

## **ИНЖЕНЕРНАЯ МЕТОДИКА СИНТЕЗА РЕГУЛЯТОРОВ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ С МОДУЛЯЦИЕЙ СИГНАЛОВ МНОГОМЕРНО-ВРЕМЕННЫМ ОПЕРАТОРНЫМ МЕТОДОМ**

**В. И. ЛУКОВНИКОВ, А. В. КОЗЛОВ,  
В. А. САВЕЛЬЕВ, А. А. ТОЛСТЕНКОВ**

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

### **Введение**

Анализ замкнутых систем автоматического управления (САУ) с модуляцией сигналов многомерно-временным операторным методом показал, что аналитически получить многомерно-временную передаточную функцию для таких САУ не представляется возможным, так как в этом случае число независимых комплексных переменных  $p_1, p_2, \dots, p_n$  стремится к бесконечности [1]. По этой причине аналитический синтез регуляторов в подобных САУ представляет значительные трудности и без ряда допущений, накладываемых в процессе синтеза, попросту невозможен.

Наиболее простым и удобным методом синтеза регуляторов в таких САУ может быть метод перебора типовых регуляторов для нахождения оптимального с точки зрения получения желаемого переходного процесса, так называемый инженерный синтез.

Критериями такого подхода синтеза могут служить следующие положения:

1. Для обеспечения требуемого быстродействия системы в регуляторе должна происходить компенсация больших инерционностей.
2. Не должна быть потеряна точность в САУ как по управлению, так и по возмущению. Для этого в регуляторе желательно использовать интегрирующее звено и по возможности большой коэффициент усиления.
3. Оптимальный выбор несущей (модулирующей) частоты для обеспечения требуемых динамических показателей.

### **Постановка задачи и исходные данные**

Для реализации такого подхода синтеза регулятора рассмотрим типовую нескорректированную следящую систему с трактом «сельсины–демодулятор», функциональная схема которой приведена на рис. 1 [2]. Параметры САУ заимствованы там же.

Принцип работы следящей САУ следующий: измерительное устройство системы выполнено на сельсинах, работающих в трансформаторном режиме. Выходное напряжение сельсинов подается на демодулятор (блок С–Д). Сигнал выходного напряжения демодулятора  $U_1$  суммируется с напряжением гибкой обратной связи  $U_3$  и подается на регулятор (блок РЕГ). Далее сигнал поступает на электродвигатель постоянного тока с независимым возбуждением (блок ДПТ). Якорь двигателя через редуктор (блок Р) вращает якорь тахогенератора (блок ТГ) и ротор сельсин-приемника (блок С–Д). Напряжение тахогенератора  $U_{ТГ}$  подается на дифференцирующий контур обратной связи (блок RC), которая включается только во время переходного режима работы, когда происходит изменение скорости в САУ.

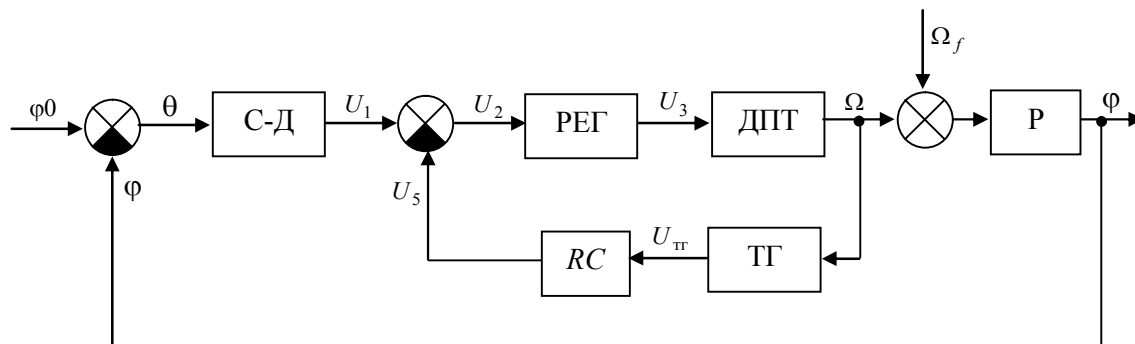


Рис. 1. Функциональная схема следящей системы с неизвестным регулятором РЕГ:

