

## Система управления реверсивным электромеханическим развертывающим устройством<sup>1</sup>

В.Н. Дроздов, В.А. Толмачев, Д.А. Субботин  
ФГБОУВПОНИУ «Информационных Технологий Механики и Оптики»,  
Санкт-Петербург, Российская Федерация  
E-mail: Subb-Dm@yandex.ru

### Авторское резюме

**Состояние вопроса:** В настоящее время в системах с малыми требуемыми углами отклонения рабочего органа от нулевого положения начинают применять реверсивные электромеханические развертывающие устройства с ограниченным углом поворота. Подобные устройства обладают повышенной инерционностью и предъявляют дополнительные требования к качеству систем управления.

**Материалы и методы:** В ходе исследования использован пакет моделирования MatLab, в котором построены соответствующие математические модели и проведено математическое моделирование.

**Результаты:** Представлены синтез и математическая модель системы управления реверсивного развертывающего устройства в системе Simulink пакета MatLab. Приведены результаты моделирования спроектированной системы для случая построения модального регулятора и для случая использования комбинированного управления.

**Выводы:** Система с модальным регулятором обладает меньшей чувствительностью к изменению параметров объекта управления. Комбинированная система имеет нулевые ошибки по скорости и по положению на рабочем участке.

**Ключевые слова:** электромеханическое реверсивное развертывающее устройство, система управления, математическое моделирование.

## Reversible electromechanical scanner device control system

V.N. Drozdov, V.A. Tolmachev, D.A. Subbotin  
Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics  
Saint Petersburg, Russian Federation  
E-mail: Subb-Dm@yandex.ru

### Abstract

**Background:** Currently in systems with small required operating element deflection angle from the zero position the reverse electromechanical scanning devices with a limited angle of rotation are used. These devices have high inertia and additional requirements for control systems quality.

**Materials and methods:** During the research MatLab simulation package was used, where the corresponding mathematical models were designed and mathematical modeling was held.

**Results:** The paper presents a synthesis and a mathematical model for reverse scanning device adjuster in Simulink system of MatLab package. The results of modal controller and combined management control system simulation are presented.

**Conclusions:** Modal regulator system has less sensitivity to changes in the parameters of the control object. The combined system, at the same time, has zero speed error and position in the work area.

**Key words:** Reversible electromechanical scanner device, control system, mathematical simulation.

<sup>1</sup> Предлагаемую статью следует рассматривать как продолжение статьи [1], в которой рассматривался вопрос формирования задания для реверсивного развертывающего устройства.

**Введение.** В качестве реверсивных раз-  
вертывающих устройств могут использоваться  
моментные электромеханические преобразова-  
тели (магнитные пружины). Рассмотрим синтез  
алгоритма управления именно таким преобро-  
зователем.

**Синтез регуляторов системы управле-  
ния.** На основе материалов [2] математическую  
модель магнитной пружины можно представить  
следующим образом:

$$\begin{cases} \frac{di}{dt} = -\frac{R}{L}i - \frac{K_e}{L}\omega + \frac{1}{L}u, \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{K_i}{J}i - \frac{f}{J}\omega - \frac{K_\alpha}{J}\alpha - \frac{1}{J}M_v, \\ \frac{d\alpha}{dt} = \omega, \end{cases} \quad (1)$$

где  $R$  – сопротивление обмотки управления пре-  
образователя;  $L$  – индуктивность рассеяния об-  
мотки управления;  $K_e$  – крутизна противоЭДС;  
 $J$  – суммарный момент инерции по оси сканиро-  
вания;  $f$  – коэффициент момента сил вязкого  
трения;  $M_v$  – суммарный момент внешних воз-  
действий;  $K_\alpha$  – жесткость механической характе-  
ристики или жесткость магнитной пружины;  $K_i$  –  
жесткость моментной (тяговой) характеристики  
или чувствительность по току;  $u$  и  $i$  – напряже-  
ния и ток на обмотке управления преобразова-  
теля соответственно;  $\alpha$  и  $\omega$  – угол поворота оси  
и скорость вращения соответственно.

Запишем уравнение состояния (1) в стан-  
дартном виде, опустив влияние возмущающего  
воздействия на этапе синтеза алгоритма управ-  
ления:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu, \\ y = Cx, \end{cases} \quad (2)$$

где

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad a_{11} = -\frac{R}{L}, \quad a_{12} = -\frac{K_e}{L}, \quad a_{21} = -\frac{K_i}{L},$$

$$a_{22} = -\frac{f}{L}, \quad a_{23} = -\frac{K_\alpha}{L}, \quad B = \begin{bmatrix} b \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad b = \frac{1}{L}.$$

По условиям задачи доступны измерению  
все переменные состояния, поэтому матрица  $C$   
является единичной.

