

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования

**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

**ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ**

Методические указания к выполнению лабораторной работы  
для студентов, обучающихся по направлениям  
210100 «Электроника и наноэлектроника»  
и 201000 «Биотехнические системы и технологии»

*Составитель* **О.С. Вадутов**

Издательство  
Томского политехнического университета  
2014

УДК 621.078

Оценки качества переходных процессов: метод. указания к выполнению лаб. работы для студентов, обучающихся по направлениям 210100 «Электроника и наноэлектроника» и 201000 «Биотехнические системы и технологии» / сост. О.С. Вадутов; Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 10 с.

Методические указания рассмотрены и рекомендованы к изданию методическим семинаром кафедры промышленной и медицинской электроники « 26 » марта 2012 года, протокол № 10.

Зав. кафедрой ПМЭ,  
доктор технических наук,  
профессор

\_\_\_\_\_ *Г.С. Евтушенко*

*Рецензент*

Кандидат технических наук  
доцент кафедры ПМЭ ТПУ  
*А.Ф. Глотов*

**Цель работы.** Целью лабораторной работы является изучение прямых и косвенных показателей, применяемых для оценки качества переходных процессов в системах автоматического регулирования, и исследование влияния параметров системы на эти показатели.

### 5.1. Прямые оценки качества переходных процессов

Прямыми оценками качества переходного процесса называют показатели, определяемые непосредственно по кривой переходного процесса. В подавляющем большинстве случаев прямые оценки вводят по реакции системы на единичное ступенчатое воздействие, то есть по переходной функции САР (рис. 5.1). Эти показатели характеризуют длительность и колебательность переходных процессов.

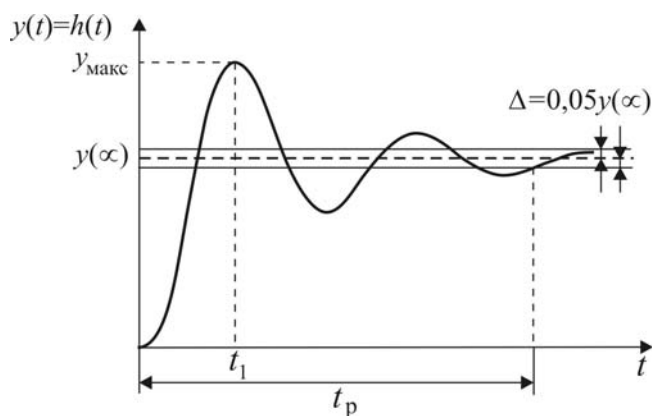


Рис. 5.1. Переходная функция системы

Для оценки длительности переходных процессов применяют следующие показатели: время достижения первого максимума  $t_1$ ; время регулирования  $t_p$ .

Смысл первого показателя не требует пояснения и очевиден из рис. 5.1. Временем регулирования  $t_p$  считают интервал времени от момента приложения внешнего воздействия до момента, после которого отклонения переходной функции от установившегося значения не превышают заданной величины  $\Delta$ :

$$|y(t) - y(\infty)| < \Delta \quad \text{при } t > t_p.$$

Обычно принимают  $\Delta = 0,05y(\infty)$ .

Колебательность переходной функции оценивают перерегулированием. Перерегулирование есть выраженная в процентах разность между

максимальным значением  $y_{\text{макс}}$  переходной функции и ее установившимся значением  $y(\infty)$ :

$$\sigma\% = \frac{y_{\text{макс}} - y(\infty)}{y(\infty)} \cdot 100\%.$$

Чем больше перерегулирование, тем больше колебательность процесса. У монотонного процесса  $y_{\text{макс}} = y(\infty)$ , и перерегулирование равно нулю.

## 5.2. Корневые оценки качества переходных процессов

Корневые оценки определяются по расположению полюсов (корней характеристического уравнения) системы на комплексной плоскости. К основным корневым оценкам относятся *степень устойчивости*  $\eta$  и *степень колебательности*  $\mu$  (рис. 5.2):

$$\eta = \min_i |\operatorname{Re} s_i|; \quad \mu = \max_i \left| \frac{\operatorname{Im} s_i}{\operatorname{Re} s_i} \right| = \operatorname{tg} \varphi.$$

