях позиционного, или статического, типа линейной зависимостью $x_2 = kx_1$ связаны выходная и входная величины в установившемся режиме (рис. 6.2, а). Коэффициент пропорциональности k между выходной и входной величинами представляет собой коэффициент передачи звена.

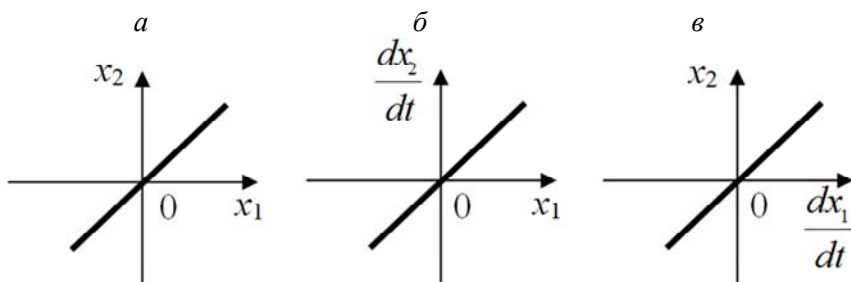


Рис. 6.2. Статические характеристики звеньев позиционного (а), интегрирующего (б) и дифференцирующего (в) типа

В звеньях интегрирующего типа линейной зависимостью $\frac{dx_2}{dt} = kx_1$ связаны производная выходной величины и входная величина в установившемся режиме (рис. 6.2, б). В этом случае для установившегося режима будет справедливым равенство $x_2 = k \int x_1 dt$, откуда и произошло название этого типа звеньев. Коэффициент пропорциональности k в этом случае также является коэффициентом передачи звена. Если входная и выходная величины звена имеют одинаковую размерность, то коэффициенту передачи соответствует размерность $[\text{сек}^{-1}]$.

В звеньях дифференцирующего типа линейной зависимостью $x_2 = k \frac{dx_1}{dt}$ связаны в установившемся режиме выходная величина и производная входной (рис. 6.2, в), откуда и произошло название этого типа звеньев. Коэффициент пропорциональности k является коэффициентом передачи звена. Если входная и выходная величины

имеют одинаковую размерность, то коэффициенту передачи соответствует размерность [сек].

Интегрирующие звенья

Идеальное интегрирующее звено описывается дифференциальным уравнением $\frac{dx_2}{dt} = kx_1$.

Передаточная функция звена

$$W(p) = \frac{k}{p}.$$

Такое звено является идеализацией реальных интегрирующих звеньев, часть которых будет рассмотрена ниже. Примеры интегрирующих звеньев приведены на рис. 6.3. Часто в качестве такого звена используется операционный усилитель в режиме интегрирования (рис. 6.3, *а*). Интегрирующим звеном является также обычный гидравлический демпфер (рис. 6.3, *б*). Входной величиной здесь является сила F , действующая на поршень, а выходной – перемещение поршня x_2 . Так как скорость движения поршня пропорциональна приложенной силе (без учета инерционных сил):

$$v = \frac{dx}{dt} = \frac{F}{S},$$

где S – коэффициент скоростного сопротивления, то его перемещение будет пропорциональным интегралу от приложенной силы.

Часто в качестве интегрирующего звена используется интегрирующий привод (рис. 6.3, *з*). Это особенно удобно делать при необходимости длительного интегрирования (часы, дни и даже месяцы), например, в автоматических путепрокладчиках и навигационных системах.

а

б

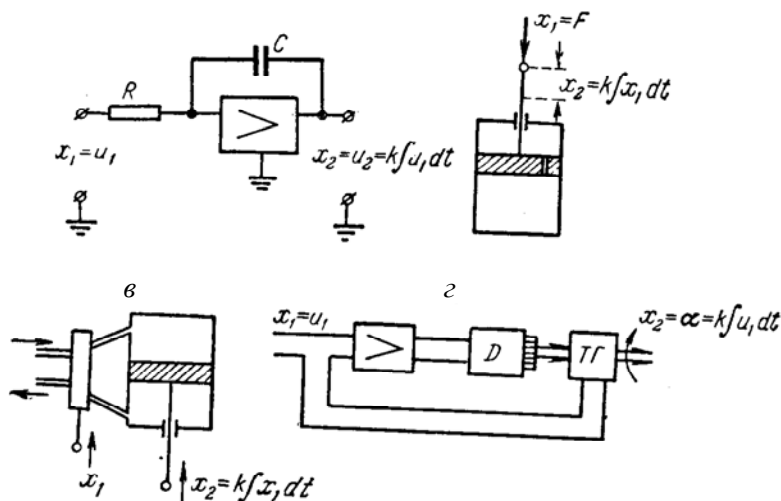


Рис. 6.3. Примеры интегрирующих звеньев

Интегрирующее звено с замедлением описывается дифференциальным уравнением:

$$T \frac{d^2 x_2}{dt^2} + \frac{dx_2}{dt} = kx_1.$$

Передаточная функция звена:

$$W(p) = \frac{k}{p(1 + Tp)}.$$

Примером такого звена является двигатель (рис. 6.4), если в качестве выходной величины рассматривать не угловую скорость, а угол поворота, являющийся интегралом от угловой скорости. К такому же типу звена сводятся демпфер (рис. 6.3, б), серводвигатель (рис. 6.3, в), интегрирующий привод (рис. 6.3, з), если более точно рассматривать их уравнения движения, и др.

