

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«МУРМАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Кафедра автоматики и  
вычислительной техники

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АСР**

Мурманск  
2004

УДК

Составители: Маслов Алексей Алексеевич, к.т.н., профессор кафедры автоматизации и вычислительной техники Мурманского государственного технического университета;  
Яценко Виктория Владимировна, старший преподаватель той же кафедры

Методические указания рассмотрены и одобрены кафедрой «\_\_\_» \_\_\_\_\_  
2003г., протокол №\_

Рецензент – Висков Андрей Юрьевич, к.т.н., доцент кафедры автоматизации и вычислительной техники Мурманского государственного технического университета

# ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

## 1. Цель работы:

экспериментальное определение влияния структуры и параметров типовых регуляторов на динамические свойства автоматических систем регулирования (АСР).

## 2. Теоретические сведения

Основным режимом работы системы является динамический, или переходный, в процессе которого осуществляется переход системы из одного установившегося состояния в другое.

В задачу исследования динамических свойств системы входят оценка устойчивости системы и определение основных показателей качества регулирования.

Устойчивость системы - это ее способность переходить из исходного равновесного состояния в другое равновесное состояние после приложения внешнего воздействия и возвращаться к исходному состоянию равновесия после снятия этого воздействия.

Основными причинами возникновения неустойчивых движений в замкнутой системе служат интегрирующие свойства (атстатизм) элементов АСР, запаздывание и высокие значения коэффициентов усиления регулятора или других элементов.

К системе автоматического регулирования предъявляются требования не только в отношении ее устойчивости. Для обеспечения работоспособности системы не менее необходимо, чтобы процесс автоматического регулирования осуществлялся при обеспечении определенных качественных показателей.

Простейшая схема замкнутой системы автоматического регулирования одной регулируемой величины может быть представлена в виде схемы, приведенной на рисунке 1, где  $g(t)$  – задающее воздействие,

$\varepsilon(t)$  – ошибка регулирования или рассогласование,

$U(t)$  – регулирующее воздействие,

$y(t)$  – регулируемая величина,

$f(t)$  – возмущающее воздействие.

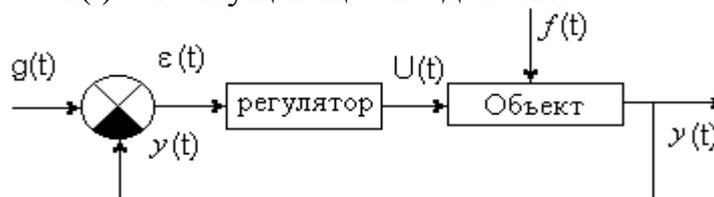


Рисунок 1. Функциональная схема замкнутой АСР.

Качество регулирования оценивается по поведению системы при определенных воздействиях на нее.

Регулируемая величина  $y(t)$  поддерживается на заданном уровне автоматическим регулятором, на вход которого подается разность  $\varepsilon(t) = g(t) - y(t)$ , называемая ошибкой регулирования или рассогласованием.

При появлении ошибки, регулятор оказывает на объект регулирующее воздействие  $U(t)$ , в результате чего, по завершению процесса регулирования, эта ошибка, называемая статической, сводится к допустимому минимуму. В астатических системах статическая ошибка равна нулю.

С целью унификации требований к выработке единых критериев для оценки качества регулирования обычно исследуется поведение системы после приложения к ней какого-либо типового воздействия, которое бы наиболее полно охватывало возможные реальные воздействия или было бы наиболее неблагоприятным. Чаще всего на практике в качестве типового воздействия, действующего на систему, принимается возмущающее воздействие в виде единичной ступеньки  $1(t)$ . В таком случае показатели качества регулирования характеризуют вид процесса регулирования, т.е. форму кривой регулируемой величины  $y(t)$ .

Изменение регулируемого параметра в результате мгновенного ступенчатого изменения сигнала на входе системы характеризуется следующими показателями качества регулирования (рис. 2): временем переходного процесса, перерегулированием и колебательностью.

Время переходного процесса  $t_p$  – интервал времени от начала приложения воздействия до момента, после которого отклонение регулируемой величины от установившегося значения не будет выходить за заданные пределы. Применительно к АСР частоты вращения двигателя по окончании переходного процесса будет иметь место соотношение:

$$|n(t) - n(\infty)| \leq \Delta,$$

где  $\Delta$  - допустимое отклонение скорости вращения от заданного значения.

Перерегулирование  $\sigma$  - максимальное превышение регулируемой величины установившегося значения, выраженное в процентах к этому значению:

$$\sigma = \frac{n_{\max} - n_{\infty}}{n_{\infty}} \cdot 100\%,$$

где  $n_{\max}$  – максимальное значение регулируемой величины в процессе управления,  $n_{\infty}$  - установившееся значение регулируемой величины.

Колебательность характеризуется числом переходов регулируемой величины через установившееся значение (числом колебаний) в течение времени переходного процесса.

Рассмотренные показатели качества регулирования задаются при проектировании системы.

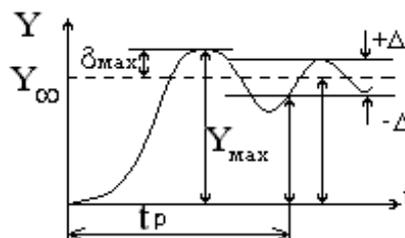


Рисунок 2. График переходного процесса в замкнутой АСР.

С целью получения заданных показателей качества переходного процесса и увеличения точности регулирования АСР применяются регуляторы, реализующие различные законы регулирования, т.е. различные функциональные связи между регулирующим воздействием и ошибкой регулирования.

1. ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫЕ РЕГУЛЯТОРЫ (П-регуляторы) производят изменение регулирующего воздействия пропорционально отклонению регулируемой величины от заданного значения  $U(t) = k_p \cdot \varepsilon(t)$ , рисунок 3(а).

Коэффициент  $k_p$  - это коэффициент передачи регулятора. Численно коэффициент передачи равен изменению регулирующего воздействия при отклонении регулируемой величины на единицу ее изменения.

П-регулятор в динамическом отношении подобен усилительному звену, передаточная функция, амплитудно-фазочастотная и переходная (временная) характеристики которого определяются формулами:

$$W(p) = k; \quad \Phi(j\omega) = k; \quad h(t) = k.$$

Пропорциональные регуляторы позволяют устойчиво регулировать работу практически всех промышленных регулируемых объектов. Однако при управлении статическим объектом (объектом с положительным самовыравниванием) система с П-регулятором в целом будет статической, т.е. будет содержать статическую ошибку.

2. ИНТЕГРИРУЮЩИЕ РЕГУЛЯТОРЫ (И-регуляторы) производят изменение регулирующего воздействия пропорционально интегралу от отклонения регулируемой величины (рисунок 3(б)):

$$U(t) = \frac{1}{T_u} \cdot \int_0^t \varepsilon(t) dt$$

Этот закон может быть записан в следующем виде:

$$U'(t) = \frac{1}{T_u} \cdot \varepsilon(t)$$

т. е. интегрирующие регуляторы производят изменение регулирующего воздействия со скоростью, пропорциональной отклонению регулируемой величины от ее заданного значения.

Постоянная времени интегрирования  $T_u$  - величина, которой характеризуется степень ввода в закон регулирования интеграла, также получившая название времени изодрома.