С-Д – тракт «сельсины–демодулятор»; РЕГ – искомый регулятор САУ;  
 ДПТ – электродвигатель постоянного тока; Р – редуктор; ТГ – тахогенератор с фильтром для подавления пульсаций на выходе; RC – дифференцирующее звено, выполняющее роль гибкой обратной связи в САУ

Задачу сформулируем следующим образом: требуется синтезировать регулятор для следящей САУ таким образом, чтобы отсутствовала статическая ошибка по управлению и возмущению, при этом быстродействие САУ нужно обеспечить на уровне  $t_{\text{пер}} \leq 0,1$  с при перерегулировании  $\sigma \leq 20\%$ . В процессе синтеза будем рассматривать режим отработки следящей системой скачкообразного задающего углового рассогласования  $\varphi_0 = 5^\circ$  и возмущающего сигнала по скорости ДПТ  $\Omega_f = -60 \frac{\text{град}}{\text{с}}$ .

Синтез регулятора будем проводить многомерно-временным операторным методом [1] в программной среде MATLAB SIMULINK 5, используя библиотеку многомерно-временных динамических звеньев [3], поэтому исходные параметры нескорректированной следящей системы определим уже для многомерной операторной области согласно структурной схеме на рис. 2:

– С-Д – связка «сельсины–демодулятор». Задаются параметры опорного сигнала модуляции и демодуляции. Передаточная функция между модулятором и демодулятором принимается равной 1;

– РЕГ – многомерная передаточная функция искомого регулятора РЕГ, равная 1 в нескорректированной САУ;

– ДПТ – многомерная передаточная функция двигателя постоянного тока.

Параметры ДПТ:  $K_{\text{дв}} = 118 \frac{\text{град}}{\text{В} \cdot \text{с}}$ ;  $T_{\text{дв}} = 0,106$  с [2].

$$W_{\text{ДПТ}}(p_1, p_2, p_3) = \frac{K_{\text{дв}}}{T_{\text{дв}}(p_1 + p_2 + p_3) + 1} = \frac{118}{0,106(p_1 + p_2 + p_3) + 1};$$

– Р – многомерная передаточная функция редуктора (интегрирующее звено):

$$W_{\text{Р}}(p_1, p_2, p_3) = \frac{1}{p_1 + p_2 + p_3};$$

– ТГ-RC – многомерная передаточная функция связки «тахогенератор–фильтр–дифференцирующее звено».

Параметры:  $K_{\text{ТГ}} = 1,8 \cdot 10^{-3} \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{град}}$ ;  $T_{\text{RC}} = T_{\phi} = 0,0175$  с [2].

$$W_{\text{ТГ-RC}}(p_1, p_2, p_3) = \frac{K_{\text{ТГ}} T_{\text{RC}} (p_1 + p_2 + p_3)}{T_{\phi} (p_1 + p_2 + p_3) + 1} = \frac{1,8 \cdot 10^{-3} \cdot 0,0175 (p_1 + p_2 + p_3)}{0,0175 (p_1 + p_2 + p_3) + 1};$$

– ASSOCIATION – звено ассоциации переменных. Передаточная функция принимается равной 1 [3].

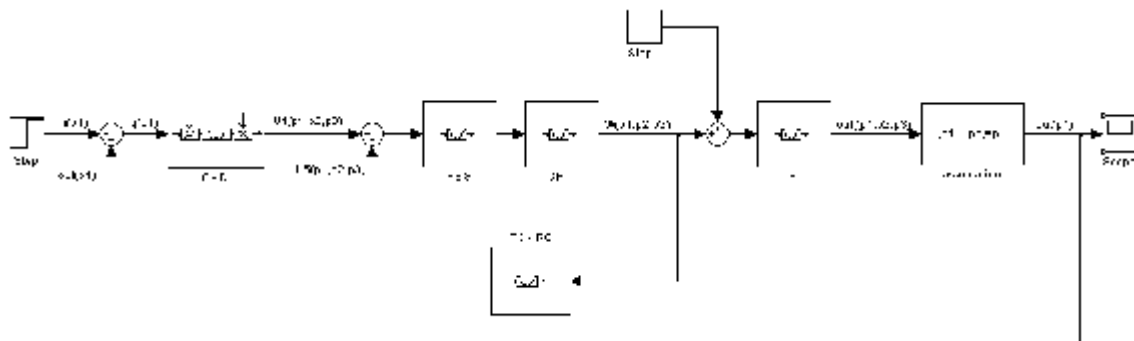


Рис. 2. Многомерная операторная структурная схема следящей системы в MATLAB SIMULINK 5 (фрагмент программы)