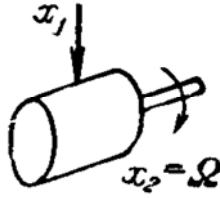


Рис. 6.4. Интегрирующее звено с замедлением

Интегрирующее звено с замедлением можно представить как совокупность двух включенных последовательно звеньев – идеального интегрирующего и апериодического первого порядка.

Изодромное звено описывается уравнением:

$$\frac{dx_2}{dt} = kx_1 + k_1 \frac{dx_1}{dt}.$$

Передаточная функция звена:

$$W(p) = \frac{k}{p} + k_1 = \frac{k(1 + Tp)}{p},$$

где $T = \frac{k_1}{k}$ – постоянная времени изодромного звена.

Из этих выражений видно, что звено можно условно представить в виде совокупности двух звеньев, действующих параллельно – идеального интегрирующего с коэффициентом передачи k и безынерционного с коэффициентом передачи k_1 .

Примеры изодромных звеньев изображены на рис. 6.5. Таким звеном может быть комбинация пружины с демпфером (рис. 6.5, б). В качестве входной величины здесь рассматривается прикладываемая сила F , а в качестве выходной – перемещение x точки a , в которой приложена сила. Это перемещение складывается из деформации пружины

$$\frac{F}{c},$$

где c – жесткость пружины, и перемещения поршня

$$\frac{1}{S} \int F dt,$$

где S – коэффициент скоростного сопротивления демпфера.

Результирующее перемещение точки

$$x = \frac{F}{c} + \frac{1}{S} \int F dt.$$

При использовании операционного усилителя (рис. 6.5, а) изодромное звено может быть получено посредством применения RC -цепи в обратной связи.

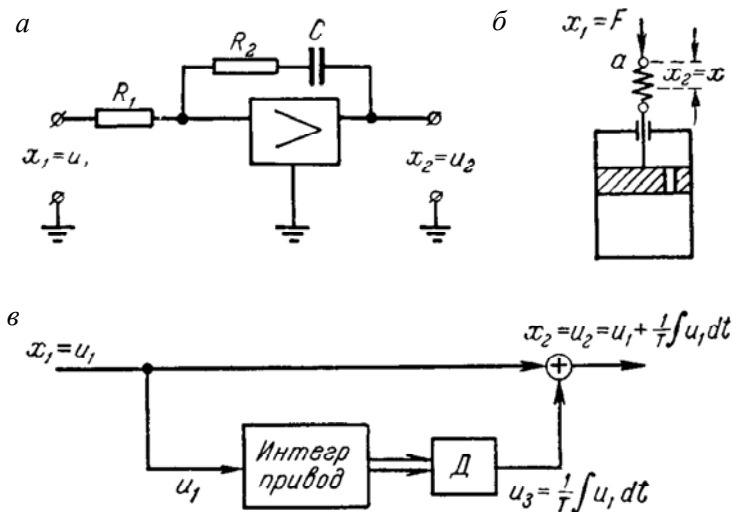


Рис. 6.5. Примеры изодромных звеньев

В системах управления часто находят применение изодромные звенья, построенные на базе интегрирующего привода (рис. 6.5, в). В этом случае входное напряжение u_1 поступает непосредственно на выход. Кроме того, это же напряжение поступает на вход интегрирующего привода. Угол поворота валика последнего, в соответ-

ствии с изложенным выше, пропорционален интегралу от входного напряжения u_1 . На выходном валике устанавливается какой-либо датчик (Д), представляющий собой линейный преобразователь угла поворота в напряжение, например, потенциометр или линейный вращающийся трансформатор. Напряжение этого преобразователя u_3 суммируется с напряжением u_1 . Эта сумма и представляет собой выходное напряжение u_2 .

Таким образом, для схемы, изображенной на рис. 6.5, в,

$$U_2(p) = \left(1 + \frac{1}{Tp}\right) U_1(p) = \frac{1 + Tp}{Tp} U_1(p),$$

где T – коэффициент пропорциональности между скоростью изменения выходного напряжения датчика интегрирующего привода и напряжением на его входе. Коэффициент передачи идеального интегрирующего звена в этом случае равен $k = \frac{1}{T}$.