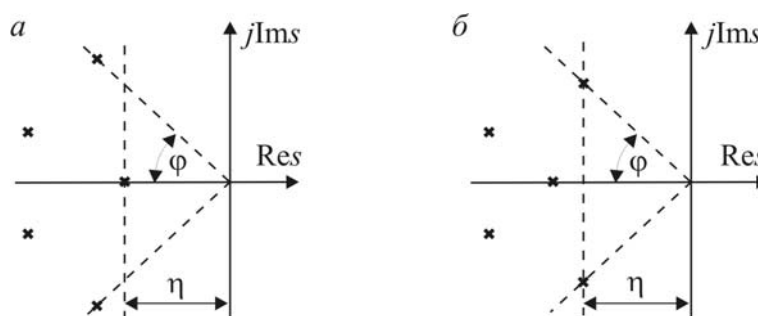


Рис.5.2. Определение степени устойчивости и степени колебательности

Степень устойчивости  $\eta$  является мерой длительности переходного процесса. Чем больше степень устойчивости, тем быстрее затухает процесс. Время регулирования при условии, что ближайший к мнимой оси вещественный полюс или ближайшая к мнимой оси пара комплексных полюсов являются доминирующими, оценивается по формуле

$$t_p \leq 3/\eta.$$

Степень колебательности  $\mu$  служит мерой колебательности переходного процесса. Если пара комплексных полюсов, которая определяет колебательность процесса, удовлетворяет условиям доминирования, то для оценки величины перерегулирования используется соотношение

$$\sigma\% \leq e^{-\pi/\mu} \cdot 100\%.$$

### 5.3. Частотные оценки качества переходных процессов

Частотные оценки определяются по частотным характеристикам разомкнутой системы, представленным в виде годографа АФЧХ  $W_p(j\omega)$  (рис. 5.3, а) или в виде логарифмических амплитудно-частотной  $L_p(\omega)$  и фазо-частотной  $\varphi_p(\omega)$  характеристик (рис. 5.3, б).

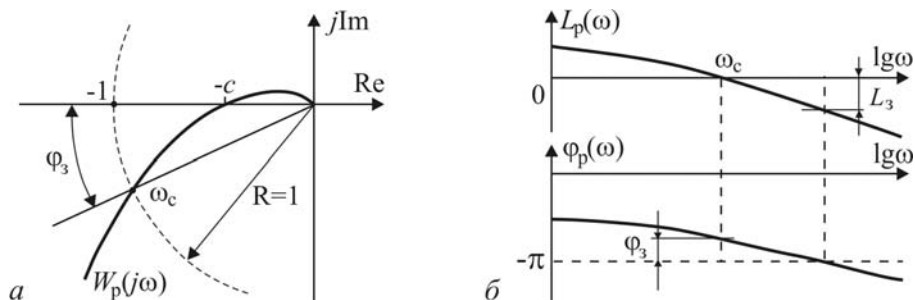


Рис. 5.3. Определение частоты среза  $\omega_c$  и запасов устойчивости:

а – с использованием АФЧХ; б – с использованием ЛЧХ

Частота среза  $\omega_c$ , определяемая из условия  $|W_p(j\omega_c)|=1$  или  $L_p(\omega_c)=0$ , служит оценкой ширины полосы частот, пропускаемых системой, и характеризует быстродействие системы. С увеличением частоты среза  $\omega_c$  уменьшается время регулирования.

Для оценки колебательности переходного процесса введены запасы устойчивости по модулю и по фазе. Запас устойчивости по модулю (коэффициенту усиления) определяется как отношение  $\sigma = 1/c$  (рис. 5.3, а). Наличие запаса устойчивости по модулю  $\sigma$  означает, что коэффициент усиления системы можно увеличить в  $\sigma$  раз.

Запас устойчивости по модулю может быть выражен в логарифмических единицах:

$$L_3 = 20 \lg \sigma = 20 \lg(1/c).$$

Запас устойчивости  $L_3$  показывает величину, на которую может быть поднята ЛАЧХ  $L_p(\omega)$  без нарушения условия устойчивости (рис. 5.3, б). Наличие запаса устойчивости по модулю  $L_3$  означает, что коэффициент усиления системы можно увеличить в  $10^{L_3/20}$  раз.

Запас устойчивости по фазе  $\varphi_3$  показывает, на какую величину может быть увеличено отставание по фазе без нарушения условия устойчивости системы (рис. 5.3). Легко видеть, что  $\varphi_3 = \pi + \arg W_p(j\omega_c)$ .

## 5.4. Интегральные оценки качества переходных процессов

Интегральные оценки, относящиеся к косвенным оценкам качества переходных процессов, представляют определенный интеграл вида:

$$J = \int_0^{\infty} \varphi(t) F[y_{\Pi}(t)] dt$$

где  $\varphi(t)$  – заранее заданная функция времени (функция веса),  $y_{\Pi}(t)$  – составляющая переходного процесса, удовлетворяющая условию

$$\lim_{t \rightarrow \infty} y_{\Pi}(t) = 0, \quad (5.1)$$

а функция  $F$  такова, что  $F(0) = 0$ . В теории автоматического управления применяются модульные и квадратичные интегральные оценки.