В динамическом отношении И-регулятор подобен интегрирующему звену, его передаточная функция, амплитудно-фазочастотная и переходная характеристики определяются по формулам:

$$W(p) = \frac{1}{T_u p}; \quad \Phi(j\omega) = -j \frac{1}{T_u \omega}; \quad h(t) = \frac{1}{T_u} \cdot t$$

3. ПРОПОРЦИОНАЛЬНО-ИНТЕГРИРУЮЩИЕ РЕГУЛЯТОРЫ (ПИ-регуляторы) с введением в закон регулирования интеграла производят изменение регулирующего воздействия пропорционально сумме отклонения и интеграла от отклонения регулируемой величины:

$$U(t) = k \cdot \left( \varepsilon(t) + \frac{1}{T_u} \cdot \int_0^t \varepsilon(t) \cdot dt \right) \text{ (рисунок 3(в))}$$

или

$$U'(t) = k \cdot \left( \varepsilon'(t) + \frac{1}{T_u} \cdot \varepsilon(t) \right),$$

т.е. скорость изменения регулирующего воздействия пропорциональна отклонению и скорости изменения регулируемой величины.

В динамическом отношении ПИ-регулятор подобен системе параллельно включенных П-регулятора и И-регулятора. При  $T_u \rightarrow \infty$  ПИ-регулятор превращается в П-регулятор.

Передаточная функция, амплитудно-фазочастотная и переходная характеристики ПИ-регуляторов, определяются по формулам:

$$W(p) = k + \frac{k}{T_u p} = k \frac{T_u p + 1}{T_u p}; \quad \Phi(j\omega) = k - j \frac{k}{T_u \omega}; \quad h(t) = k + \frac{k}{T_u} t$$

4. ПРОПОРЦИОНАЛЬНО-ДИФФЕРЕНЦИРУЮЩИЕ РЕГУЛЯТОРЫ (ПД-регуляторы) с введением в закон регулирования производной от регулируемой величины производят изменение регулирующего воздействия пропорционально отклонению и скорости изменения регулируемой величины (рисунок 3(г)):

$$U(t) = k \cdot \left( \varepsilon(t) + T_\partial \cdot \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \right)$$

Время предварения регулятора - это постоянная времени дифференцирования (предварения)  $T_\partial$ , величина которой характеризует степень ввода в закон регулирования производной.

Передаточная функция, амплитудно-фазочастотная и переходная характеристики ПД-регуляторов, определяются по формулам:

$$W(p) = k + kT_\partial p = k(1 + T_\partial p); \quad \Phi(j\omega) = k(1 + jT_\partial \omega); \quad h(t) = \begin{cases} \infty & \text{при } t = 0 \\ k & \text{при } t > 0 \end{cases}$$

#### 5. ПРОПОРЦИОНАЛЬНО-ИНТЕГРО-ДИФФЕРЕНЦИРУЮЩИЕ

РЕГУЛЯТОРЫ (ПИД-регуляторы) с введением в закон регулирования интеграла и производной от регулируемой величины производят изменение регулирующего воздействия пропорционально отклонению, интегралу и скорости изменения регулируемой величины (рисунок 3(д)):

$$U(t) = k \cdot \left( \varepsilon(t) + \frac{1}{T_u} \cdot \int_0^t \varepsilon(t) \cdot dt + T_\partial \cdot \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \right)$$

Передаточная функция, амплитудно-фазочастотная и переходная характеристики ПИД-регуляторов, определяются по формулам:

$$W(p) = k + \frac{k}{T_u p} + kT_\partial p; \quad \Phi(j\omega) = k - j \frac{k}{T_u \omega} + jkT_\partial \omega; \quad h(t) = \begin{cases} \infty & \text{при } t = 0 \\ k + \frac{k}{T_u} t & \text{при } t > 0 \end{cases}$$

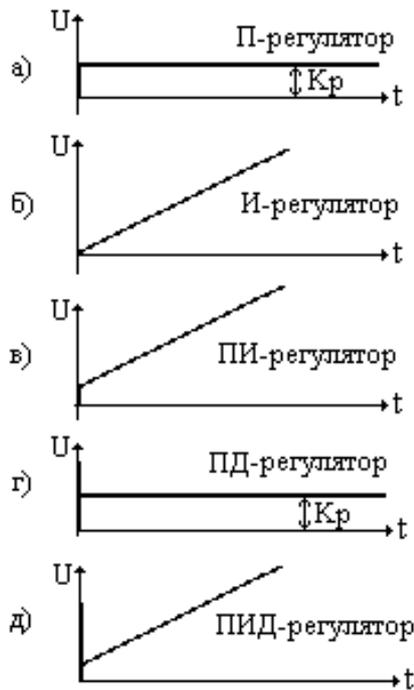


Рисунок 3. Переходные характеристики типовых регуляторов.

### Настройка регуляторов АСР.

Допустим, что суммарный закон регулирования содержит три составляющие: статическую  $U_{cm}(t)$ , пропорциональную отклонению регулируемой величины от заданного значения; интегрирующую  $U_u(t)$ , пропорциональную интегралу  $\int_0^t \varepsilon(t) \cdot dt$ , и дифференцирующую  $U_\partial(t)$ , пропорциональную производной  $\frac{d\varepsilon(t)}{dt}$ . Тогда воздействие регулятора равно

$$U(t) = U_{cm}(t) + U_u(t) + U_\partial(t) = k \cdot \varepsilon(t) + \frac{k}{T_u} \int_0^t \varepsilon(t) \cdot dt + kT_\partial \frac{d\varepsilon(t)}{dt}$$

Предположим, что в результате появления в системе значительного постоянного возмущающего воздействия  $f(t)$  начинает увеличиваться отклонение  $\varepsilon(t)$ . В начальный момент времени две из трех составляющих из закона регулирования  $U_{cm}(t)$  и  $U_u(t)$  равны нулю, так как отклонение еще только начинает появляться и его значение пока мало отличается от нуля.

Но так как скорость нарастания отклонения в начальный момент времени, наоборот, максимальна и равна  $\operatorname{tg} \alpha$  (рис. 4, кривая Е), то третья составляющая закона регулирования  $U_\partial(t)$  будет иметь максимальное значение, равное

$$U_\partial = T_\partial \cdot \operatorname{tg} \alpha$$

Благодаря этому регулятор при фактически еще отсутствующем отклонении начинает воздействовать на объект в сторону ликвидации формирующегося отклонения регулируемой величины в системе. Иными словами, регулирующее воздействие  $U_\partial(t)$  создается регулятором с опережением в предвидении только еще возникающих отклонений.

Только после появления достаточно большого отклонения в законе регулирования появятся ощутимые составляющие регулирующего воздействия, сформированные статической и интегрирующей частями регулятора.

По мере нарастания составляющих  $U_{cm}(t)$  и  $U_u(t)$  составляющая  $U_\delta(t)$ , пропорциональная производной от отклонения, будет резко уменьшаться, поскольку суммарное регулирующее воздействие будет замедлять нарастание отклонения  $\varepsilon(t)$ .

По истечении времени  $t1$  (рис.4), когда отклонение регулируемой величины достигнет максимального значения, наибольшую величину будет иметь составляющая  $U_{cm}(t)$ , составляющая  $U_u(t)$  будет также существенной, а составляющая  $U_\delta(t)$  уменьшится до нуля.

