

## СИНТЕЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ КОМБИНИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ С ИЗМЕРЕНИЕМ ВОЗМУЩЕНИЯ ПО МОДЕЛИ ОБЪЕКТА

С.А. Бобриков, Е.Д. Пичугин, А.Г. Кисель

Одесский национальный политехнический университет,  
просп. Шевченко, 1, Одесса, 65044, Украина; e-mail: bobrikov1932@gmail.com

Проведен синтез системы управления с использованием двух принципов управления: по отклонению и по возмущающему воздействию. Измерение возмущающего воздействия осуществляется косвенно по модели объекта, в которую входит заданная часть системы. Заданная часть включает в себя усилитель мощности – звено первого порядка, и двигатель – звено второго порядка. Выходной сигнал системы управления сравнивается с сигналом на выходе модели. Разность этих сигналов через компенсирующее устройство подается на вход усилителя мощности. В качестве показателей процесса приняты: максимальное перерегулирование в переходной характеристике и время переходного процесса. Схема управляющего устройства и расчет его параметров выполнены с учетом максимальной допустимой величины перегрузки электропривода по моменту вращения при минимальном времени переходного процесса. При расчете управляющего устройства приняты условия, обеспечивающие минимум среднеквадратичного интегрального критерия оптимальности. Показано, что введение в систему компенсирующего устройства уменьшает степень влияния на выходную величину системы управления возмущающего воздействия, приложенного к объекту. Определены структурная схема и параметры компенсирующего устройства, приведены условия устойчивости контура компенсации. Разработана структурная схема системы управления и метод расчета его параметров в аналоговом и в цифровом вариантах. Рассмотрен пример расчета системы и схемы моделирования в системе MATLAB-Simulink при выполнении всех управляющих элементов системы в аналоговой и в цифровой формах.

**Ключевые слова:** регулятор, система управления, управление по отклонению, управление по возмущающему воздействию, передаточные функции, моделирование, переходная характеристика, показатели качества управления, объект управления, исполнительный механизм, усилитель, обратная связь

### Введение

Комбинированные системы управления, в которых используются одновременно два принципа построения системы – по отклонению и по возмущающему воздействию, позволяют существенно снизить зависимость ошибки управления от того возмущающего воздействия, по которому выполнен канал воздействия на управляющее устройство. Для выполнения такого канала необходимо измерить возмущающее воздействие, что во многих случаях выполнить невозможно. В работах [1,2] рассмотрен метод оценки величины возмущающего воздействия со стороны внешней среды путем сравнения сигналов на выходе системы управления с сигналом, полученным на выходе модели системы. При этом в модель системы включены все элементы системы: заданная часть и управляющее устройство. Включение в модель управляющего устройства существенно усложняет модель. При необходимости изменять настройку управляющего устройства нужно соответственно изменять и настройку модели. В данной работе рассмотрен метод построения комбинированной системы управления с

использованием для измерения возмущений модель, в которую включены только объект управления с усилителем мощности.

### Цель работы

Целью работы является синтез и моделирование системы управления, с использованием двух принципов управления: по отклонению и по возмущающему воздействию. При этом оценка величины воздействия возмущений на объект управления осуществляется путем сравнения сигналов на выходе объекта и на выходе модели. В модель включены объект и усилитель мощности. Система управления обеспечивает заданные показатели качества в пределах заданного диапазона изменения параметров объекта. В качестве показателей принято минимальное перерегулирование при заданной верхней границе времени переходного процесса.

### Основная часть

Обобщенная структурная схема разрабатываемой системы показана на рис. 1, где приняты следующие обозначения:  $K_{yy}(p)$  – передаточная функция управляющего устройства;  $K_{ym}(p)$  – передаточная функция усилителя мощности;  $K_{oy}(p)$  – передаточная функция объекта управления;  $K_{ym}^1(p)$  – передаточная функция модели усилителя мощности;  $K_{oy}^1(p)$  – передаточная функция модели объекта управления;  $K_{ky}(p)$  – передаточная функция компенсирующего звена.