В лабораторной работе исследуются электрические интегрирующие звенья. Электрическая цепь, напряжение на выходе которой пропорционально интегралу входного напряжения, т. е.

$$U_{\text{вых}} = K \int_0^i U_{\text{вх}} dt,$$

называется интегрирующей.

Наиболее часто применяется интегрирующая цепь, состоящая из резистора R и конденсатора C (рис. 6.6, а). Выходное напряжение снимается с емкости C . Для осуществления интегрирования необходимо выполнить условие

$$RC \gg t_{\text{и}}.$$

На более длительных интервалах времени цепь работает как апериодическая. Интегрирующие цепи применяются для получения линейно изменяющихся напряжений и токов, для селекции импульсов по длительности, для корректирования качества работы систем

автоматического регулирования, выполнения математической операции интегрирования, формирования длительных импульсов из коротких и т. д.

Примеры графиков напряжений на выходе интегрирующей цепи показаны на рис. 6.6, б.

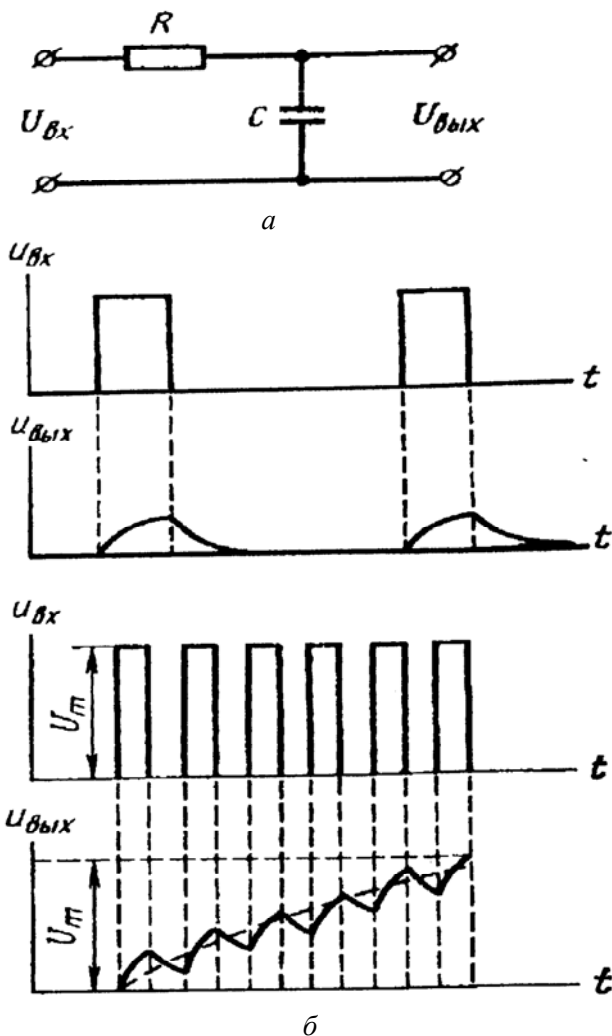


Рис. 6.6. Интегрирующая цепь и осциллограммы ее работы

Рассмотрим процесс интегрирования. С момента появления на входе цепи прямоугольного импульса начинается процесс заряда конденсатора C через резистор R . Так как сопротивление резистора R большое, то конденсатор C заряжается медленно. По окончании входного импульса этот конденсатор медленно разряжается через резистор R . За время паузы между импульсами конденсатор разряжается незначительно, и каждый очередной импульс подзаряжает его. Напряжение на выходе цепи возрастает (рис. 6.6, б).

Емкость конденсатора часто выбирают в пределах 500–10 000 пф, а сопротивление резистора – порядка 1 кОм.

Дифференцирующие звенья

Идеальное дифференцирующее звено описывается уравнением:

$$x_2 = k \frac{dx_1}{dt}.$$

Передаточная функция звена:

$$W(p) = kp.$$

Примеры идеальных дифференцирующих звеньев изображены на рис. 6.7. Единственным идеальным дифференцирующим звеном, которое точно описывается уравнением, приведенным выше, является тахогенератор постоянного тока (рис. 6.7, а), если в качестве входной величины рассматривать угол поворота его ротора α , а в качестве выходной – ЭДС якоря e . В тахогенераторе постоянного тока при неизменном потоке возбуждения ЭДС в якоре пропорциональна скорости вращения: $e = k\Omega$. Скорость вращения есть производная по времени от угла поворота: $\Omega = \frac{d\alpha}{dt}$. Следовательно, $e = k \frac{d\alpha}{dt}$.

В режиме, близком к холостому ходу (сопротивление нагрузки велико), можно считать, что напряжение якоря равно ЭДС: $u = e$.

Тогда $u = k \frac{d\alpha}{dt}$.