Модульная интегральная оценка определяется выражением

$$J_M = \int_0^{\infty} t^m |y_{\Pi}(t)| dt.$$

При  $m = 0$  модульная интегральная оценка равна абсолютной сумме всех площадей под кривой  $y_{\Pi}(t)$  (рис. 5.4, а). До недавнего времени эта оценка практически не применялись из-за трудностей анализа, связанных с тем, что подынтегральная функция является разрывной. С появлением специализированных систем программирования появилась возможность вычислять оценку с помощью численных методов.

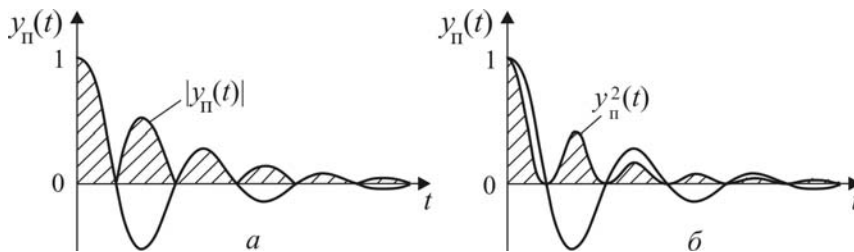


Рис. 5.4. Геометрический смысл интегральных оценок

Простейшая квадратичная интегральная оценка

$$J_0 = \int_0^{\infty} y_{\Pi}^2(t) dt$$

численно равна площади под кривой  $y_{\Pi}^2(t)$  (рис. 5.4, б). Более сложная квадратичная интегральная оценка

$$J_1 = \int_0^{\infty} [y_{\Pi}^2(t) + \tau^2 \dot{y}_{\Pi}^2(t)] dt$$

учитывает производную  $\dot{y}_n(t)$  переходной составляющей. Квадратичные интегральные оценки могут быть вычислены аналитически.

В результате вычисления интегральной оценки для некоторой функции  $y_n(t)$  получается число, которое, будучи взято само по себе, практически ничего не говорит о качестве переходных процессов в системе. Интегральная оценка может выступать в качестве обобщенного показателя при сравнении двух и более вариантов реализации системы. Вариант, при котором значение интегральной оценки меньше, считается лучшим. Исходя из этого, интегральная оценка обычно используется на этапе выбора параметров регулятора. Значения параметров подбираются так, чтобы интегральная оценка была минимальной.

Однако в результате такого расчета можно получить неудовлетворительное качество переходных процессов. Объясняется это тем, что каждая из интегральных оценок имеет свои особенности, зависящие не только от подынтегральной функции оценки, но и от частных условий её применения: свойств системы и её назначения, вида входного воздействия и т.п. Другими словами, одна и та же оценка, будучи применена к разным системам, может дать разные результаты.

## 5.5. Выполнение лабораторной работы

### Методические указания

В лабораторной работе исследуется следящая система, операторно-структурная схема которой изображена на рис. 5.5, а.

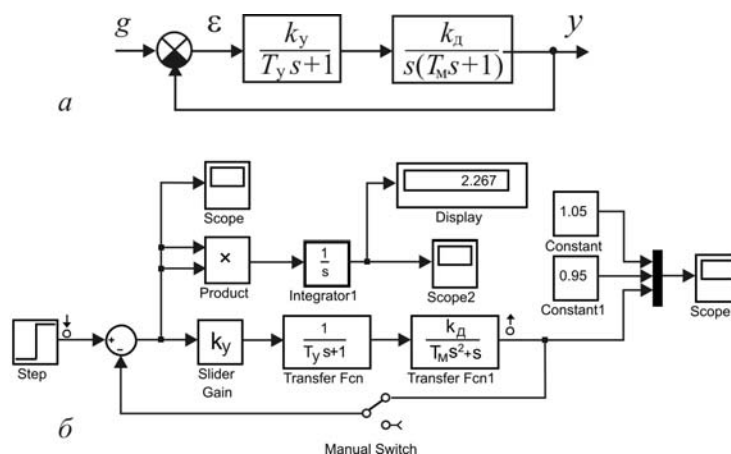


Рис. 5.5. Схемы следящей системы:

а – операторно-структурная схема; б – схема моделирования

Параметры системы, за исключением коэффициента усиления  $k_y$  электронного усилителя, задаются преподавателем. Значение  $k_y$  изме-

няется в пределах интервала  $[0, k_{\text{укр}}]$ , на котором система устойчива. Критическое значение  $k_{\text{укр}}$ , соответствующее колебательной границе, может быть найдено с помощью критерия Гурвица:

$$k_{\text{укр}} = \frac{T_y + T_m}{T_y T_m k_d}. \quad (5.2)$$

На рис. 5.5, б приведена схема моделирования следящей системы со средствами наблюдения результатов исследования. Ручной переключатель **Manual Switch** предназначен для размыкания цепи обратной связи при определении частотных оценок качества, использующих частотные характеристики разомкнутой системы.