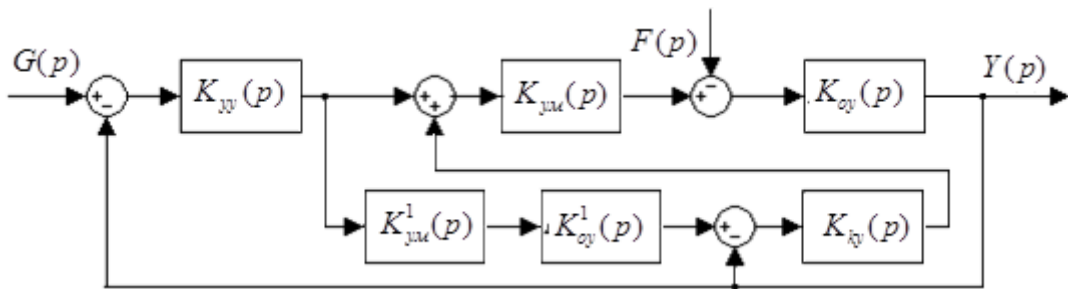


Рис. 1. Структурная схема комбинированной системы управления

Полагаем, что заданная часть системы (усилитель мощности и объект управления) описываются следующими передаточными функциями:

$$K_{ym}(p) = K_{ym}^1(p) = \frac{K_{ym}}{T_{ym}p + 1}, \quad K_{oy}(p) = K_{oy}^1(p) = \frac{K_{oy}}{(T_{oy}p + 1)p}.$$

Определим передаточную функцию, связывающую возмущающее воздействие, приложенное к объекту, с выходной величиной, для чего воспользуемся формулой Мейсона [6]:

$$W_{fy}(p) = \frac{y(p)}{F(p)} = \frac{W_{np}(p)\Delta_{np}(p)}{\Delta(p)}. \quad (1)$$

где  $W_{np}(p)$  – передаточная функция прямого пути от точки приложения возмущения до выходной величины;  $\Delta(p) = 1 - \sum_i W_{конт.i}(p) + \sum_{i,j} W_{конт.i}(p)W_{конт.j}(p) - \dots, W_{конт.i,j}(p)$  – передаточные функции замкнутых контуров.

В рассматриваемой системе (рис. 1) передаточные функции замкнутых контуров равны:

$$\begin{aligned} W_{конт.1}(p) &= -K_{yy}(p)K_{ym}(p)K_{oy}(p); & W_{конт.2}(p) &= -K_{ky}(p)K_{ym}(p)K_{oy}(p); \\ W_{конт.3}(p) &= -K_{yy}(p)K_{ym}^1(p)K_{oy}^1(p)K_{ky}(p)K_{ym}(p)K_{oy}(p). \end{aligned} \quad (2)$$

Учитывая, что в формуле Мейсона (1) из произведения контуров исключаются (приравняются нулю) те пары, в которых есть повторение каких-либо одинаковых элементов, а также то, что  $\Delta_{np}(p) = \Delta(p)$  за вычетом тех элементов, которые есть в прямом пути, получим передаточную функцию (2), подставив передаточные функции звеньев системы:

$$W_{fy}(p) = \frac{K_{oy}(p)}{\Delta(p)}. \quad (3)$$

Знаменатель данной передаточной функции равен:

$$\begin{aligned} \Delta(p) &= 1 + K_{yy}(p)K_{ym}(p)K_{oy}(p) + K_{ky}(p)K_{ym}(p)K_{oy}(p) + \\ &+ K_{yy}(p)K_{ym}^1(p)K_{oy}^1(p)K_{ky}(p)K_{ym}(p)K_{oy}(p). \end{aligned}$$

Передаточная функция компенсирующего звена  $K_{ky}(p)$  входит в  $\Delta(p)$ , т.е. расположена в знаменателе передаточной функции (3). Очевидно, чем больше будет величина  $K_{ky}(p)$ , тем в меньшей степени будет влиять возмущающее воздействие  $f(t)$  на выходную величину системы  $y(t)$ . Компенсирующее звено входит в замкнутый контур, тип звена и величины его параметров влияют на динамические свойства контура и всей системы.