Благодаря наличию большого регулирующего воздействия, пропорционального производной  $\frac{d\varepsilon(t)}{dt}$ , результирующее воздействие  $U(t)$  регулятора именно в начале переходного процесса энергично подавляет эффект от возмущающего воздействия, поступившего в систему, что приводит к быстрому прекращению увеличения, а затем и к уменьшению отклонения регулируемой величины.

Как только отклонение регулируемой величины начнет уменьшаться, регулирующее воздействие, пропорциональное производной от отклонения, становится отрицательным, уменьшая регулирующее воздействие, создаваемое двумя другими составляющими регулятора; этим предупреждается появление в дальнейшем слишком больших отрицательных отклонений регулируемой величины, вызываемых в первую очередь действием интегрирующей составляющей, которая, непрерывно нарастая, может к этому времени создать слишком большое регулирующее воздействие  $U(t)$ . Следовательно, именно в тот момент  $t3$  (рис. 4), когда отклонение регулируемой величины уменьшится до нуля и дальнейшее ее уменьшение не должно иметь места, интегрирующей составляющей регулятора будет оказывать максимальное воздействие  $U_u(t)$  на объект в направлении дальнейшего уменьшения регулируемой величины. Это воздействие может быть компенсировано только отрицательным воздействием  $U_\delta(t)$ . Поэтому при настройке ПИД-регулятора воздействие, пропорциональное производной, необходимо отрегулировать таким образом, чтобы в момент времени  $t3$  оно полностью компенсировало регулирующее воздействие, созданное интегрирующей частью регулятора. Иными словами, в момент времени  $t3$  (имея в виду, что при этом  $\varepsilon = 0$  и, следовательно,  $U_{cm}(t) = 0$ ) значение суммарного регулирующего воздействия регулятора  $U(t)$  должно стать равным нулю.

Однако в силу инерционности объектов достигнутое равновесное состояние системы не сохранится, и за описанным этапом работы системы последует дальнейшее увеличение отклонения с обратным знаком, на которое регулятор будет реагировать так же, как это было описано (участок  $t3-t4-t5$ ), но с меньшей величиной максимального отклонения. Возникающие колебания  $\varepsilon(t)$  относительно заданного значения постепенно затухают.

В случае большой инерционности объекта необходимо во избежание больших перерегулирований настраивать регулятор так, чтобы результирующее

воздействие  $U(t)$  регулятора стало равным нулю не тогда, когда регулируемая величина будет равна заданной, т. е. не при  $t=t_3$ , а несколько раньше — при  $t = t_2 < t_3$ . Тогда при  $t = t_3$  получим  $|U_\delta| > |U_u|$  и результирующее воздействие регулятора на объект будет в этот момент отрицательным; поэтому регулятор будет энергичнее предупреждать возможные существенные отклонения регулируемой величины в обратную сторону. При этом, чем быстрее шло уменьшение регулируемой величины при подходе ее к заданному значению, тем больше будет отрицательная составляющая регулирующего воздействия, пропорциональная производной  $\frac{d\varepsilon(t)}{dt}$ , и тем в большей степени она будет препятствовать возникновению отрицательного перерегулирования, вызываемого действием интегрирующей части регулятора.

Таким образом, при введении в закон регулирования составляющей, пропорциональной производной от отклонения регулируемой величины, регулирующее воздействие на объект создается с предварением, учитывающим предстоящие отклонения регулируемой величины от заданного значения и максимально компенсирующим их еще в процессе возникновения и первоначального развития.

При правильной настройке ПИД-регулятора переходные процессы в системе быстро затухают даже при больших возмущающих воздействиях и значительной инерционности объекта регулирования.

В системах с ПИД-регулятором по окончании переходного процесса, когда регулируемая величина возвращается к заданному значению, на выходе регулятора благодаря наличию в нем астатической части остается постоянное регулирующее воздействие, которое полностью компенсирует сохраняющееся постоянное внешнее возмущающее воздействие, этим и обеспечивается астатизм системы.

Рассмотрим способы настройки ПИД-регулятора. Для этого представим закон управления регулятора в следующем виде:

$$U(t) = K \varepsilon(t) + K_\delta \frac{d\varepsilon(t)}{dt} + K_u \int_0^t \varepsilon(t) dt$$

Настраиваемыми параметрами непрерывных регуляторов, реализующих типовые законы регулирования, являются  $K$  — коэффициент усиления,  $K_\delta$  — коэффициент передачи по производной и  $K_u$  — коэффициент передачи по интегралу. Существуют два способа настройки регуляторов в условиях эксплуатации АСР.

#### Первый способ:

1. Определение  $K_{\max}$ , при котором АСР теряет устойчивость (после скачкообразного изменения заданного или возмущающего воздействия возникают незатухающие колебания регулируемой величины). При этом  $K_\delta = 0$ ,  $K_u = 0$ . Опыт отработки скачкообразного воздействия повторяют с постепенным увеличением коэффициента усиления, добиваясь незатухающих колебаний. При этом

снимают достигнутое значение  $K_{\max}$  и длительность периода незатухающих колебаний  $T_k$ .

2. Вычисляют и устанавливают близкие к оптимальным значения настраиваемых параметров:

П-регулятор:  $K = 0,5 \cdot K_{\max}$  ;

ПИ-регулятор:  $K = 0,45 \cdot K_{\max}$  ;  $K_u = 1,4 \cdot \frac{K_{\max}}{T_k}$  ;

ПИД-регулятор:  $K = 0,6 \cdot K_{\max}$  ;  $K_u = 1,2 \cdot \frac{K_{\max}}{T_k}$  ;  $K_d = 0,075 \cdot K_{\max} \cdot T_k$  .

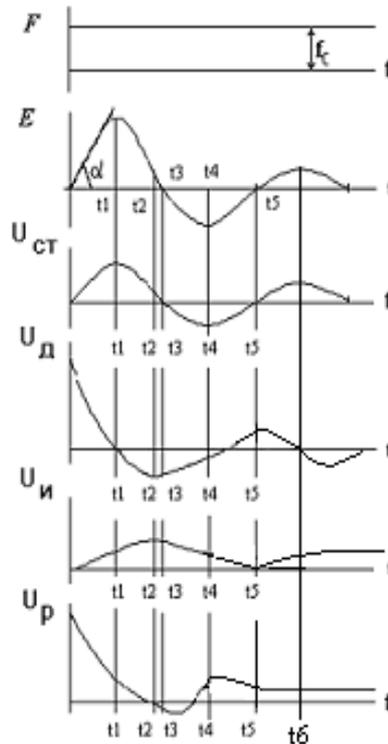


Рисунок 4. Переходные процессы и их составляющие в системе с ПИД- регулированием.

Второй способ:

Если по каким-либо причинам запрещается работа АСР в режиме незатухающих колебаний или этот режим не достигается, то используется второй способ настройки, при котором увеличением коэффициента усиления  $K$  добиваются приемлемой колебательности процесса отработки скачкообразных воздействий (порядка 10 колебаний), измеряют период затухающих колебаний  $T_3$  и снимают достигнутое значение коэффициента усиления  $K'$ . Оптимальная настройка коэффициентов  $K_d$  и  $K_u$  в этом случае определяется выражениями

$$K_d = 0,167 \cdot K' \cdot T_3 ; K_u = 0,5 \cdot \frac{K'}{T_3}$$

После установки на регуляторе значений  $K_d$  и  $K_u$  осуществляется корректировка  $K$  путем снижения его от величины  $K'$  до значения, при котором перерегулирование и колебательность не будут превышать заданных значений.

