УДК 621.3.07

К.И. Волошиновский

УПРАВЛЕНИЕ ДВУХМАССОВОЙ СИСТЕМОЙ С ДВИГАТЕЛЕМ ПОСТОЯННОГО ТОКА И РЫСКАНЬЕМ ПО ВЫХОДУ

Объектом управления автоматической системы может быть не только технический объект, например двигатель, но и экономическая, метрологическая или другая система. Прежде чем переходить к анализу экономической эффективности или анализу энтропии как характеристики неопределенности, в частности метрологической необходимо, чтобы анализ системы проводился с алгоритмом управления там, где целевые показатели качества управления достигнуты гарантировано. Поэтому необходимо иметь возможность предложить алгоритмы и понимать способы их получения, какие оконечные структуры, а не исходные объекты управления подвергаются анализу энтропии и дисперсии. Система с алгоритмом управления должна быть устойчивой, а объект управления не всегда обладает физическим свойством-условием, выполнение, которого приводит к устойчивости выхода объекта управления, или оно заранее не известно Кроме того, интересным является не только сам процесс получения алгоритма, и получения заданной динамической точности, но и управления неопределенностью, в части ее минимизации, что имеет смысла только для системы с алгоритмом управления. Кроме того, в реальных задачах управления когда выходной привод находится под воздействием силы ветра, приходится учитывать шумы, помехи и бороться с последствиями от их воздействия.

Ключевые слова: алгоритм, управление, двигатель, градиентный метод, рысканье, помехи, синтез, шум.

Введение

В последнее время существенно растут требования по точности. В XXI-ом веке требования допустимая одноканальная погрешность уменьшилась с 3–5%, до (одного) 1%. В экономических системах риск может быть связан не только со структурой экономического процесса, но и потерей устойчивости, поэтому положиться на синтез с учетом структуры объекта управления (ОУ) нельзя, что может привести к убыткам. Следует отметить, что борьба за точность в целом не ведется, точность не входит в список рекомендаций.

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № 5. С. 17–35.
© 2016. К.И. Волошиновский.

Прецизионные системы начали разрабатывать как направление уже давно. Однако, когда встает вопрос о выпуске готового изделия требуется заданную точность обеспечить. Кроме того, если рассматривать внутренние схемы измерительных приборов, то их тракты содержат последовательности промежуточных метрологических преобразований, что приводит к наличию мультипликативной погрешности, поэтому имеет смысл бороться за общую точность выполнения операции или измерительной операции, чтобы сократить сложность и габариты промежуточных схем. Оконечный анализ энтропии и неопределенности нет смыслы вести только для ОУ, нужно представлять систему вместе с алгоритмом который сокращает риски, выводит на заданные показатели, в том числе показатели точности и неопределенности.

Поэтому синтез алгоритмов управления первичен. Таким образом, энтропия выхода, зависит от структуры, которая предваряет выход системы. Алгоритм управления, имеющий универсальный характер с применением дифференциала, рассмотрим на примере двухмассовой системы с двигателем постоянного тока (ДПТ) и нагрузкой. Рассмотрим вопросы синтеза регуляторов для систем у которых по входу ОУ подается величина, которая имеет характер рассогласования между входом и выходом.

Двухмассовая система как объект управления

Двухмассовую систему с двигателем постоянного тока (ДПТ) (рис. 1), нагрузкой и жесткостью муфты C (K22) рассмотрим в двух вариантах, первый с параметрами, указанными в блоках, и группой параметров K2, в случае применения которых, использование ПИД-регулятора (пропорционального-интегрально-дифференциального) проблематично. В обоих случаях, если исключить помехи (Sw1, Sw2), отключить сглаживающий фильтр (Sw3), объект управления будет иметь расходящиеся характеристики, которые нет смысла приводить на графиках.

В качестве помехи можно рассматривать отклонение лопатки или элерона боеприпаса или авиамодели для доставки камеры видеонаблюдения в ветренную погоду.