Для определения типа звена  $K_{ky}(p)$  и его параметров рассмотрим замкнутый контур  $W_{конт.2}(p)$ :

$$W_{конт.2}(p) = -K_{ky}(p)K_{ym}(p)K_{oy}(p).$$

Характеристическое уравнение этого контура имеет вид:

$$1 + K_{ky}(p)K_{ym}(p)K_{oy}(p) = 0.$$

Подставив передаточные функции усилителя мощности и объекта получим:

$$1 + \frac{K_{ky}(p)K_{ym}K_{oy}}{(T_{ym}p + 1)(T_{oy}p + 1)p} = 0. \quad (4)$$

Принимаем, что передаточная функция компенсирующего звена имеет следующий вид:

$$K_{ky}(p) = \frac{K_{ky}(T_{ym}p + 1)(T_{oy}p + 1)}{(T_d p + 1)(T_d p + 1)}. \quad (5)$$

Постоянные времени  $T_d$  в знаменателе (5) необходимы для физической реализуемости звена. Их величина должна быть выбрана на порядок меньше наименьшей величины постоянных времени в заданной части системы. Подставив (5) в (4) получим:

$$1 + \frac{K_{ky}K_{ym}K_{oy}}{(T_d p + 1)(T_d p + 1)p} = 0.$$

Сделав ряд преобразований получим:

$$T_d^2 p^3 + 2T_d p^2 + p + K_{ky}K_{ym}K_{oy} = 0.$$

В соответствии с критерием устойчивости Гурвица, для устойчивости этого контура необходимо выполнение следующего неравенства:

$$T_d^2 K_{ky} K_{ym} K_{oy} < 2T_d.$$

Откуда следует:

$$K_{ky} < \frac{2}{T_d K_{ym} K_{oy}} = K_{kykp}. \quad (6)$$

Очевидно, что если компенсирующее звено имеет передаточную функцию (5), то для уменьшения влияния возмущающего воздействия на выходную величину нужно увеличивать коэффициент усиления  $K_{ky}$ , но при этом величина этого коэффициента должна быть меньше его критического значения (6).

Для разработки управляющего устройства воспользуемся методом, рассмотренным в [3,4]. В соответствии с [4] принимаем условие – передаточная функция контура  $W_{конт.1}(p)$  равна:

$$W_{конт.1}(p) = K_{yy}(p)K_{ym}(p)K_{oy}(p) = \frac{K_c(T_y p + 1)}{p^2}. \quad (7)$$

Как показано в [4], если передаточная функция разомкнутой системы имеет вид (7), то произведение  $K_c T_y$  в относительных единицах равно ускорению выходной величины в момент подачи на вход системы ступенчатого сигнала. В момент включения ускорение выходной величины системы имеет наибольшее значение и произведение  $K_c T_y$  численно равно перегрузке электропривода по моменту вращения  $\lambda$ . Из этого следует:  $K_c T_y = \lambda$ .

Из равенства (7) следует:

$$K_{yy}(p) = \frac{K_c(T_y p + 1)}{p^2 K_{ym}(p)K_{oy}(p)} = \frac{K_c(T_y p + 1)(T_{ym} p + 1)(T_{oy} p + 1)}{K_{ym} K_{oy} p}.$$

Окончательно принимаем передаточную функцию управляющего устройства следующего вида:

$$K_{yy}(p) = \frac{K_y(T_y p + 1)(T_{ym} p + 1)(T_{oy} p + 1)}{(T_d p + 1)^2 p}, \quad K_y = \frac{K_c}{K_{ym} K_{oy}}. \quad (8)$$

В формуле (8) дополнительные постоянные времени  $T_d$  введены для выполнения условия физической реализуемости устройства управления. Величина их должна быть на порядок меньше наименьшей постоянной времени в заданной части системы. Параметры  $T_y$  и  $K_c$  определяются по заданным показателям качества системы: максимальное перерегулирование в переходной характеристике и время переходного процесса [4], а также по заданной величине максимальной перегрузки по моменту вращения  $\lambda$ .