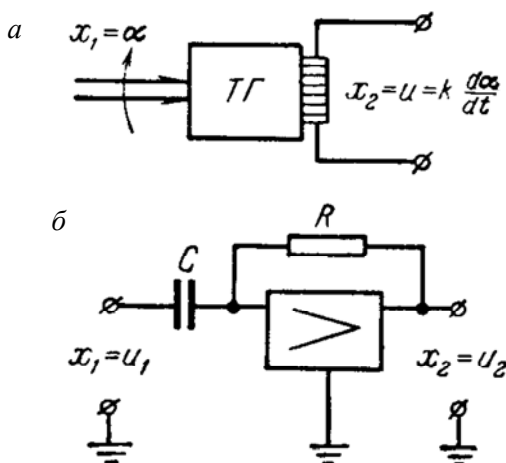


Рис. 6.7. Примеры идеальных дифференцирующих звеньев

Приближенно в качестве идеального дифференцирующего звена может рассматриваться операционный усилитель в режиме дифференцирования (рис. 6.7, б).

Дифференцирующее звено с замедлением описывается уравнением:

$$T \frac{dx_2}{dt} + x_2 = k \frac{dx_1}{dt}.$$

Передаточная функция звена:

$$W(p) = \frac{kp}{1 + Tp}.$$

Звено условно можно представить в виде двух включенных последовательно звеньев – идеального дифференцирующего и аperiodического первого порядка.

На рис. 6.8 изображены примеры дифференцирующих звеньев с замедлением. Наиболее часто употребляются электрические цепи (рис. 6.8, а, б и в). В некоторых случаях используются дифференцирующие устройства, состоящие из гидравлического демпфера и пружины (рис. 6.8, г).

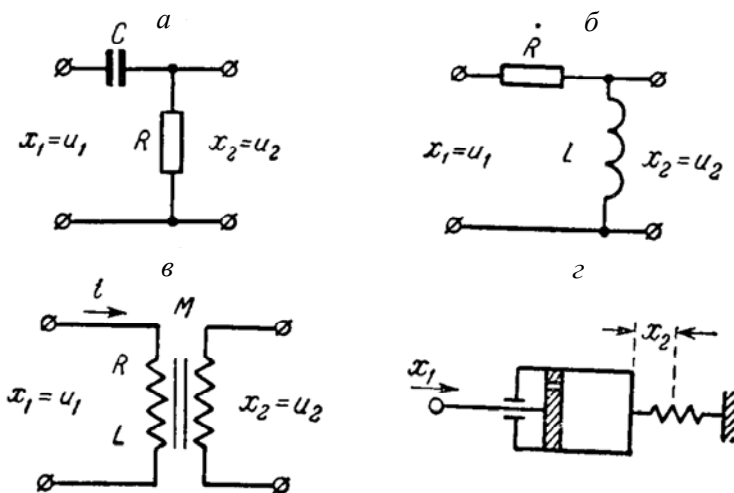


Рис. 6.8. Дифференцирующие звенья с замедлением

В лабораторной работе исследуются электрические дифференцирующие звенья. Электрическая цепь, напряжение на выходе которой пропорционально производной входного напряжения, т. е.

$$U_{\text{вых}} = K \frac{dU_{\text{вх}}}{dt},$$

называется дифференцирующей цепью. Эти цепи используются для следующих целей:

- 1) укорочения длительности импульсов, т. е. для формирования импульсов остроконечной формы (такие импульсы примеряются для создания меток времени, запуска различных схем и т. д.);
- 2) для моделирования динамических звеньев;
- 3) выполнения электрическим путем математической операции дифференцирования в электронных вычислительных машинах;
- 4) селекции импульсов по длительности.

Дифференцирование основано на использовании зависимости между током и напряжением на емкости (или индуктивности), выражаемой следующим образом:

$$I_c = C \frac{dU_c}{dt} \quad \text{или} \quad U_L = -L \frac{dI}{dt}.$$

Ток, протекающий через емкость, как видно из этого выражения, является производной входного напряжения. Однако на выходе цепи обычно требуется получить не ток, а напряжение, пропорциональное производной входного. Поэтому на выход цепи нужно включить активное сопротивление R .

Для дифференцирования напряжения можно использовать цепь, состоящую из последовательно соединенных C и R или R и L . В дифференцирующей RC -цепи выходное напряжение снимается с сопротивления R , а в RL -цепи – с индуктивности. Практически чаще используется цепь RC .

При выполнении данной работы следует обратить внимание на то, что RC -цепь будет дифференцирующей не при любых значениях R и C , а только при определенных.