В процессе применения ПИД-регулятора не удается выполнить управление гладким выходом после включения фильтра, и в случае объекта с проблематичными параметрами. При применении алгоритма, полученного на основе градиентного метода синтеза, алгоритм приобретает свойства устойчивости в обоих случаях, при проблематичном объекте система может становиться

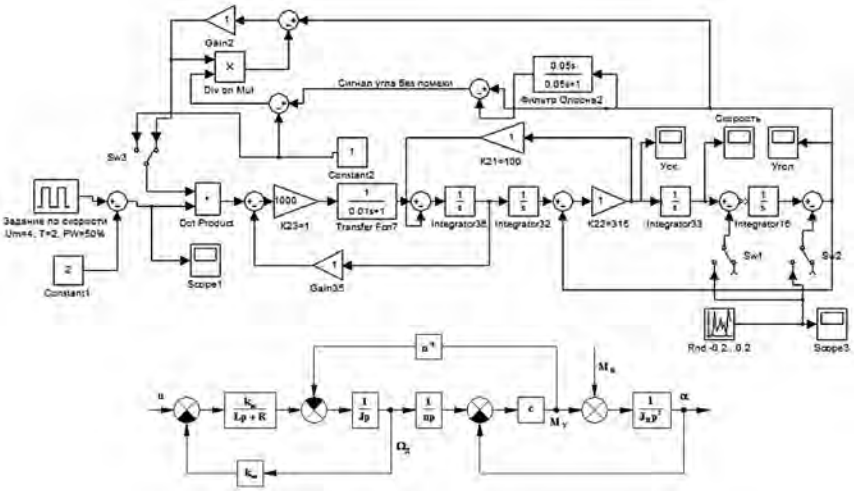

Рис. 1. Двухмассовая система как объект управления

не устойчивой. Однако, возникает вопрос, является ли градиент функционала четной степени, как вектор смещения в пространстве состояний системы причиной фиксации положения системы в пространственном седле. Можно показать, что не является, что ниже проиллюстрируем. Поэтому структуры, полученные на основе градиентного метода, следует признать перспективными для получения новых структур регуляторов, хотя поиск минимума осуществляется на базе экстремума, а не наименьшего значения. Если включить фильтр шума Sw3, то автономно объект управления приобретает свойство гладкого выхода. Проблема здесь состоит не в том, какой фильтр применить, а чтобы получить такой регулятор, который позволяет изменять выход по амплитуде согласно входу, для чего следует предусмотреть коэффициент регулирования числителя замкнутой системы. Шум выгодна наоборот «посадить в седло», но коэффициент финишной корректирующей обратной связи следует получить в процессе синтеза, с учетом заложенной структуры фильтра и схемы устранения шума, поэтому желательно выбрать ее простой, чтобы упростить процедуру синтеза завершающей обратной связи.

Пропорциональный интегрально-дифференциальный регулятор

ПИД регулирование не удается применить при всех вариантах параметров ДПТ. Но для набора параметров К1, указан-

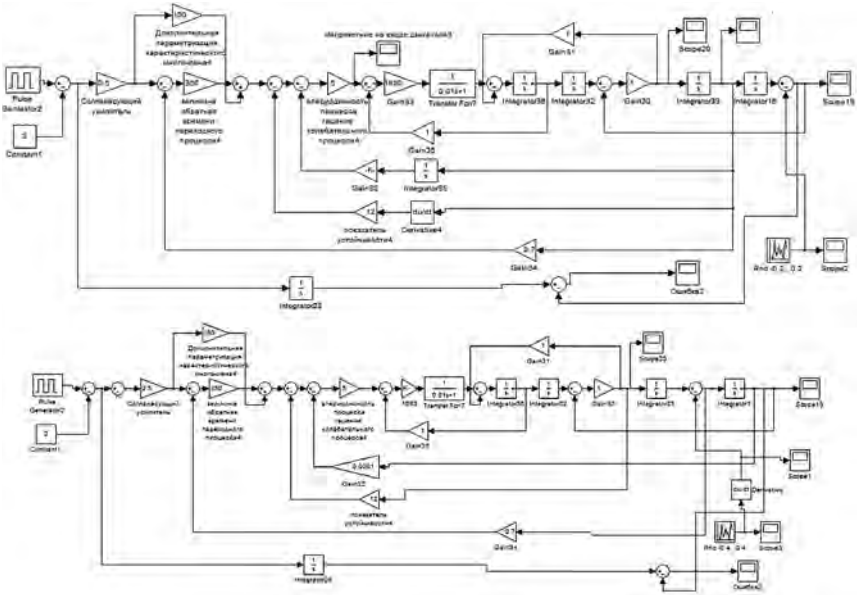

Рис. 2. ПИД-регулятор для двухмассовой системы с помехой

ных в блоках (рис. 1), можно предложить регулятор с помехой проявляющейся по углу (рис. 2), и помехой проявляющейся по скорости.