Последовательность расчёта системы рассмотрим на примере. Пусть передаточные функции заданной части системы равны:

$$K_{ym}(p) = \frac{0,5}{0,1p + 1}; \quad K_{oy}(p) = \frac{0,2}{(0,5p + 1)p}.$$

Принимаем условия:

1. Максимально допустимая перегрузка привода по моменту вращения равна  $\lambda=2,5$ .

2. Максимальная величина перерегулирования  $\sigma_{max} \leq 5\%$ .

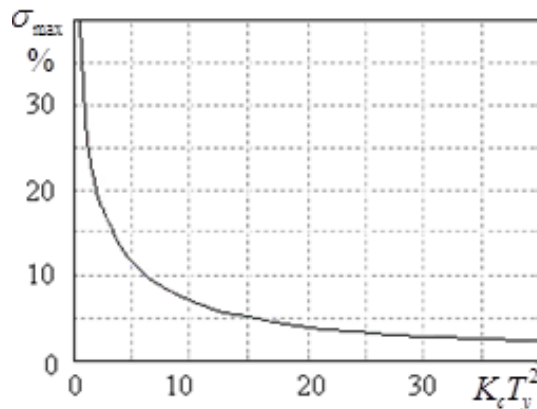
Из графика, приведенного на рис. 2 [4] для заданной величины  $\sigma_{max} = 5\%$  определяем  $K_c T_y^2 : K_c T_y^2 = 15$ .  $K_c T_y = \lambda = 2,5$ . Определяем параметры управляющего

устройства:  $T_y = \frac{K_c T_y^2}{K_c T_y} = \frac{15}{2,5} = 6$ ;  $K_c = \frac{2,5}{6} = 0,4$ . Коэффициент усиления управляющего

устройства равен:  $K_y = \frac{K_c}{K_{ym} K_{oy}} = \frac{0,4}{0,5 \times 0,2} = 4$ . Определим критическое значение

коэффициента усиления компенсирующего устройства (6):

$$K_{kyp} = \frac{2}{T_d K_{ym} K_{oy}} = \frac{2}{0,01 \times 0,5 \times 0,2} = 2000. \text{ Принимаем } K_{ky} = 1000.$$



**Рис. 2.** Зависимость максимального перерегулирования в переходной характеристике от  $K T^2$

Данная система промоделирована в системе MATLAB-Simulink [7] при выполнении всех элементов управления (управляющее устройство, модель заданной части системы и компенсирующее устройство) на аналоговых элементах (рис. 3) и в цифровом исполнении (рис. 4).

Для преобразования аналоговых передаточных функций управляющих элементов системы в цифровые использована подстановка в аналоговые передаточные функции выражения [7,8]

$$p = \frac{2(z-1)}{T_0(z+1)}, \quad (9)$$

где  $T_0$  – шаг квантования непрерывных сигналов в дискретные. Для обеспечения адекватности дискретной системы с исходной непрерывной  $T_0 \leq 0,5T_{\text{мин}}$ ,  $T_{\text{мин}}$  – минимальная постоянная времени в непрерывной передаточной функции.