Из общего условия дифференцирования

$$u_{\text{вых}}(t) = i(t)R = RC \frac{dU_c}{dt} = RC \frac{d(U_{\text{вх}} - U_{\text{вых}})}{dt}$$

видно, что выходное напряжение будет пропорционально производной входного напряжения при условии

$$U_{\text{вых}} \ll U_{\text{вх}}.$$

Выполнение этого условия зависит от формы входного напряжения. В данной работе ставится задача получить остrokонечные кратковременные импульсы из импульсов прямоугольной формы. Для этого случая условие дифференцирования будет выполняться при соблюдении неравенства $\tau \ll t_{\text{и}}$, т. е. когда постоянная времени цепи $\tau = RC$ будет во много раз меньше длительности входного импульса $t_{\text{и}}$. Практически считается, что цепь будет дифференцирующей при условии $0,1 t_{\text{и}} \gg \tau$. Схема такой цепи и графики напряжений на входе и на выходе цепи показаны на рис. 6.9.

В момент времени t_1 на входе цепи появляется импульс (положительный перепад потенциала). С этого момента начинается заряд конденсатора C через резистор R . Так как напряжение на емкости мгновенно измениться не может, то в момент времени t_1 все входное напряжение будет приложено к выходу, т. е.

$$U_{\text{вых}}(t_1) = U_{\text{вх}}.$$

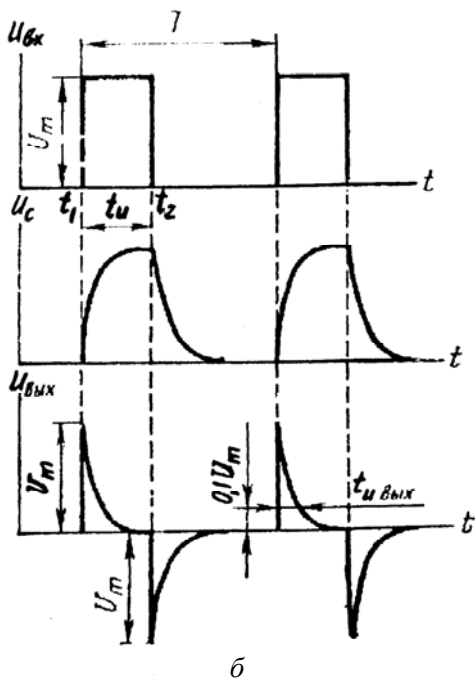
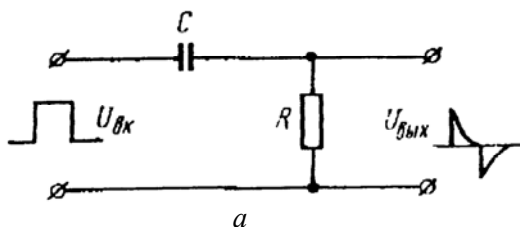


Рис. 6.9. Схема дифференцирующего звена (а) и графики напряжений на его входе и выходе (б)

По мере заряда конденсатора напряжение на нем возрастает, а на резисторе, соответственно, уменьшается по экспоненциальному закону. Будем считать, что напряжение на конденсаторе равно $0,9U_{\text{вх}}$. На резисторе R в этот момент будет напряжение $0,1U_{\text{вх}}$.

В момент времени t_2 входной импульс заканчивается, т. е. напряжение на входе скачком падает до нуля (отрицательный перепад потенциала). С этого момента начинается разряд конденсатора через

внутреннее сопротивление R_i источника входных импульсов и резистор R . Поскольку ток разряда противоположен току заряда, то на выходе получается остроконечный импульс отрицательной полярности.

Длительность выходных импульсов обычно принято оценивать на уровне 0,1 амплитуды. Исходя из этого, длительность импульса после дифференцирования можно определить по формуле:

$$t_{\text{и вых}} = 2,3RC.$$

Изменяя величину R или C , можно изменять длительность выходных импульсов.

Амплитуду выходных импульсов можно считать равной амплитуде входных импульсов, т. е. $U_{\text{вых}} = U_{\text{вх}}$.

В реальных схемах дифференцирующая цепь подключается к генератору входных импульсов, а выход – к нагрузке (рис. 6.10, а). При этом внутреннее сопротивление генератора R_i и паразитная емкость схемы C_0 оказывает влияние на амплитуду, длительность выходного импульса и на крутизну его фронта. Емкость C_0 состоит из выходной емкости генератора C_1 , входной емкости нагрузки C_2 и емкости монтажа C_m .