Цепь **Product+Integrator1+(Display+Scope2)** позволяет пронаблюдать изменение интегральной оценки на экране **Scope2** и определить её численное значение на экране цифрового дисплея **Display**.

При помощи виртуального осциллографа **Scope** можно определить прямые оценки качества

Качество переходных процессов оценивается для 7–8 значений коэффициента передачи  $k_y$ , выбранных на интервале  $[0, k_{\text{укр}}]$ . Значения  $k_y$  рекомендуется выбрать в интервале  $[0, k_{\text{укр}}]$  неравномерно. В начальной части интервала выбранные значения надо расположить чаще.

**Примечание.** Значения параметров исследуемых в работе систем задаются преподавателем.

### Программа

1. Составить модель системы согласно схеме, изображенной на рис. 5.5, б, с заданными значениями  $k_d$ ,  $T_y$  и  $T_m$ .

2. Рассчитать по формуле (5.2) критическое значение  $k_{\text{укр}}$ , соответствующее колебательной границе устойчивости.

3. Определить время регулирования  $t_p$  и перерегулирование  $\sigma\%$  для выбранных значений коэффициента передачи  $k_y$ . Полученные данные занести в таблицу. По этим данным построить графики зависимостей  $t_p = t_p(k_y)$  и  $\sigma\% = \sigma\%(k_y)$ .

4. Определить степень устойчивости  $\eta$  и степень колебательности  $\mu$  для тех же значений коэффициента передачи  $k_y$ . Полученные данные занести в таблицу. По этим данным построить графики зависимостей  $\eta = \eta(k_y)$  и  $\mu = \mu(k_y)$ .



5. Определить частоту среза  $\omega_c$ , запасы устойчивости по амплитуде  $L_3$  и по фазе  $\varphi_3$  для тех же значений коэффициента передачи  $k_y$ . Полученные данные занести в таблицу. По этим данным построить графики зависимостей  $\omega_c = \omega_c(k_y)$ ,  $L_3 = L_3(k_y)$  и  $\varphi_3 = \varphi_3(k_y)$ .

**Примечание:** При определении частоты среза и запасов устойчивости необходимо разомкнуть систему.

6. Определить значения модульной интегральной оценки  $J_M$  для тех же значений коэффициента передачи  $k_y$ . Полученные данные занести в таблицу. По этим данным построить график зависимости  $J_M = J_M(k_y)$ . Определить значение  $k_y$ , при котором оценка минимальна.

7. Определить значения квадратичной интегральной оценки  $J_0$  для тех же значений коэффициента передачи  $k_y$ . Полученные данные занести в таблицу. По этим данным построить график зависимости  $J_0 = J_0(k_y)$ . Определить значение  $k_y$ , при котором оценка минимальна.

8. Выбрать по графикам  $t_p = t_p(k_y)$  и  $\sigma\% = \sigma\%(k_y)$  диапазон изменения коэффициента передачи  $k_y$ , которому соответствует удовлетворительное качество переходного процесса. Определить пределы изменения всех косвенных оценок в этом диапазоне.

9. Сделать выводы.

### 5.6. Контрольные вопросы и задания

1. Какие прямые показатели, кроме тех, которые рассмотрены в лабораторной работе ( $t_p$ ,  $\sigma\%$ ), используются для оценки переходной функции?

2. Поясните, почему функция  $y_n(t)$  должна удовлетворять условию (5.1).

3. Поясните смысл введения функции веса  $\varphi(t)$ , в частности  $\varphi(t) = t^m$ , в интегральные оценки.

4. Назовите основной недостаток квадратичной интегральной оценки  $J_0$ .

Учебное издание

## ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

**Методические указания  
к выполнению лабораторной работы**

*Составитель*

**ВАДУТОВ Олег Самигулович**

**Авторская редакция**

Подписано к печати . Формат 60×84/16. Бумага «Снегурочка».

Печать Херох. Усл.печ.л. 0,52. Уч.-изд.л. 0,47.

Заказ . Тираж экз.




Национальный исследовательский Томский политехнический университет

Система менеджмента качества

Томского политехнического университета сертифицирована  
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту ISO 9001:2008



ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Тел./факс: 8(3822)56-35-35, [www.tpu.ru](http://www.tpu.ru)