### 3. Описание установки

Принципиальная электрическая схема установки и ее описание приведены в Приложении.

### 4. Порядок выполнения работы

4.1 Снять переходные характеристики системы с П-регулятором при различных  $K$ .

Для этого:

- АЦП1 подключить параллельно вольтметру PV3 (сигнальный провод (штекер) подключается к точке Д, общий (провод) – к точке Е),
- АЦП2 подключить к выходу регулятора (подсоединяется только общий провод к точке С),
- систему замкнуть (переключатель S9 установить в положение "1"),
- установить перемычку между клеммами А и В,
- ключами S3 и S4 набрать П-регулятор,
- установив переключатель S10 в положение "1", подать питание на стенд и с помощью потенциометра R7 установить требуемое значение частоты вращения,
- установить переключатель S10 в положение "0", а переключатель S11 – К("2"),
- запустить программу DATAVIEW.EXE, произвести настройку программы для подачи задающего ступенчатого воздействия. Для этого в верхней строке меню выбрать пункт "Настройки", "Подача возмущения". Для подачи задающего воздействия необходимо в данном пункте установить  $T1=0$ ,
- снять переходные характеристики системы при различных  $K$  не меняя структуры регулятора и определить показатели качества переходного процесса,
- сделать вывод о влиянии коэффициента передачи на динамические свойства АСР.

4.2 Снять переходные характеристики системы при одном значении  $K$ , но при разных структурах регулятора.

Для этого:

- не меняя настроек программы и подключения АЦП, с помощью ключей S3 и S4 набрать различные структуры регулятора (П, ПД, ПИ, ПИД),
- для каждого типа регулятора снять переходные характеристики системы и по ним определить показатели качества системы,
- сделать вывод о влиянии структуры регулятора на показатели качества переходного процесса.

4.3 Исследовать влияние структуры регулятора на показатели качества переходного процесса системы по возмущению

Для этого:

- ключ S11 переключить в положение К("1"), S10 – в положение "1" (двигатель должен вращаться)

- ключ S8 переключить в положение "1", с помощью R5 установить заданную преподавателем величину возмущающего воздействия,
- в программе DATAVIEW в пункте "Подача возмущений" установить  $T1=1$ ,  $T2=2$  (с учетом того, что  $T_{max}=3$ )
- снять для каждого типа регулятора кривые переходного процесса системы по возмущающему воздействию,
- сделать выводы.

## 5. Содержание отчета:

- 5.1 Графики переходного процесса системы по задающему воздействию при П-регуляторе и различных К.
- 5.2 Графики переходного процесса по задающему воздействию при одном К и различных структурах регулятора.
- 5.3 Графики переходного процесса по возмущающему воздействию с различными регуляторами.
- 5.4 Выводы.

## 6. Вопросы для самопроверки

- 6.1. Что называется динамическим режимом работы АСР?
- 6.2. Что такое устойчивость АСР?
- 6.3. Что является причиной возникновения неустойчивого режима работы АСР?
- 6.4. Какие требования предъявляются к АСР в динамическом режиме?
- 6.5. Какие типы типовых воздействий Вы знаете?
- 6.6. Какими показателями качества характеризуется переходный процесс АСР, и как они определяются?
- 6.7. Нарисовать принципиальную электрическую схему П-, ПИ-, ПД-, ПИД- регулятора.
- 6.8. Для чего при снятии переходных характеристик по задающему воздействию размыкается ключ S10?
- 6.9. Какие требования предъявляются к АСР в динамическом режиме?
- 6.10. Чем определяется устойчивость АСР?
- 6.11. Какие типовые законы регулирования Вы знаете?
- 6.12. Как влияет на переходный процесс введение производной в закон регулирования?
- 6.13. Как влияет на переходный процесс введение интеграла в закон регулирования, и с какой целью он вводится?
- 6.14. Какими параметрами характеризуется дифференцирующая и интегрирующая составляющие закона регулирования?
- 6.15. Почему в качестве главной обратной связи нельзя включать гибкую связь?
- 6.16. Как влияет на показатели качества переходного процесса данной АСР гибкая обратная связь по напряжению ЭМУ?
- 6.17. Как осуществляется настройка регулятора имеющего определенную структуру?

### **Литература:**

1. Власенко А.А., Стражмейстер В.А. Судовая электроавтоматика. М.: Транспорт, 1983.- С. 145-163.
2. Прохоренков А.М., Солодов В.С., Татьянченко Ю.Г. Судовая автоматика. - М.: Колос 1992.- 448 с.
3. Кринецкий И.И. Судовая автоматика М.: Пищ. пр-сть, 1978.- 438 с.
4. Иващенко Н.Н. Автоматическое регулирование.- М.: Машиностроительное, 1973.- 606 с.
5. Ключев А.С. Автоматическое регулирование. - М.: Высшая школа, 1986.-351 с.
6. Кузьмин А.В., Схиртладзе А.Г. Анализ и синтез автоматического управления. – Ульяновск.:2000.

## **НАСТРОЙКА АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ПОМОЩЬЮ ПАССИВНЫХ КОРРЕКТИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ.**

### **1. Цели работы:**

Исследование влияния корректирующих устройств на динамические свойства АСР, экспериментальное определение параметров корректирующего устройства для обеспечения заданных показателей качества АСР.

### **2. Теоретические сведения**

Известно, что повышение точности системы регулирования достигается увеличением коэффициента усиления. В то же время его величина, исходя из устойчивости, ограничивается значениями параметров системы. В связи с этим возникает необходимость введения в систему управления дополнительных устройств, обеспечивающих устойчивую работу АСР. Дополнительные устройства позволяют изменять соотношения постоянных времени звеньев, что приводит увеличить значения коэффициента усиления и улучшить качество переходного процесса.

Обеспечение устойчивой и качественной работы системы управления с помощью дополнительных устройств есть коррекция, а сами устройства называются корректирующими.

Коррекция системы может осуществляться различными способами. Наиболее широкое распространение получили дополнительные обратные связи, охватывающие одно или несколько звеньев (параллельные корректирующие цепи), и последовательные корректирующие устройства.

Охват звена обратной связи приводит к изменению передаточной функции этого звена и системы в целом.

Различают жесткую и гибкую обратные связи. В некоторых случаях обратная связь может обладать свойствами жесткой и гибкой обратных связей. Жесткая обратная связь изменяет и динамические, и статические свойства системы, так как действует и в переходном, и в установившемся режимах работы.

Гибкая обратная связь действует только в переходном режиме и на статические свойства системы не влияет.

При гибкой обратной связи происходит только дифференцирование сигнала входной переменной. В простейшем случае звено гибкой обратной связи  $W_{oc}(p)$  на структурной схеме может быть представлено в виде идеального или реального дифференцирующего звена (по первой производной):

$$W_{oc}(p) = \tau \cdot p$$

$$W_{oc}(p) = \frac{\tau \cdot p}{T \cdot p + 1}$$

При охвате гибкой обратной связью безынерционного звена изменяется структура звена (получается инерционное звено 1-го порядка).

Часто для получения заданных показателей качества переходного процесса достаточно эффективным оказывается введение в систему последовательных корректирующих устройств (ПКУ).