Применим стандартную процедуру син-  
теза модального регулятора для объекта (2)  
[3, 4]. Выберем эталонную матрицу состояния  $F_e$   
замкнутой системы в виде сопровождающей  
матрицы характеристического полинома филь-  
тра Бесселя третьего порядка с полосой пропус-  
кания  $\omega_b$ . Значение  $\omega_b$  выбирается исходя из за-  
данного быстродействия системы управления и  
обычно уточняется в процессе моделирования  
системы. Зададимся матрицей наблюдения эталонной системы в виде  $H_e = [0 \ 0 \ 1]$ . В результате  
решения уравнения Сильвестра  $AM - MF_e = BH_e$

находим матрицу  $M$  и вычисляем матрицу об-  
ратных связей:

$$K = [k_1 \ k_2 \ k_3] = H_e M^{-1}. \quad (3)$$

Уравнение модального регулятора име-  
ет вид

$$u = -Kx = -k_1 i - k_2 \omega - k_3 \alpha. \quad (4)$$

В системе управления, состоящей из объ-  
екта (2) и регулятора (4), обеспечиваются желае-  
мые свойства собственного движения. Исследуем  
возможность применения модального регулятора  
для осуществления реверсивного движения раз-  
вертывающего элемента. В [1] описан генератор  
задающего реверсивного движения, представ-  
ляющий собой последовательное соединение  
трех интеграторов с входным сигналом в виде по-  
следовательности импульсов. Математическая  
модель такого генератора имеет вид

$$\dot{\xi} = \Gamma \xi + B_\Gamma a_3(t), \quad (5)$$

$$g = H \xi,$$

где выбраны следующие координаты вектора  
состояния модели:  $\xi_1$  – ускорение  $\ddot{\alpha}_g$  задающего  
воздействия;  $\xi_2$  – скорость  $\dot{\alpha}_g$  задающего воз-  
действия;  $\xi_3$  – задающее воздействие  $\alpha_g$ .

В этом случае матрицы модели (5) будут  
иметь вид

$$\Gamma = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad H = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad B_\Gamma = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Преобразуем модель (5) к виду

$$\dot{\xi} = \Gamma \xi, \quad (6)$$

$$\alpha_g = H \xi,$$

заменив входное воздействие ненулевыми на-  
чальными условиями интеграторов в модели  
задающего сигнала на каждом участке генери-  
рования задания. Модифицируем уравнение  
регулятора (4) следующим образом:

$$u = -Kx + \bar{K}g = -k_1 i - k_2 \omega - k_3 \alpha + k_2 \dot{\alpha}_g + k_3 \alpha_g. \quad (7)$$

Таким приемом осуществляется замыка-  
ние системы по вектору ошибки

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_\omega \\ \varepsilon_\alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\alpha}_g - \omega \\ \alpha_g - \alpha \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Уравнение замкнутой системы, состоящей  
из объекта (2) и регулятора (7), будет иметь вид

$$\dot{x} = (A - BK)x + B\bar{K}g, \quad (9)$$

$$y_1 = C_1 x,$$

$$\text{где } C_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Установившаяся ошибка  $\varepsilon = g - y_1$  в такой  
системе вычисляется согласно выражению [4]

$$\varepsilon = (H - C_1 M_1) \xi, \quad (10)$$

в котором матрица  $M_1$  является решением урав-  
нения Сильвестра

$$M_1 \Gamma - F M_1 = B\bar{K}, \quad (11)$$

$$\text{где } F = A - BK.$$

**Комбинированное управление.** В том случае, когда ошибка (10) оказывается недопустимо большой, целесообразно добиваться равенства ее нулю. Эту задачу можно решить, либо обеспечивая в системе астатизм третьего порядка, либо введением прямых связей по координатам вектора состояния модели задающего воздействия. Введение дополнительных инерционных звеньев, в частности интеграторов, в замкнутый контур приводит к затягиванию переходных процессов на участках изменения параметров задающего воздействия. Затягивание процессов особенно нежелательно в начале каждого рабочего участка.

По указанной причине используем введение прямых связей по внешнему воздействию, тем более, что все координаты вектора  $\xi$  вычисляются тем же контроллером, что и управляющий сигнал  $u$ .