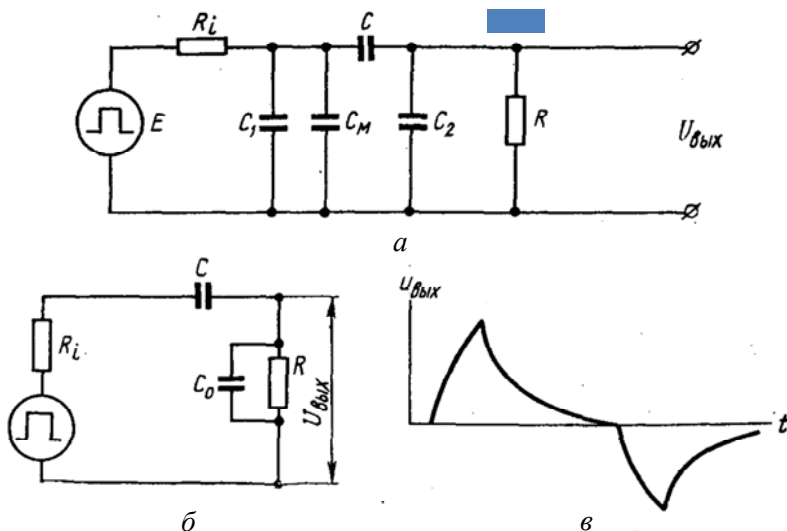


Рис. 6.10. Схема дифференцирующей цепи с учетом паразитных параметров схемы

Рассматривая схему дифференцирующей цепи с учетом паразитных параметров R_i и C_0 (рис. 6.10, б) видим, что:

1) сопротивление R_i оказывается включенным последовательно с сопротивлением R , создавая делитель напряжения. Поэтому амплитуда выходного напряжения, снимаемого с R , будет уменьшена до величины

$$U'_{\text{вых}} = U_{\text{вых}} R / (R + R_i),$$

где $U_{\text{вых}}$ – амплитуда выходного напряжения без учета R_i ;

2) наличие R_i приводит к увеличению длительности выходных импульсов, так как за счет R_i увеличивается постоянная времени цепи $\tau = C(R + R_i)$;

3) наличие паразитной емкости C_0 приводит к растягиванию переднего фронта импульса на выходе; при этом длительность переднего фронта определяется постоянной времени заряда емкости C_0 через сопротивление R_i ;

4) емкость C_0 увеличивает постоянную времени исследуемой цепи в целом, что ведет к увеличению длительности выходного импульса

$$t_{\text{вых}} = 2,3(C + C_0)R$$

(здесь R_i полагаем равным нулю);

5) емкость C_0 уменьшает также и амплитуду выходного импульса, так как для фронта и среза входного импульса вместе с емкостью C образует делитель; при этом

$$U'_{\text{вых}} = U_{\text{вх}} C / (C + C_0).$$

Таким образом, паразитные параметры R_i и C_0 приводят к уменьшению амплитуды выходного импульса, увеличению его длительности и к растягиванию переднего фронта, как это показано на рис. 6.10, в. Для уменьшения влияния паразитных параметров на форму выходных импульсов необходимо уменьшать R_i и C_0 .

Учитывая, что емкость C_0 бывает порядка 20–50 пф, величину C можно выбирать порядка 100–150 пф, т. е. в 3–5 раз больше C_0 .

Сопротивление R обычно выбирают порядка нескольких кОм. В процессе выполнения работы следует обратить внимание на влияние величины R на параметры выходных импульсов.

Исследование изучаемых в данной работе электрических цепей производится поочередно. Сначала исследуется дифференцирующая цепь, а затем интегрирующая.

Сборка исследуемых цепей осуществляется на стенде (рис. 6.11, 6.12).

Наблюдаемые на экране осциллографа импульсы на выходе дифференцирующей цепи нужно зарисовать, придерживаясь одного масштаба так, чтобы можно было сравнить их и по ним проанализировать влияние параметров схемы на форму и параметры выходных импульсов.

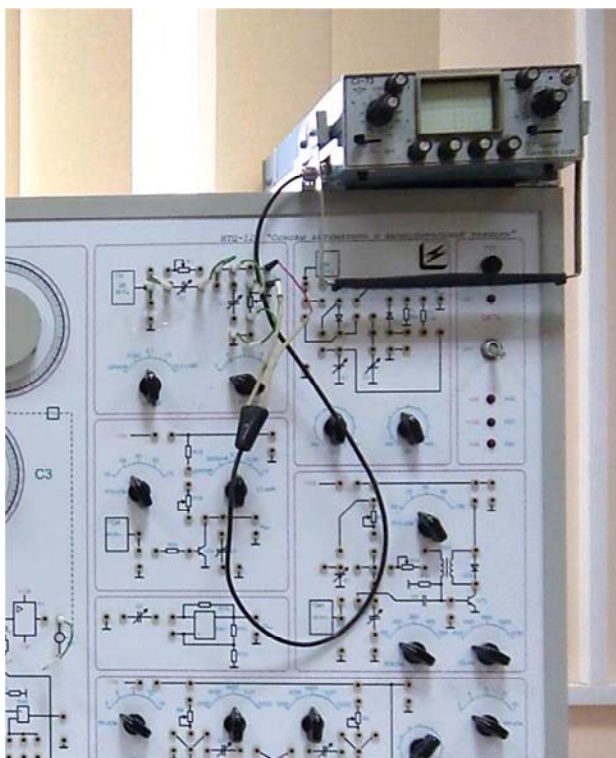


Рис. 6.11. Сборка исследуемых цепей на стенде

Следует обратить внимание на то, что отрицательные импульсы на выходе дифференцирующей цепи могут отличаться от положительных как по амплитуде, так и по длительности. Известно, что это является следствием различия величин токов заряда и разряда конденсатора C в результате неодинаковых параметров цепей заряда и разряда. В таком случае в процессе работы нужно проанализировать, какие элементы схемы вызывают различие параметров импульсов.