В электрических АСР ПКУ, как правило, представляют собой четырехполюсники. Последовательные корректирующие устройства могут применяться в схемах как самостоятельно, так и в сочетании с параллельным корректирующим устройством. Во многих случаях в цепях постоянного тока используются пассивные четырехполюсники, составленные из емкостей и омических сопротивлений (контур RC). Их основными преимуществами являются простота изготовления и дешевизна, возможность использования стандартных деталей, легкость замены отдельных элементов и отсутствие подвижных частей. Примерами таких четырехполюсников могут служить:

1. Дифференцирующее звено с заданной зоной дифференцирования представлено на рисунке 5.

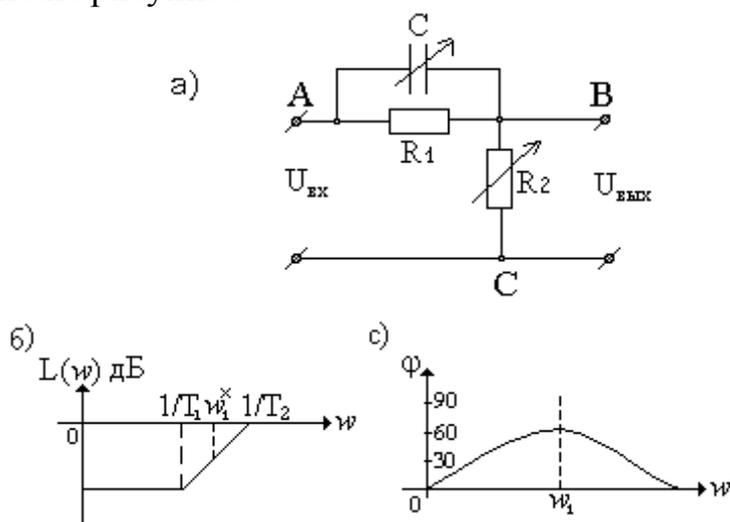


Рисунок 5. Дифференцирующее звено с заданной зоной дифференцирования: а - принципиальная схема; б - ЛАЧХ и ФЧХ.

Его передаточная функция:

$$W(p) = \frac{U_{вых}(p)}{U_{вх}(p)} = K_0 \frac{T_1 p + 1}{T_2 p + 1}$$

где

$$T_1 = R_1 \cdot C$$

$$T_2 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \cdot C$$

$$K_0 = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Как видно из рисунка 5,б фазочастотная характеристика дает опережающий сдвиг в зоне восходящей части ЛАЧХ с максимумом, приходящимся на середину наклонной части ЛАЧХ звена.

2. Интегрирующее звено с заданной зоной интегрирования представлено на рисунке 6.

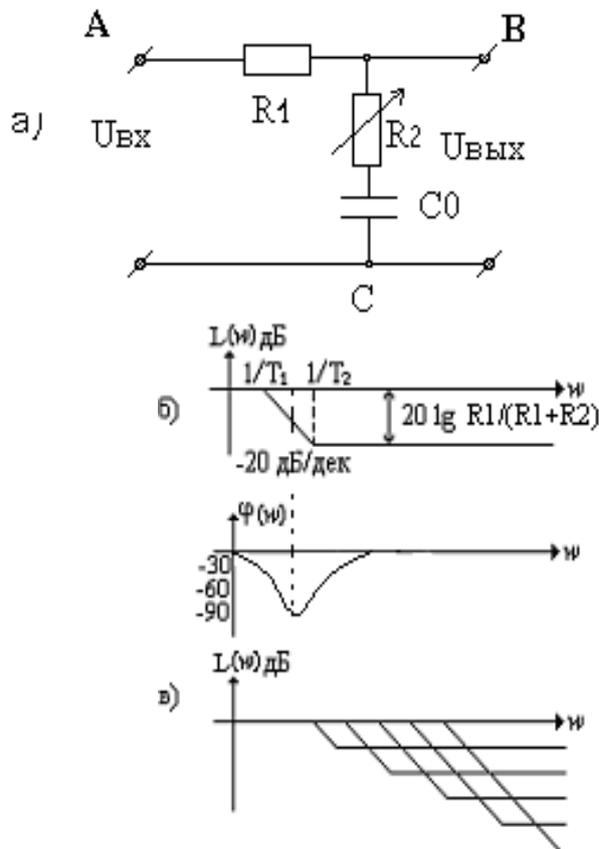


Рисунок 6. Интегрирующее звено с заданной зоной интегрирования:

а - принципиальная схема; б - ЛАЧХ и ФЧХ;

в - ЛАЧХ при изменении  $R_2$

Передаточная функция звена: 
$$W(p) = \frac{T_2 p + 1}{T_1 p + 1},$$

где  $T_2 = R_2 \cdot C$ ;  $T_1 = (R_1 + R_2) \cdot C$ .

Из рис. 6(в) видно, что при увеличении  $R_2$  изменяются постоянные времени  $T_1$  и  $T_2$ , что вызывает смещение характеристик в область меньших частот.

3. Интегро-дифференцирующая RC-цепь приведена на рисунке 7.

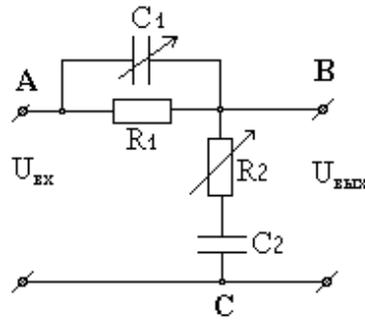


Рисунок 7. Принципиальная схема интегро-дифференцирующего звена.  
Передаточная функция звена

$$W(p) = \frac{T_1 T_2 p^2 + (T_1 + T_2)p + 1}{T_1 T_2 p^2 + \left[ T_1 \left( 1 + \frac{R_1}{R_2} \right) + T_2 \right] p + 1}$$

где

$$T_1 = R_1 C_1; \quad T_2 = R_2 C_2$$

Средний участок имеет нулевой наклон при значении передаточного коэффициента

$$W(p) = \frac{T_1 + T_2}{T_1 \left( 1 + \frac{R_1}{R_2} \right) + 1}, \text{ при } T_1 > T_2.$$

ЛАЧХ и ФЧХ интегрально-дифференцирующего звена приведены на рисунке 8.

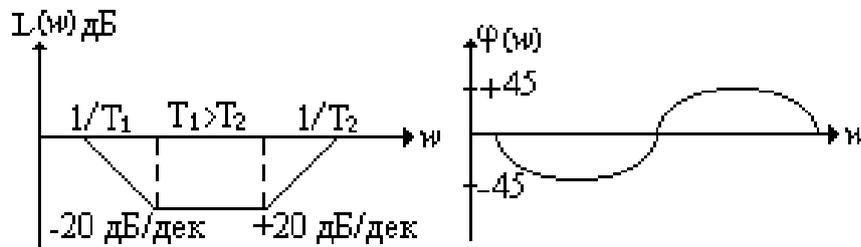


Рисунок 8. ЛАЧХ и ФЧХ интегро-дифференцирующего звена.

Такое интегрально-дифференцирующее звено часто используется для корректирования частотной характеристики АСР в определенной зоне частот.

### 3. Описание установки

Принципиальная электрическая схема установки и ее описание даны в приложении.