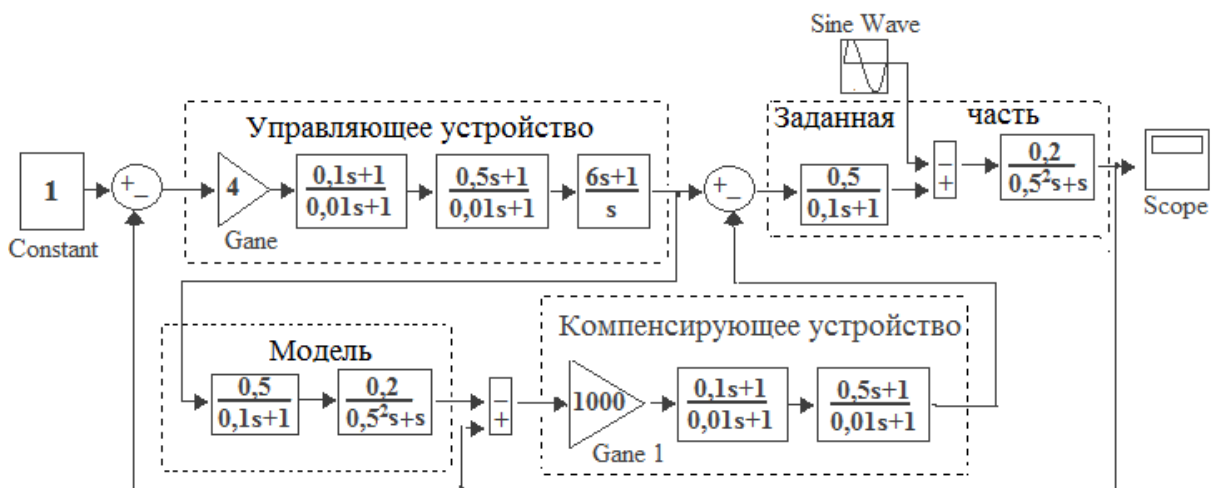


Рис. 3. Схема модели системы с аналоговыми элементами управления

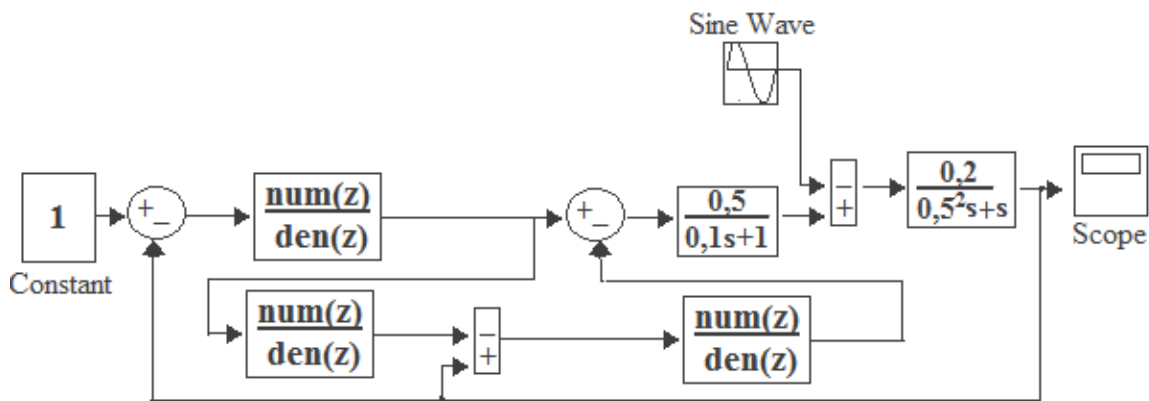


Рис. 4. Схема модели системы с цифровыми элементами управления

**Определение дискретных передаточных функций элементов управления.**

1. Управляющее устройство.

Аналоговая передаточная функция равна:

$$K_{yy}(p) = \frac{4(0,1p + 1)(0,5p + 1)(6p + 1)}{(0,01p + 1)^2 p}$$

Сделав подстановку (9), получим дискретную передаточную функцию управляющего устройства:

$$K_{yy}(z) = \frac{s_3 z^3 + s_2 z^2 + s_1 z + s_0}{g_3 z^3 + g_2 z^2 + g_1 z + g_0}, \quad (10)$$

где  $s_3 = 9,8933205$ ;  $s_2 = 29,0906785$ ;  $s_1 = 28,506681$ ;  $s_0 = 9,3093195$ ;  $g_3 = 0,00125$ ;  $g_2 = -0,00275$ ;  $g_1 = 0,00195$ ;  $g_0 = -4,5e-0,4$ .  $T_0 = 0,005$  с.

2. Модель заданной части системы.

Аналоговая передаточная функция равна:

$$K_M(p) = K_{ym}(p)K_{oy}(p) = \frac{0,1}{(0,1p + 1)(0,5p + 1)p}.$$

Дискретная передаточная функция имеет вид (10), её коэффициенты равны:  $s_3 = 1,25e-8$ ;  $s_2 = 3,75e-8$ ;  $s_1 = 3,75e-8$ ;  $s_0 = 1,25e-8$ ;  $g_3 = 0,41205$ ;  $g_2 = -1,21195$ ;  $g_1 = 1,18795$ ;  $g_0 = -0,38805$ .  $T_0 = 0,005$  с.