Проведем анализ нескорректированной следящей САУ, в которой отсутствует регулятор. Реакция системы на управляющий сигнал  $\varphi_0$  приведена на рис. 3, а на сигнал возмущения  $\Omega_f$  – на рис. 4. Моделирование системы проводилось на оптимальном значении несущей частоты 400 Гц.

Из переходных процессов системы (рис. 3, 4) при отработке как управления, так и возмущения видно, что их качество не удовлетворяет поставленным требованиям, присутствует ошибка по возмущению  $\delta_{\Omega_f}$ .

Используем вышеприведенные критерии инженерного синтеза и предварительно сформируем регулятор:

- больших инерционностей в следящей системе нет, но в контуре обратной связи по скорости имеется аperiodическое звено с постоянной времени  $T_\phi$ , инерционность которого желательно в регуляторе подавить для улучшения быстродействия системы, поэтому в регулятор введем форсирующее звено с постоянной времени  $T_{\text{пер}1} = T_\phi = 0,0175 \text{ с}$ ;

- для более интенсивного подавления высокочастотных помех на выходе САУ введем дополнительно в регулятор аperiodическое звено с постоянной времени  $T_{\text{пер}2} = T_{\text{дв}} = 0,106 \text{ с}$ ;

- точность по управляющему воздействию в САУ должна обеспечиваться наличием интегрирующего звена в прямом канале (редуктор);

- воспользуемся одним из известных критериев синтеза регуляторов для линейных САУ на технический оптимум (ТО) и выберем предварительно коэффициент передачи регулятора согласно выражению

$$K_{\text{пер}} = \frac{1}{2(T_{\text{дв}} + T_\phi)K_{\text{дв}} \cdot K_{\text{ТГ}} \cdot T_{\text{RC}}} = \frac{1}{2(0,106 + 0,0175)118 \cdot 1,8 \cdot 10^{-3} \cdot 0,0175} = 1072,2 \text{ о. е.}$$

Таким образом, имеем предварительно сформированный регулятор, который можно описать следующей многомерно-временной передаточной функцией

$$W_{\text{пер}}(p_1, p_2, p_3) = \frac{K_{\text{пер}}(T_{\text{пер}1}(p_1 + p_2 + p_3) + 1)}{(T_{\text{пер}2}(p_1 + p_2 + p_3) + 1)}$$

$$= \frac{1072,2 (0,0175 (p_1 + p_2 + p_3) + 1)}{(0,106 (p_1 + p_2 + p_3) + 1)} \quad (1)$$

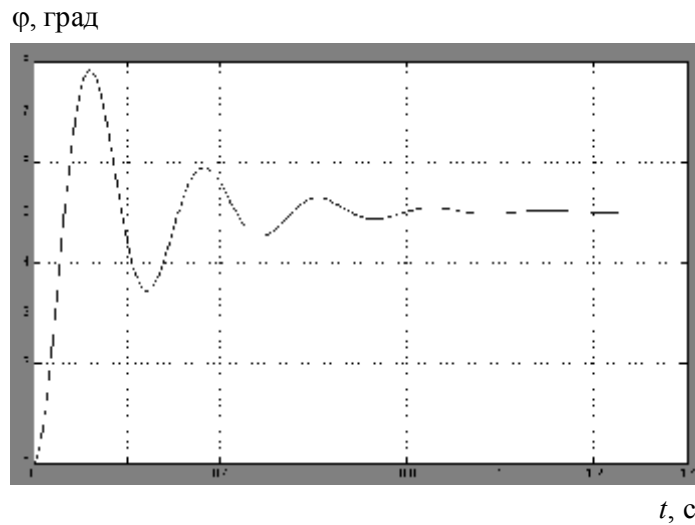


Рис. 3. Переходной процесс в нескорректированной следящей системе по углу поворота выходного вала при действии управляющего сигнала  $\varphi_0$