В данной работе для коррекции системы используется последовательное корректирующее устройство, элементы которого расположены в правой стороне лабораторного стенда

С помощью этих элементов можно набрать любую схему корректирующего устройства:

- дифференцирующее звено с заданной зоной дифференцирования;

- интегрирующее звено с заданной зоной интегрирования;
- интегро-дифференцирующее звено.

Параметры этих звеньев, постоянные времена коэффициенты передачи могут изменяться путем увеличения или уменьшения емкости конденсатора  $C$  и сопротивления резистора  $R$  специальными переключателями  $S_{12}$  и  $S_{13}$  с шагом 1 мкФ и 1 кОм соответственно.

#### 4. Порядок выполнения работы

1. Набрать ПИ-регулятор с определенным коэффициентом усиления.
2. Замкнуть систему (перевести ключ  $S_9$  в положение "2").
3. Выключить ключ  $S_{10}$ , а ключ  $S_{11}$  перевести в положение 2.
4. Замкнуть клеммы А и В.
5. Подключить АЦП к стенду (АЦП1 подключить параллельно вольтметру PV3 (сигнальный провод (штекер) подключается к точке Д, общий (провод) – к точке Е), АЦП2 подключить к выходу регулятора (подсоединяется только общий провод к точке С)). Подать питание на стенд.
6. Запустить программу DATAVIEW, произвести настройку программы для подачи задающего ступенчатого воздействия.
7. Снять переходную характеристику системы с ПИ-регулятором без корректирующего устройства.
8. Выключить систему и, набрав дифференцирующее звено с регулируемой емкостью из элементов корректирующего устройства, подключить его последовательно перед регулятором (точки подключения указаны на рисунке 5,а).
9. Изменяя параметры корректирующего устройства, добиться заданных преподавателем показателей качества переходного процесса.
10. Сделать вывод о влиянии величины емкости с корректирующего устройства на показатели качества регулирования.
11. Пп. 9-10 повторить для интегрирующего и интегрально-дифференцирующего звеньев.

#### 5. Содержание отчета

- 5.1. Схемы последовательных корректирующих устройств, исследуемых в работе.
- 5.2. Кривые переходных процессов нескорректированной и скорректированной систем.
- 5.3. Рассчитанные показатели качества нескорректированной и скорректированной систем.

#### 6. Вопросы для самоконтроля

- 6.1. Почему возникает необходимость в коррекции АСР?
- 6.2. Какие требования предъявляются к АСР?
- 6.3. На основании каких данных строится желаемая ЛАЧХ?

6.4. Назовите основные этапы определения типа и параметров параллельного корректирующего устройства.

6.5. Какие существуют рекомендации о месте включения параллельного корректирующего устройства в схеме АСР?

6.6. Назовите основные достоинства и недостатки параллельной коррекции.

6.7. Какие допущения обычно принимаются при расчете параллельных корректирующих устройств по методу ЛАЧХ? С какой целью принимаются эти допущения?

6.8. Назовите основные этапы определения типа и параметров последовательного корректирующего устройства при пользовании ЛАЧХ.

6.9. Назовите основные достоинства и недостатки последовательного корректирующего устройства.

6.10. Какие существуют рекомендации о месте включения последовательного корректирующего устройства в схеме АСР?

6.11. Объясните, почему ЛАЧХ интегрально-дифференцирующего корректирующего звена на низкочастотном и высокочастотном участках имеют нулевой наклон.

### Литература

1. Власенко А.А., Стражмейстер В.А. Судовая электроавтоматика. М.: Транспорт, 1983.- С. 145-163.
2. Прохоренков А.М., Солодов В.С., Татьянченко Ю.Г. Судовая автоматика. - М.: Колос 1992.- 448 с.
3. Кринецкий И.И. Судовая автоматика М.: Пищ. пр-сть, 1978.- 438 с.
4. Иващенко Н.Н. Автоматическое регулирование.- М.: Машиностроительное, 1973.- 606 с.
5. Клюев А.С. Автоматическое регулирование. - М.: Высшая школа, 1986.-351 с.
6. Кузьмин А.В., Схиртладзе А.Г. Анализ и синтез автоматического управления. – Ульяновск.:2000.
7. Клюев А.С., Таланов В.Д., Демин А.М. Проектирование систем автоматизации.// Под. ред. А.С. Клюева.- М.: Фирма «Испо-Сервис», 2000.- 128с ил.
8. Клюев А.С., Кочетков Е.А. Автоматическое управление линейными системами.// Под. ред. А.С. Клюева.- М.: Фирма «Испо-Сервис», 1999.- 192с ил.

### ПРИЛОЖЕНИЕ

Принципиальная схема установки АСР частоты вращения двигателя постоянного тока приведена на рисунке 9.

Лабораторная установка представляет собой автоматическую систему стабилизации частоты вращения двигателя постоянного тока.

Объектом регулирования является двигатель постоянного тока М2, регулируемым параметром – частота вращения двигателя.

Основным возмущающим воздействием, действующим на объект, является момент сопротивления вращению двигателя, создаваемый генератором G2, вал которого соединен с валом двигателя. Величина возмущающего воздействия

зависит от тока нагрузки генератора, который регулируется потенциометром R5.

Чувствительным элементом, реагирующим на отклонение частоты вращения двигателя, является тахогенератор G3.

Задающим элементом является потенциометр R7, на который поступает опорное напряжение от блока питания БП  $\pm 12$  В.

В качестве исполнительного элемента служит электромашинный усилитель G1. Усилительным элементом является усилитель постоянного тока УПТ, коэффициент которого регулируется потенциометром R1.

Элемент G3 образует главную обратную связь по частоте вращения двигателя постоянного тока.

В данной АСР имеется местная обратная связь, которая представляет собой отрицательную гибкую обратную связь по напряжению на якоре ЭМУ G1 и образована RC-цепью, состоящей из конденсатора C3, резистора R4 и потенциометра R3. Подключение местной обратной связи осуществляется ключом S7.

На базе УПТ с помощью ключей S3 и S5 можно набрать пропорциональное, интегрирующее и дифференцирующие звенья. Это позволяет реализовать пропорциональный (П), пропорционально-интегрирующий (ПИ), пропорционально-дифференцирующий (ПД), пропорционально-интегро-дифференцирующий (ПИД) законы регулирования. Для включения в закон регулирования И-составляющей необходимо ключ S3 перевести в положение "1", Д-составляющей – ключ S5 перевести в положение "1".

В схеме установки предусмотрено включение последовательного корректирующего устройства (ПКУ), элементы которого предоставлены в правой части стенда и подключаются к АСР через клеммы А, В, С.

Блок питания БП обеспечивает питанием (постоянным стабилизированным напряжением) обмотки возбуждения двигателя, генератора и тахогенератора, задающего устройства и УПТ.

На стенде установки имеется ряд ключей и переключателей, которые позволяют:

- S2 - включить приводной двигатель M1 ЭМУ и подать питание на БП;
- S3 и S5 – реализовать определенный тип регулятора;
- S7 – подключить местную гибкую обратную связь по напряжению ЭМУ;
- S6 – изменить коэффициент местной обратной связи;
- S8 – подключить возмущающее воздействие;
- S9 – подключить главную обратную связь (замкнуть систему) или отключить ее (разомкнуть систему);
- S10 – обеспечить питание задающего элемента R7 с БП;
- S11 – исследовать переходные процессы системы по задающему и возмущающему воздействию путем подачи ступенчатого сигнала на задающий элемент R7 или на объект управления M2 через контакты реле К.2 и К.1, встроенного в стенд;
- S12 и S13 – изменить величину емкости С и сопротивления R элементов корректирующего устройства.