Комбинированное управление предполагает использовать управляющее воздействие вместо (7) в виде

$$u = -Kx + R\xi. \quad (12)$$

В этом случае уравнение (11) преобразуется к виду

$$M_1 \Gamma - FM_1 = BR, \quad (13)$$

и, кроме того, на основании (10) добавляется условие

$$H - C_1 M_1 = 0. \quad (14)$$

Уравнение (14) в развернутом виде выглядит следующим образом:

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix}.$$

Отсюда находим:

$$m_{21} = 0, m_{22} = 1, m_{23} = 0, m_{31} = 0, \\ m_{32} = 0, m_{33} = 1.$$

С учетом полученных значений развернутое уравнение (13) будет иметь вид

$$\begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} \\ a_{21} & 0 & a_{23} \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \times \\ \times \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} [r_1 \quad r_2 \quad r_3].$$

Таблица 1

Режим сканирования	$\alpha_{гр}, ^\circ$	$T_{ск}, с$	$t_p, с$	$t_{нр}, с$	$U_{доп}, В$	$\Delta\Omega, \%$	$\Delta_H, \%$
Широкое угл. поле	30	2,4	1	0,2	48	8	15
Узкое угл. поле	5	0,5	0,17	0,08	48	8	10

В результате решения этого уравнения находим коэффициенты прямых связей по координатам вектора состояния генератора задающего воздействия:

$$r_1 = -\frac{f_{11}}{ba_{21}}; \\ r_2 = -\frac{f_{12}}{b} - \frac{a_{23}}{ba_{21}}; \\ r_3 = \frac{f_{11}a_{23}}{ba_{21}} - \frac{f_{13}}{b}.$$

Учтя выражения для элементов  $f_{12}, f_{13}$  матрицы  $F$ , преобразуем выражения для коэффициентов  $r_2, r_3$  к виду

$$r_2 = k_2 - \frac{a_{12}}{b} - \frac{a_{23}}{ba_{21}}, \\ r_3 = k_3 + \frac{f_{11}a_{23}}{ba_{21}}.$$

Коэффициенты  $k_2, k_3$  уже включены в цепи ошибок по скорости и по положению в законе управления (7), поэтому необходимо ввести только дополнительные прямые связи по скорости

$$\Delta r_2 = -\frac{a_{12}}{b} - \frac{a_{23}}{ba_{21}}$$

и по положению

$$\Delta r_3 = \frac{f_{11}a_{23}}{ba_{21}}.$$

**Математическое моделирование.**

Рассмотрим конкретный пример. В таблице приведены два варианта параметров задающего трапецеидального сигнала [1].

Конкретный объект управления имеет следующие параметры:  $K_\alpha = 4500$  Нм/рад,  $K_i = 120$  Нм/А,  $K_e = 1,5$  Вс/рад,  $L = 0,6$  Гн,  $R = 10,5$  Ом,  $J = 250$  кгм<sup>2</sup>,  $M_v = 23$  Нм,  $f = 0$ .

Расчет параметров задатчика осуществлялся с учетом методики синтеза, описанной в [1].

Расчет параметров регулятора производился в соответствии с методикой синтеза, предложенной выше.

На рис. 1 приведена схема моделирования замкнутой комбинированной системы (слева изображен блок задающего устройства (подробная схема и описание узлов дано в работе [1]), справа выделена модель объекта управления, в центре – модель регулятора). Задающее воздействие и регулятор реализуются на одном и том же контроллере.