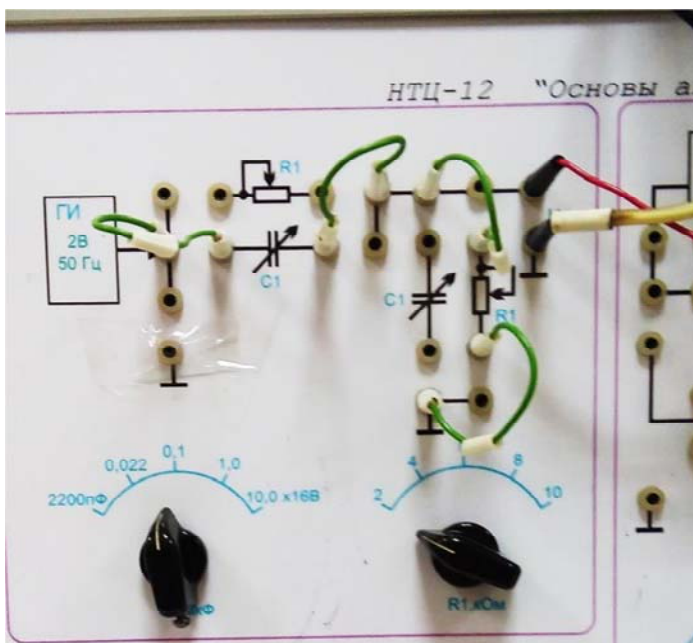


Рис. 6.12. Сборка исследуемых цепей на стенде

Порядок выполнения работы

Исследование дифференцирующей цепи

1. Ознакомиться со схемой и приборами.
2. Собрать схему дифференцирующей цепи, задав переключателем $C = 0,1$ мкФ, $R = 2$ кОм (рис. 6.13).

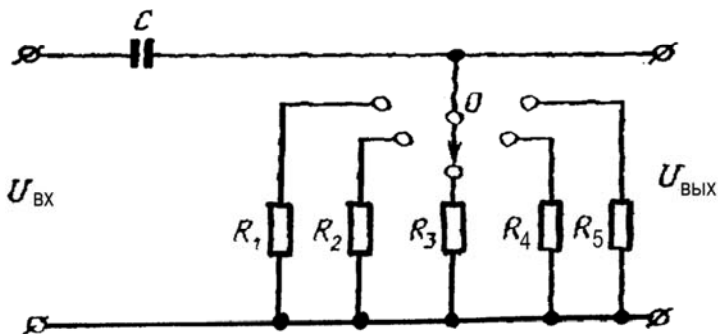


Рис. 6.13. Схема лабораторного макета дифференцирующего RC -звена:
 $C = 0,1$ мкФ; $R_1 = 2$ кОм; $R_2 = 4$ кОм; $R_3 = 6$ кОм; $R_4 = 8$ кОм; $R_5 = 10$ кОм

3. Опробовать схему исследований. Для этого, включив осциллограф в сеть, подать на вход осциллографа импульсы с выхода генератора при отключенной RC -цепи. Получить устойчивое изображение импульсов на экране осциллографа. Зарисовать осциллограмму импульсов и измерить их параметры – амплитуду и длительность. Результаты измерений записать в табл. 6.1.

Таблица 6.1

№ п/п	R	C	$U_{\text{вх}}$	$t_{\text{и.вх}}$	$U_{\text{вых}}$	$t_{\text{и.вых}}$

4. Подключить осциллограф к выходу дифференцирующей цепи. Получить на экране осциллографа устойчивое изображение выходных импульсов, зарисовать осциллограмму и измерить их параметры. Данные измерений записать в табл. 6.1.

5. Изменяя величину сопротивления R перестановкой переключателя в положения 4, 6, 8, 10 кОм, проделать то же, что в п. 4.

6. Увеличить масштаб развертки и растянуть на экране осциллографа фронт выходного импульса. Сравнить реальный импульс с идеальным.

7. Выключить генератор и отключить от его выхода дифференцирующую цепь.

8. По данным значениям R и C произвести расчет длительности импульсов и сравнить их с полученными экспериментально значениями.

Исследование интегрирующей цепи

1. Собрать интегрирующую цепь по схеме, приведенной на рис. 6.14, задав переключателем $C = 2200$ пФ, $R = 6$ кОм.