Необходимые для выполнения работы параметры (вход-выход отдельных элементов и системы) контролируются приборами:

pV1 – измеряет выходную величину напряжения УПТ (на выходе ОУ ЭМУ);

pV2 – измеряет выходную величину напряжения на якоре ЭМУ (на входе M2);

pV3 – измеряет скорость двигателя постоянного тока M2;

pV4 - измеряет абсолютную величину ошибки регулирования замкнутой системы;

pV5 – контролирует величину задающего воздействия;

pA1 – контролирует величину возмущающего воздействия.

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ СНЯТИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АСР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММЫ DATAVIEW.**

Лабораторный стенд для снятия переходных характеристик АСР с использованием программы DATAVIEW представляет собой программно-аппаратный комплекс. Используется для изучения переходных процессов и влияния на них типовых законов регулирования.

Аппаратная часть представлена персональным компьютером и платой ввода-вывода (ВВ). Плата ВВ имеет в своем составе аналогово-цифровой преобразователь (АЦП), усилитель, аналоговый коммутатор, программируемый интервальный таймер, генератор импульсов 2 МГц и блок ввода-вывода дискретных сигналов типа ТТЛ. Плата ВВ подключается к шине ISA компьютера. Имеет 8 дифференциальных каналов, которые коммутируются на один 12 разрядный АЦП. Для усиления сигнала перед АЦП сигнал поступает на усилитель с программируемым коэффициентом усиления, увеличивая точность преобразования малых сигналов. Преобразованный цифровой сигнал передается в ПЭВМ.

Программная часть представляет собой программу работающую непосредственно с платой ввода-вывода. Программа организует снятие данных и представление их в графическом виде на экране компьютера с возможностью вывода результатов на принтер. Работу программы можно условно разделить на два этапа:

- снятие данных,
- представление в графическом виде.

Программа позволяет отобразить четыре переходных процесса на экране для сравнения друг с другом.

Максимальное количество элементов массива равно 7000, что должно учитываться при выборе времени снятия переходного процесса и шага квантования. Их отношение определяет число выборок и не должно превышать 7000.

### **Описание интерфейса программы**

Настройка и управление программой осуществляется с помощью Turbo-Vision подобного интерфейса. При запуске программы открывается окно крат-

ких сведений о программе, для закрытия которого необходимо нажать клавишу ESC. Далее пользователь попадает в основное окно программы.

Строка меню расположена в верхней части основного экрана и представляет собой список возможных режимов работы программы с указанием "горячих" клавиш, если таковые предусмотрены. Внизу экрана располагается строка статуса, дающая минимальный набор сведений о выбранном режиме работы. Все оставшееся место является рабочей областью, на которой располагаются выбранные окна. Меню вызывается нажатием клавиши <F10>, выход из программы осуществляется нажатием клавиш <Alt+X> (здесь и в дальнейшем знак "+" означает, что требуется одновременное нажатие клавиш).

Рассмотрим подробнее назначение пунктов основного меню.

### **"Помощь"**

При выборе данного пункта на экран выводится окно справки. Выбор данного пункта дублируется нажатием клавиши <F1>.

### **"Файл"**

Содержит команды сохранения, загрузки и выхода из программы.

- "Считать" или <F3> - позволяет открыть файл с диска с ранее сохраненными данными переходных процессов и контекстом программы. Т.е. программа переводится в то состояние в котором находилась на момент сохранения. После выбора команды появляется окно диалога, в котором пользователь уточняет имя файла и путь к нему на диске. В окне можно ввести имя файла целиком или выбрать его из предложенного списка. По умолчанию в списке отображаются только каталоги и файлы с расширением \*.san .

- "Сохранить" или <F2> - позволяет сохранить в файле массивы данных переходных процессов и контекст программы.

- "Выход" или <Alt + X> - выйти из программы в систему.

### **"Работа"**

Содержит команды выбора режимов работы программы.

- "Режим осциллографа с памятью" или <F5> - при выборе этого пункта осуществляется переход в графический режим для снятия переходных характеристик.

В графическом режиме на экране отображается координатная сетка, масштаб которой определяется настройками в главном меню. Программа позволяет отображать сразу четыре массива данных (в виде графиков) на экране, пересылка данных из АЦП осуществляется в один из четырёх массивов, а именно в тот массив, который выбран текущим.

Управление в графическом режиме реализуется непосредственно с клавиатуры:

Выбор текущего массива осуществляется клавишами <1>, <2>, <3>, <4>, которые соответствуют номеру массива. Номер текущего массива отображается в правом верхнем углу экрана.

<SPACE> - «пробел» осуществляется запуск процедуры снятия переходного процесса с длительностью и шагом квантования определёнными в настройках.

Для вывода полученных графиков на печать как черно-белое изображение необходимо подготовить графики к печати, для этого предназначена клавиша <F8>, при нажатии клавиши <F8> изображение перерисовывается в черно-белом цвете. После подготовки к печати необходимо нажать клавишу <Print Screen> для вывода на печать.

<ESC> - выход из графического режима, с сохранением полученных данных. При возвращении в текстовый режим данные сохраняются до изменения шага квантования, времени снятия переходного процесса или коэффициента усиления. Остальные настройки влияют только на отображение графиков.

### **" Настройки "**

Пункт меню содержит команды изменения параметров работы программы и состоит из подпунктов:

1. Режим усиления
2. Режим отображения
3. Диапазон отображения
4. Фильтр
5. Шаг квантования
6. Подача воздействия

При выборе одного из подпунктов открывается соответствующее окно. Рассмотрим каждый подпункт отдельно.

1. Пункт *"Режим усиления"* предназначен для изменения коэффициента усиления предварительного усилителя на плате ввода вывода. И имеет следующие возможные значения:

$K=1$  максимальный диапазон напряжения  $\pm 5$  В,  $K=2$  максимальный диапазон напряжения  $\pm 2.5$  В,  $K=4$  максимальный диапазон напряжения  $\pm 1.25$  В,  $K=8$  максимальный диапазон напряжения  $\pm 0.625$  В, Изменение этого параметра влечет за собой обнуление массивов данных, т.к. изменение коэффициента усиления для текущего графика ведет к некорректному отображению остальных графиков. По этому коэффициент усиления необходимо выбирать общий для всех графиков и не менять в процессе работы.

2. Пункт *"Режим отображения"* предназначен для изменения способа отображения графика: график может быть представлен точками или линиями, которые соединяют эти точки. В этом пункте пользователь имеет возможность включить или отключить отображение маркеров, а также изменить их размер и шаг между ними. Маркеры предназначены для идентификации каждого из графиков при выводе на печать как черно-белое изображения. Для каждого графика маркер имеет соответствующую форму.

3. Пункт *"Диапазон отображения"* предназначен для изменения масштаба изображения, так называемый «ZOOM». Для этого мы вводим значения границ изображения по оси напряжения и оси времени. Все изменения в данном под-

пункте не влияют на массив снятых значений переходного процесса, а изменяют только представление на экране.