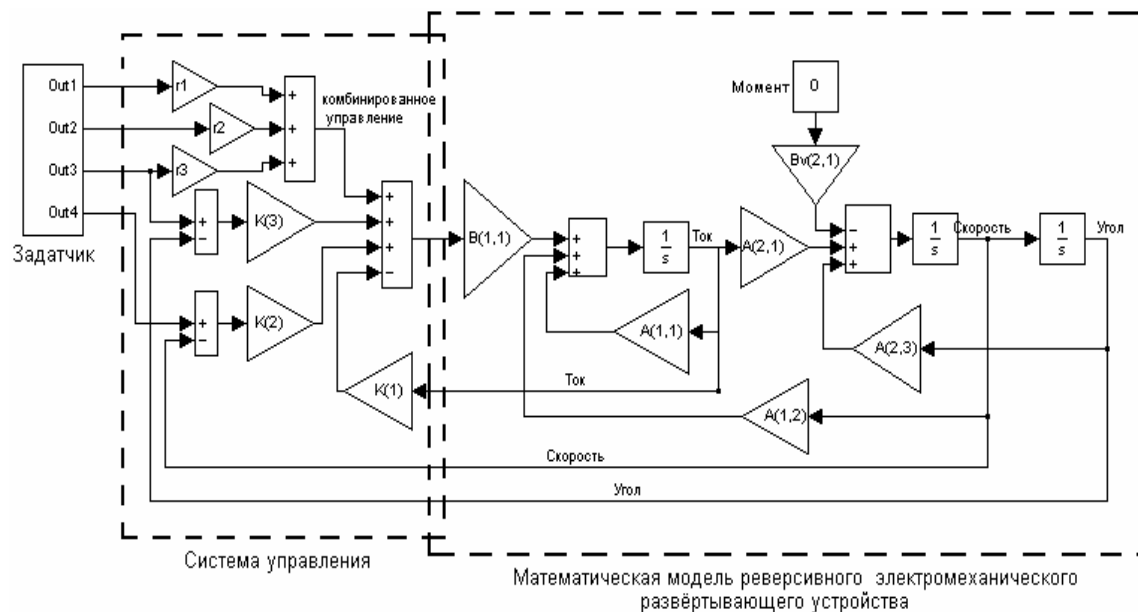


Рис. 1. Схема моделирования комбинированной системы, замкнутой и по положению, и по скорости

На рис. 2 приведен график ошибки по положению при отработке медленного задающего воздействия с регулятором, реализующим закон управления (7). На рабочем участке ошибка по положению изменяется в пределах 0,006 град. – –0,006 град.

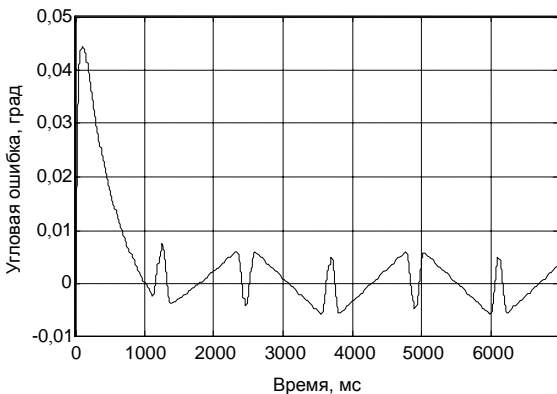


Рис. 2. График ошибки по положению с регулятором (7)

На рис. 3 приведен график ошибки по скорости при отработке медленного задающего воздействия с регулятором, реализующим закон управления (7).

Анализ графика (рис. 3) показывает, что на рабочем участке модуль ошибки по скорости постоянный и равен 0,012 град/с.

График выходной величины системы с регулятором (7) представлен на рис. 4.

**Комбинированное управление.** Использование комбинированного управления (12) обеспечивает нулевую установившуюся ошибку на рабочем участке как по положению, так и по скорости. Однако в этом случае появляется ненулевая переходная ошибка по скорости в начале рабочего участка (рис. 5). Максимальное значение этой ошибки равно 0,02 град/с.

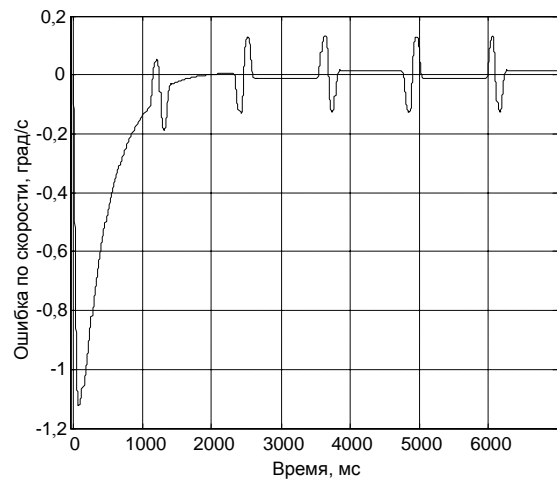


Рис. 3. График ошибки по скорости с регулятором (7)

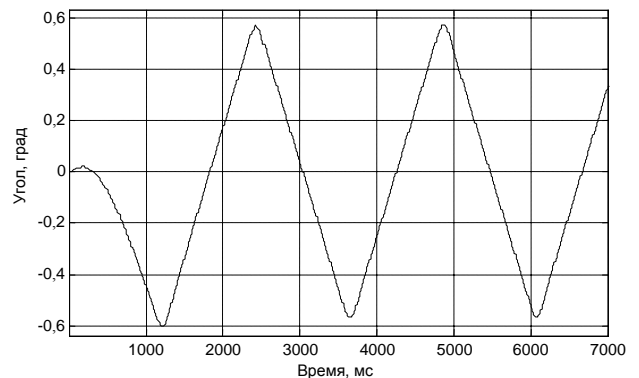


Рис. 4. График выходной величины с регулятором (7)