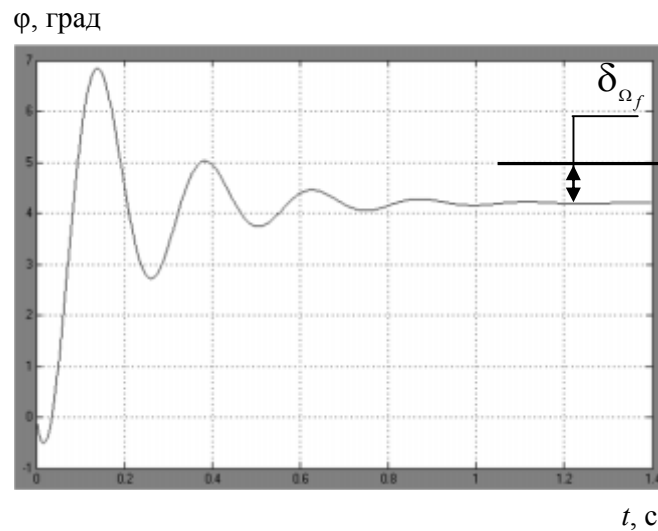
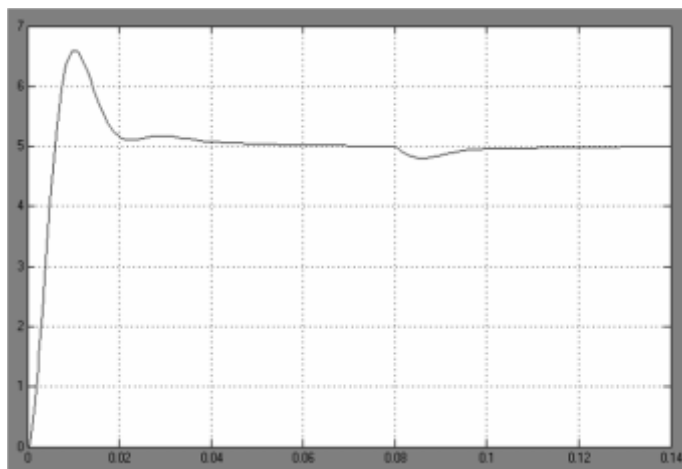


Рис. 4. Переходной процесс в нескорректированной следящей системе по углу поворота выходного вала при действии сигнала управления и возмущения  $\Omega_f$

Получим переходной процесс (рис. 5) в скорректированной следящей системе, в которой регулятор определяется по выражению (1) в прямом канале САУ (рис. 2).

Из переходного процесса (рис. 5) видно, что следящая система устойчива и имеет следующие показатели качества по управлению: время регулирования  $t_{\text{пер}} = 0,05 \text{ с}$ ; перерегулирование  $\sigma = 36 \%$ ; отсутствуют ошибки как по управлению, так и по возмущению.

φ, град



t, с

Рис. 5. Переходной процесс в скорректированной следящей системе изменения углового перемещения вала электродвигателя с регулятором (1) при действии как управляющего, так и возмущающего воздействия

Проведем исследование САУ при различных коэффициентах передачи регулятора и на различных несущих частотах модуляции и выберем их оптимальные параметры. Результаты исследования приведены в табл. 1 и 2.

Как видно из табл. 1, оптимальными по быстродействию и по перерегулированию σ будут коэффициент передачи регулятора  $K_{пер} = 3000$ .

Таблица 1

**Показатели качества следящей системы при обработке скачкообразного рассогласования  $\theta = 5^\circ$ , при различных значениях  $K_{пер}$**

Коэффициент усиления регулятора $K_{пер}$	Показатели качества регулирования		
	Перерегулирование $\sigma$ , %	Время регулирования $t_{пер}$ , с	Несущая частота $f_n$ , Гц
800	39	0,05	400
900	38	0,05	
1072,2	36	0,05	
1500	28	0,05	
2000	26	0,05	
2500	16	0,05	
3000	14	0,05	
4000	14	0,05	
5000	14	0,05	

В табл. 2 представлены результаты анализа следящей САУ, работающей на различных несущих частотах. Оптимальными, с точки зрения обеспечения заданных динамических показателей, будут частоты от 100 Гц и выше.