4. Пункт "*Фильтр*" предназначен для установки глубины цифрового "фильтра Изермана" и изменяется от 0 до 9.

Глубина фильтра равная нулю означает, что фильтр отключен. Фильтр необходимо включать для "фильтрации" помех. Однако при большой глубине фильтр вносит большие динамические искажения. Рекомендуемая глубина от 3 до 6.

5. Пункт "*Шаг квантования*" предназначен для задания основных параметров снятия характеристик:

5.1 Шага квантования.

5.2 Времени снятия переходного процесса.

Значение шага квантования по времени определяет интервал времени, через который будут сниматься значения переходного процесса. При изменении любого из параметров все массивы данных обнуляются. Эти два параметра определяют количество выборок, которое не должно превышать 7000, т.е. ***отношение времени снятия переходного процесса к шагу квантования должно быть меньше 7000.***

6. Пункт "*Подача воздействия*" предназначен для включения задающего или возмущающего воздействия, что определяется положением тумблеров на установке. Для подачи воздействия необходимо установить время подачи и снятия воздействия отсчитываемое в секундах с начала переходного процесса.

Например, для получения графика переходного процесса по задающему воздействию при одном  $K_p$  и различных структурах регулятора, настраиваем программу следующим образом:

1. Пункт "*Режим усиления*":  $K=1$
2. Пункт "*Режим отображения*": включаем отображение маркеров (для идентификации каждого из графиков при выводе на печать как черно-белое изображение)
3. Пункт "*Диапазон отображения*": диапазон по оси напряжения –  $U_{max}=1,6$ ;  $U_{min}=0$
4.  $T_{max}=3$ ;  $T_{min}=0$
5. Пункт "*Фильтр*": отключаем
6. Пункт "*Шаг квантования*": устанавливаем "Шаг квантования" = 0,02
7. "Время переходного процесса" = 3
8. Пункт "*Подача возмущения*": устанавливаем  $T1=0$ ,  $T2=3$

Настроив таким образом программу, запускаем осциллограф (функциональная клавиша F5). Меняя структуру регулятора, получаем графики переходных процессов. Полученные кривые приведены на рисунке 10.

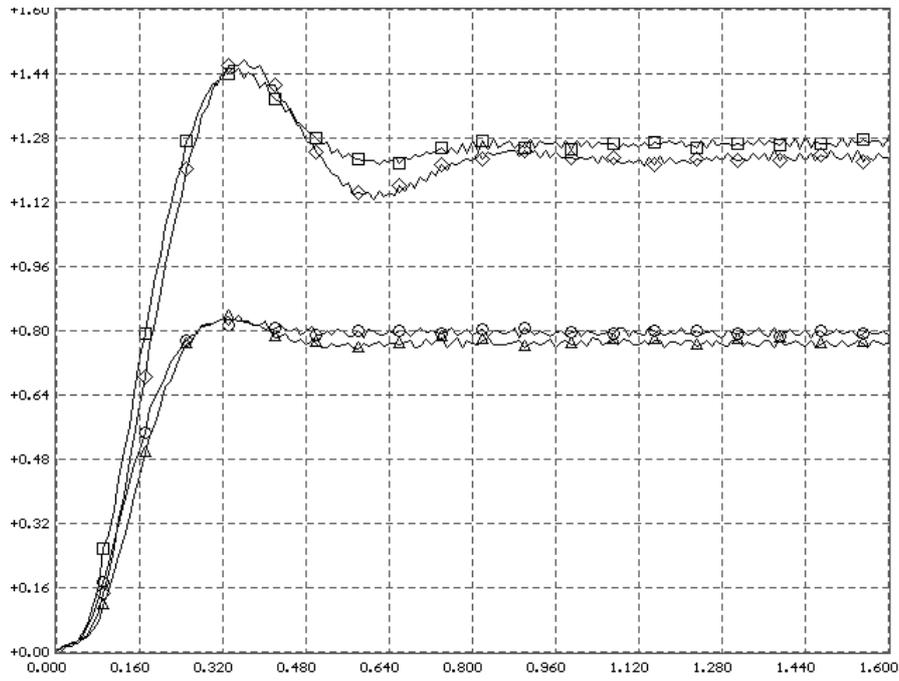


Рисунок 10. Кривые переходных процессов системы по задающему воздействию при различных структурах регулятора

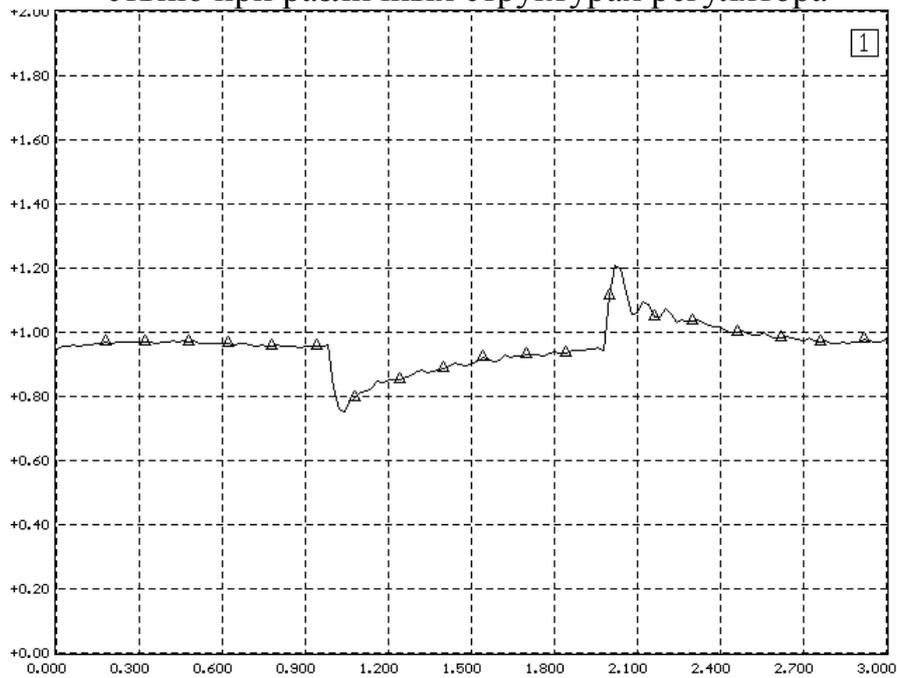


Рисунок 11. Кривая переходного процесса системы по возмущающему воздействию при ПИД структуре регулятора.

**Содержание.**

*Исследование динамических свойств АСР скорости двигателя постоянного тока.*

- |    |                           |      |
|----|---------------------------|------|
| 1. | Цель работы               | стр. |
| 2. | Теоретические сведения    | стр. |
| 3. | Описание установки        | стр. |
| 4. | Порядок выполнения работы | стр. |
| 5. | Содержание отчета         | стр. |
| 6. | Вопросы для самопроверки  | стр. |

*Настройка АСР частоты вращения двигателя постоянного тока с помощью пассивных корректирующих устройств.*

- |    |                           |      |
|----|---------------------------|------|
| 1. | Цели работы               | стр. |
| 2. | Теоретические сведения    | стр. |
| 3. | Описание установки        | стр. |
| 4. | Порядок выполнения работы | стр. |
| 5. | Содержание отчета         | стр. |
| 6. | Вопросы для самоконтроля  | стр. |

*Приложение* стр.