3. Компенсирующее устройство.

Аналоговая передаточная функция равна:

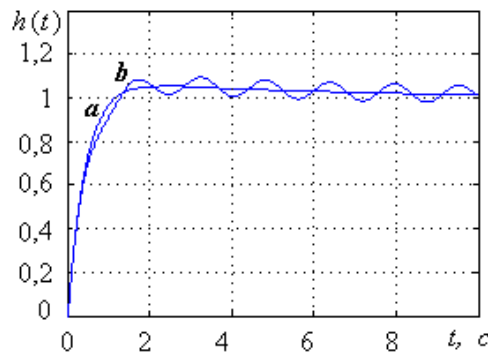
$$K_{ky}(p) = \frac{1000(0,1p + 1)(0,5p + 1)}{(0,01p + 1)(0,01p + 1)}.$$

Дискретная передаточная функция имеет вид:

$$K_{ky}(z) = \frac{s_2 z^2 + s_1 z + s_0}{g_2 z^2 + g_1 z + g_0},$$

где  $s_2 = 206,025$ ;  $s_1 = 399,95$ ;  $s_0 = 194,025$ ;  $g_2 = 6,25e-4$ ;  $g_1 = -7,5e-4$ ;  $g_0 = 2,25e-4$ .  $T_0 = 0,005$  с.

Результаты моделирования приведены на рис. 5. Кривая *a* – переходная характеристика при условии, что к объекту приложено гармоническое возмущающее воздействие, компенсирующее устройство включено; кривая *b* – компенсирующее устройство отключено. Результаты моделирования по схеме рис. 3 и по схеме рис. 4 практически полностью совпадают.



**Рис. 5.** Результаты моделирования: *a* – компенсирующее устройство включено; *b* – компенсирующее устройство отключено

## Выводы

Разработана комбинированная система управления, в которой используется принцип управления по отклонению и принцип управления по возмущающему воздействию. Рассмотрен случай, когда возмущающее воздействие приложено к объекту управления. Для измерения возмущающего воздействия использована модель, включающая объект управления и усилитель мощности. Проведен расчет системы с определением передаточных функций управляющего устройства, модели и компенсирующего устройства. Разработанный метод расчета позволяет рассчитать систему по заданным показателям качества – максимальное перерегулирование и время переходного процесса при условии высокой степени компенсации возмущающего воздействия, приложенного к объекту управления. Результаты проведенного моделирования подтверждают эффективность разработанного метода.

## Список литературы

1. Бобриков, С.А. Компенсация возмущений с использованием модели системы автоматического управления для измерения возмущений / С.А. Бобриков, Е.Д. Пичугин // Электротехнические и компьютерные системы. — К.: Техніка, 2011. — С.15-18.
2. Бобриков, С.А. Компенсация волновых возмущений в системе автоматического управления курсом судна / С.А. Бобриков, Е.Д. Пичугин // Электротехнические и компьютерные системы. — К.: Техніка, 2012. — № 05 (81). — С. 119-124.
3. Бобриков, С.А. Цифровой регулятор в системе управления с астатизмом второго порядка / С.А. Бобриков, Е.Д. Пичугин // Электротехнические и компьютерные системы. — К.: Техніка, 2013. — № 12 (88). — С. 55-60.
4. Бобриков, С.А. Оптимальная настройка цифрового регулятора для системы управления с астатизмом второго порядка / С.А. Бобриков, Е.Д. Пичугин, Б.Б. Бабийчук // Электротехнические и компьютерные системы. — К.: Техніка, 2015. — №17(93).—С.80-86.
5. Бобриков, С.А. Преобразование непрерывной передаточной функции управляющего в дискретную / С.А. Бобриков, Е.Д. Пичугин // Электротехнические и системы. — К.: Техніка, 2013. — № 10 (86). — С. 68-73
6. Бесекерский, В.А. Теория систем автоматического регулирования / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов. — М.: Наука, 1972. — С. 695-719.
7. Краснопрошина, А.А. Современный анализ систем управления с применением MATLAB, Simulink, ControlSistem / А.А. Краснопрошина, Н.Б. Репникова, А. Ильченко. — К.: Корнійчук, 1999. — 141с