Таблица 2

**Показатели качества следящей системы при обработке скачкообразного рассогласования  $\theta = 5^\circ$ , на различных несущих частотах<sup>1</sup>**

Несущая частота	Показатели качества регулирования
-----------------	-----------------------------------

$f_n, \text{Гц}$	Перерегулирование $\sigma, \%$	Время регулирования $t_{\text{рег}}, \text{с}$	Коэффициент усиления регулятора $K_{\text{рег}}$
10	13	0,064	3000
30	18	0,06	
50	26	0,058	
100	14	0,05	
130	14	0,05	
150	14	0,05	
200	14	0,05	
300	14	0,05	
400	14	0,05	
700	14	0,05	
1000	14	0,05	

<sup>1</sup>Анализ производился в рабочем диапазоне частот, здесь приведены только некоторые из них.

В процессе синтеза регулятора для типовой следящей системы (рис. 1) были получены переходные процессы в элементах САУ, которые приведены на рис. 6–9. Из графиков видны высокочастотные пульсации сигналов, которые были подавлены действием синтезированного регулятора следящей САУ.

$\varphi$ , град

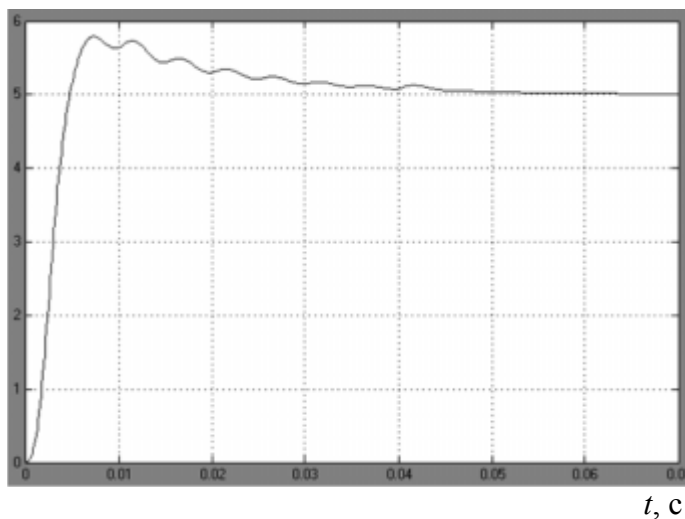
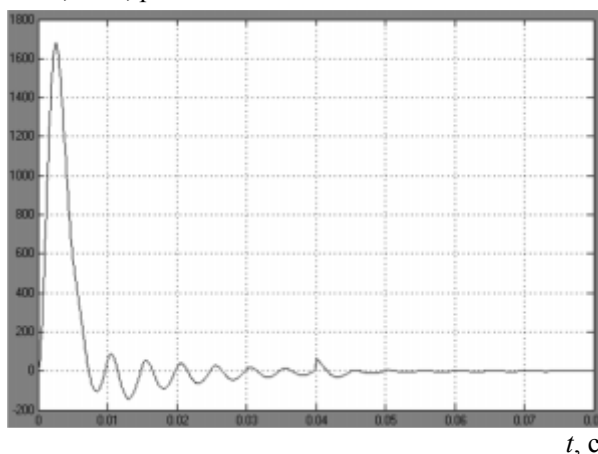


Рис. 6. Кривая переходного процесса изменения углового перемещения вала электродвигателя

$\omega \cdot 0,0087$ , рад/с



$t, \text{с}$

Рис. 7. Кривая переходного процесса изменения угловой скорости вала электродвигателя