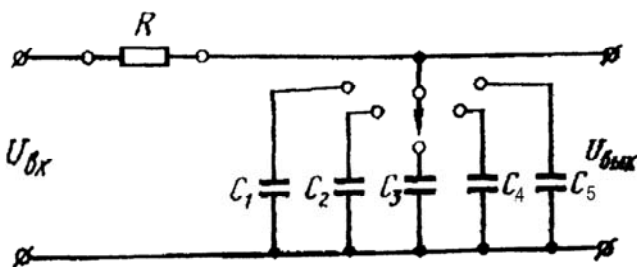


Рис. 6.14. Схема лабораторного макета интегрирующего RC -звена:
 $R = 6$ кОм; $C_1 = 2200$ пФ; $C_2 = 0,022$ мкФ; $C_3 = 0,1$ мкФ; $C_4 = 1$ мкФ; $C_5 = 10$ мкФ

2. Подключить осциллограф к выходу интегрирующей цепи. Получить на экране осциллографа устойчивое изображение выходных импульсов, зарисовать осциллограмму и измерить их параметры. Данные измерений записать в таблицу, аналогичную табл. 6.1.

3. Изменяя величину емкости C перестановкой переключателя в положения 0,022; 0,1; 1; 10 мкФ, проделать то же, что в п. 2.

4. По осциллограммам определить, в каких случаях цепь работает как интегрирующая.

5. Выключить приборы и разобрать схему.

Содержание отчета

1. Наименование и цель работы.
2. Электрические схемы исследуемых динамических звеньев.
3. Осциллограммы входных и выходных импульсов.
4. Расчет постоянных времени и параметров импульсов на выходе дифференцирующих звеньев.
5. Краткие выводы по каждой цепи.

Контрольные вопросы

1. Нарисовать электрическую схему дифференцирующего звена и пояснить физические процессы в нем.
2. Написать условие, при котором RC -цепь будет дифференцирующей.
3. Как нужно изменить параметры RC -цепи для получения более точного дифференцирования?
4. Нарисовать графики импульсов на выходе дифференцирующего звена при подаче на вход его прямоугольных импульсов.
5. Нарисовать электрическую схему интегрирующего звена и пояснить физические процессы в нем.
6. Как нужно выбрать параметры R и C , чтобы цепь была интегрирующей?
7. Нарисовать графики импульсов на выходе интегрирующего звена при подаче на вход его прямоугольных импульсов.
8. Где используются дифференцирующие и интегрирующие звенья?
9. Как определить длительность импульсов на выходе дифференцирующего звена?

Литература

1. Юферов, Ф. М. Электрические машины автоматических устройств / Ф. М. Юферов. – М. : Высшая школа, 1976. – 416 с.
2. Ивашенко, Н. Н. Автоматическое регулирование. Теория и элементы систем / Н. Н. Ивашенко. – М. : Машиностроение, 1978. – 736 с.
3. Филиппс, Ч. Системы управления с обратной связью / Ч. Филиппс, Р. Харбор. – М. : Лаборатория базовых знаний, 2001. – 616 с.
4. Лукас, В. А. Теория управления техническими системами. Компактный учебный курс для вузов / В. А. Лукас. – Екатеринбург : Изд-во УГГГА, 2002. – 675 с.
5. Бесекерский, В. А. Теория систем автоматического регулирования / В. А. Бесекерский, Е. П. Попов. – СПб. : Профессия, 2004. – 752 с.
6. Минченя, В. Т. Компьютерное моделирование систем автоматического регулирования при изучении дисциплины «Автоматика» : пособие / В. Т. Минченя, А. Л. Савченко, Р. М. Асимов. – Минск : Амалфея, 2014. – 96 с.
7. Методы классической и современной теории автоматического управления : учебник : в 3 т. / под ред. Н. Д. Егупова. – М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. – Т. 1: Анализ и статистическая динамика систем автоматического управления. – 748 с.
8. Солодовников, В. В. Основы теории и элементы систем автоматического регулирования / В. В. Солодовников, В. Н. Плотников, А. В. Яковлев. – М. : Машиностроение, 1985. – 535 с.
9. Востриков, А. С. Теория автоматического регулирования / А. С. Востриков, Г. А. Французова. – М. : Высшая школа, 2004. – 365 с.

Учебное издание

САВЧЕНКО Андрей Леонидович
МИНЧЕНЯ Владимир Тимофеевич
БУРАК Вероника Анатольевна

АВТОМАТИКА

Пособие

для обучающихся по специальностям 6-05-0716-03
«Информационно-измерительные приборы и системы»,
6-05-0716-05 «Технические системы обеспечения безопасности»
и 6-05-0716-06 «Биомедицинская инженерия»

Редактор *А. С. Козловская*
Компьютерная верстка *Н. А. Школьниковой*

Подписано в печать 23.06.2025. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 4,47. Уч.-изд. л. 2,89. Тираж 100. Заказ 176.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.