## СИНТЕЗ І МОДЕЛЮВАННЯ КОМБІНОВАНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ З ВИМІРЮВАННЯМ ЗБУРЕННЯ ПО МОДЕЛІ ОБ'ЄКТА

С.А. Бобриков, Е.Д. Пичугин, А.Г. Кисель

Одеський національний політехнічний університет,  
просп. Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна; e-mail: bobrikov1932@gmail.com

Проведено синтез системи управління з використанням двох принципів управління: по відхиленню і по впливі, що обурює. Вимірювання впливу, що обурює здійснюється побічно за моделлю об'єкта, в яку входить задана частина системи. Задана частина включає в себе підсилювач потужності – ланка першого порядку, і двигун – ланка другого порядку. Вихідний сигнал системи управління порівнюється з сигналом на виході моделі. Різниця цих сигналів через компенсуючий пристрій подається на вхід підсилювача потужності. Як показники процесу прийняті: максимальне перерегулювання в перехідній характеристиці і час перехідного процесу. Схема керуючого пристрою і розрахунок його параметрів виконані з урахуванням максимальної допустимої величини перевантаження електроприводу по моменту обертання при мінімальному часу перехідного процесу. При розрахунку керуючого пристрою прийняті умови, що забезпечують мінімум середньоквадратичного інтегрального критерію оптимальності. Показано, що введення в систему компенсуючого пристрою зменшує ступінь впливу на вихідну величину системи управління обурюваного впливу, прикладеного до об'єкту. Визначено структурну схему та параметри компенсуючого пристрою, наведені умови стійкості контуру компенсації. Розроблено структурну схему системи управління і метод розрахунку його параметрів в аналоговому і в цифровому варіантах. Розглянуто приклад розрахунку системи і схеми моделювання в системі MATLAB-Simulink при виконанні всіх керуючих елементів системи в аналоговій і в цифровій формах.

**Ключові слова:** регулятор, система управління, управління по відхиленню, управління по впливі, що обурює, передавальні функції, моделювання, перехідна характеристика, показники якості управління, об'єкт управління, виконавчий механізм, підсилювач, зворотний зв'язок

## SYNTHESIS AND SIMULATION OF COMBINED CONTROL SYSTEMS WITH MEASUREMENT OF PERTURBATION BY MODEL OF THE OBJECT

S.A. Bobrykov, E.D. Pichugin, A.G. Kisel

Odesa National Politecnic University,  
1, Shevchenko Ave., Odesa, 65044, Ukraine; e-mail: bobrikov1932@gmail.com

The control system is synthesized using two control principles: deviation and perturbation. Measurement of the disturbing effect is carried out indirectly by the model of the object into which the given part of the system enters. The predetermined portion includes a power amplifier, a first-order unit, and an engine - second-order link. The output signal of the control system is compared with the signal at the output of the model. The difference of these signals through the compensating device is fed to the input of the power amplifier. As indicators of the process, the maximum overshoot in the transient response and the transient time are adopted. The circuit of the control device and the calculation of its parameters are made taking into account the maximum permissible value of the electric drive overload at the moment of rotation with the minimum time of the transient process. When calculating the control device, conditions are adopted that ensure a minimum of the root-mean-square integral optimality criterion. It is shown that the introduction of a compensating device into the system. It is shown that the introduction of a compensating device into the system reduces the degree of influence on the output value of the control system of the disturbing effect applied to the object. The structural scheme and parameters of the compensating device are determined, the stability conditions of the compensation circuit are given. A structural diagram of the control system and a method for calculating its parameters in the analog and digital versions are developed. An example of calculation of the system and modeling circuit in the MATLAB-Simulink system is considered when all control elements of the system are executed in analog and digital forms.

**Keywords:** regulator, control system, deviation control, perturbation control, transfer functions, simulation, transient response, control quality indicators, control object, actuator, amplifier, feedback