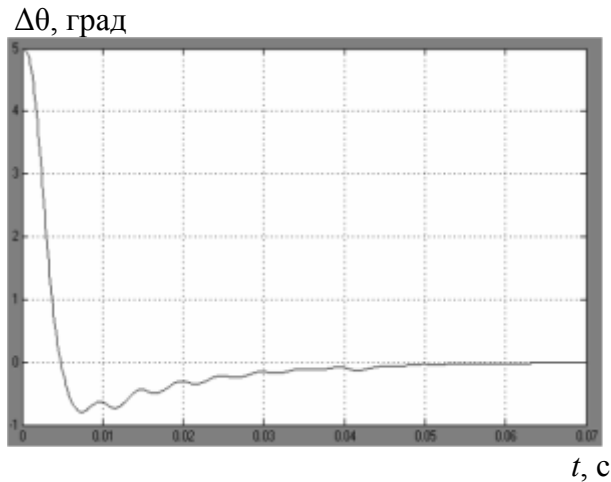


Рис. 8. Кривая переходного процесса изменения ошибки системы на входе сельсинного модулятора

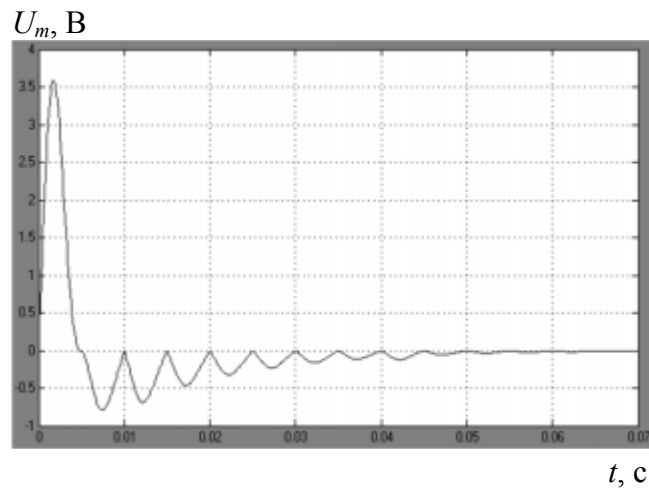


Рис. 9. Кривая переходного процесса изменения напряжения на выходе сельсинного демодулятора

Окончательно определим многомерную передаточную функцию регулятора в следующем виде:

$$W_{\text{рег}}(p_1, p_2, p_3) = \frac{3000(0,0175(p_1 + p_2 + p_3) + 1)}{(0,106(p_1 + p_2 + p_3) + 1)}. \quad (2)$$

Согласно теореме об ассоциации переменных [4] многомерная передаточная функция регулятора в одномерной операторной области будет иметь вид, удобный для технической реализации:

$$W_{\text{рег}}(p) = \frac{3000(0,0175 p + 1)}{(0,106 p + 1)}. \quad (3)$$

### Заключение

Инженерный синтез регулятора следящей САУ и дальнейшее ее исследование показало, что достигнуты желаемые показатели качества САУ, как статические, так и динамические.

Работа системы на малых несущих частотах (меньших 100 Гц) хуже, чем на больших (более 100 Гц). Это связано с тем, что как электродвигатель, так и синтезированный

регулятор лучше подавляют высокие частоты. Поэтому можно сделать вывод, что рассмотренную следящую систему с оптимизированным регулятором лучше использовать в диапазоне несущих частот от 100 Гц и выше.

### **Литература**

1. Козлов, А. В. Многомерно-временной операторный метод анализа элементов систем автоматического управления с нелинейностями типа «произведение»: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.05 / А. В. Козлов; Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого. – Гомель, 2007. – 20 с.
2. Гостев, В. И. Замкнутые системы с периодически изменяющимися параметрами / В. И. Гостев, П. И. Чинаев. – Москва: Энергия, 1979. – 272 с.
3. Козлов, А. В. Численное моделирование многомерно-временных динамических звеньев / А. В. Козлов // Современные проблемы машиноведения: тез. докл. VI Междунар. науч.-техн. конф. (науч. чтения, посвящ. П. О. Сухому), Гомель, 19–20 окт. 2006 г. / А. И. Россол (отв. секретарь). – Гомель, 2006. – С. 100–101.
4. Chen, C. F. New theorems of association of variables in multiple dimensional Laplace Transform / C. F. Chen, R. F. Chiu. – INT. J. SYSTEM CSI., 1973, vol. 4, no. 4. – P. 647–664.

*Получено 12.04.2010 г.*