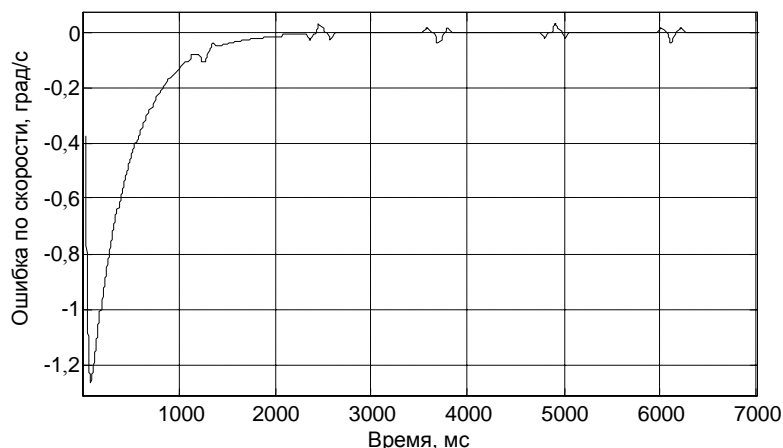


Рис. 5. График ошибки по скорости в комбинированной системе (задание «медленное»)

Система с регулятором (7) имеет существенное преимущество перед комбинированной системой с точки зрения меньшей чувствительности к изменению параметров объекта управления. Комбинированная система выигрывает за счет нулевых ошибок по скорости и по положению на рабочем участке, но в этом случае получается ощутимая переходная ошибка по скорости в начале рабочего участка. Комбинированные системы, как известно, обладают повышенной чувствительностью к изменению параметров объекта управления.

#### Список литературы

1. Дроздов В.Н., Толмачев В.А., Субботин Д.А. Датчик реверсивного электромеханического развертывающего устройства.
2. Решетников Е.М., Саблин Ю.А., Григорьев В.Е. Электромеханические преобразователи гидравлических и газовых приводов. – М.: Машиностроение, 1982. – 144 с.

*Дроздов Валентин Нилович*,  
ФГБОУВПОНИУ «Информационные технологии механики и оптики»,  
доктор технических наук кафедры электротехники и прецизионных электромеханических систем,  
адрес: 197101, г. Санкт-Петербург, пр. Кронверкский, д. 49,  
e-mail: Subb-Dm@yandex.ru

*Толмачев Валерий Александрович*,  
ФГБОУВПОНИУ «Информационные технологии механики и оптики»,  
кандидат технических наук кафедры электротехники и прецизионных электромеханических систем,  
адрес: 197101, г. Санкт-Петербург, пр. Кронверкский, д. 49,  
e-mail: Subb-Dm@yandex.ru

*Субботин Дмитрий Андреевич*,  
ФГБОУВПОНИУ «Информационные технологии механики и оптики»,  
аспирант кафедры электротехники и прецизионных электромеханических систем,  
адрес: 197101, г. Санкт-Петербург, пр. Кронверкский, д. 49,  
e-mail: Subb-Dm@yandex.ru

3. Кузовков Н.Т. Модальное управление и наблюдающие устройства. – М.: Машиностроение, 1976. – 184 с.
4. Дроздов В.Н., Мирошник И.В., Скорубский В.И. Системы автоматического управления с микроЭВМ. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1989. – 284 с.

#### References

1. Drozdov, V.N., Tolmachev, V.A., Subbotin, D.A. Zadatchik reversivnogo elektromekhanicheskogo razvertyvayushchego ustroystva [Electromechanical reverse scanning device adjuster].
2. Reshetnikov, E.M., Sablin, Yu.A., Grigor'ev, V.E. *Elektromekhanicheskie preobrazovateli gidravlicheskih i gazovykh privodov* [Electromechanical converter of gas and hydraulic actuators]. Moscow, Mashinostroenie, 1982. 144 p.
3. Kuzovkov, N.T. *Modal'noe upravlenie i nablyudayushchie ustroystva* [Modal control and watching devices]. Moscow, Mashinostroenie, 1976. 184 p.
4. Drozdov, V.N., Miroshnik, I.V., Skorubskiy, V.I. *Sistemy avtomaticheskogo upravleniya s mikroEVM* [Automatic control systems with microcomputer]. Leningrad, Mashinostroenie. Leningradskoe otdelenie, 1989. 284 p.