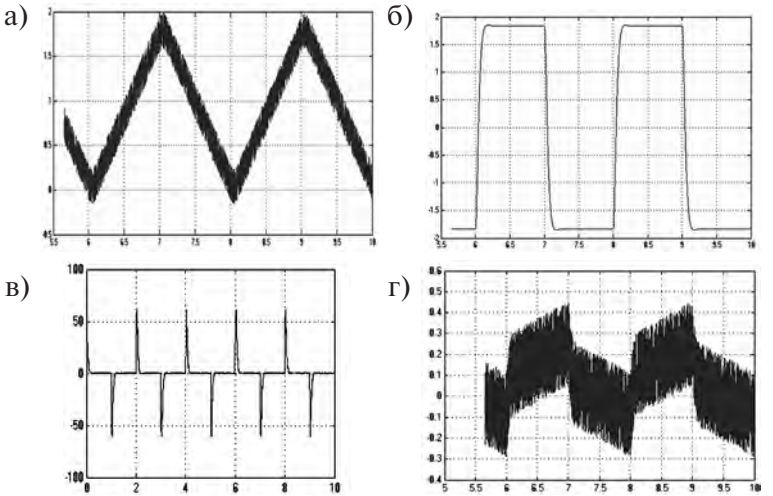

Рис. 3. Выходные характеристики системы с возмущением по углу: а) угол, б) скорость, в) ускорение, г) ошибка

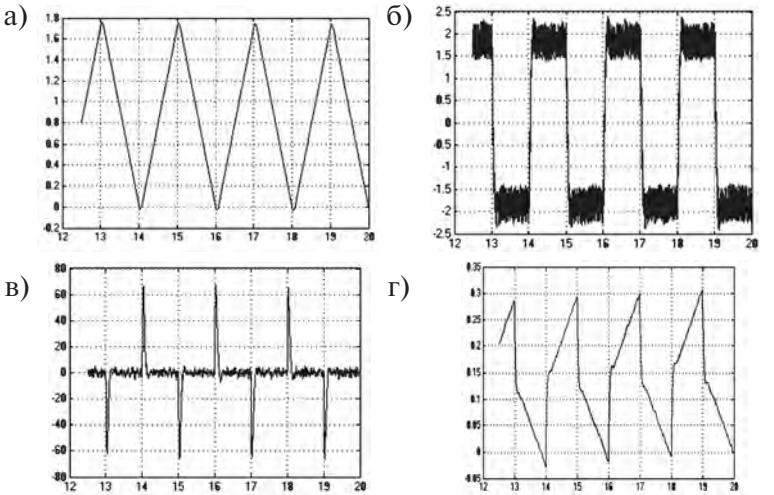

Рис. 4. Выходные характеристики системы с возмущением по скорости: а) угол, б) скорость, в) ускорение, г) ошибка

Включать фильтр Олсона в системе с ПИД-регулятором включать нет смысла поскольку, порядок системы нельзя перекрыть порядком регулятора. Тем не менее, можно посмотреть систему с помехой по скорости, тогда в той же системе, где сумматор на выходе перемещен между интеграторами можно наблюдать следующие характеристики (рис. 4).

Реализуемость такого регулятора можно повысить исключить дифференцирование и даже лишний блок интегрирования из обратной связи, графики выходов будут те же.

Синтез и применение алгоритма на основе градиентного метода

Уравнения объекта запишем в операторной форме:

$$W_0'(p) = \frac{\alpha(p)}{u(p)} = \frac{b_0'}{p^5 + a_4'p^4 + \ldots + a_1'p + a_0'} = \frac{N}{M(p)} \qquad (1)$$

$$M(p) = p[J_H n^2 JLp^4 + J_H n^2 JRp^3 + (cLJ_H + cn^2 JL + J_H n^2 k_m k_\Omega)p^2 + \\ + c(RJ_H + n^2 JR)p + cn^2 k_m k_\Omega] \qquad (2)$$

$$N = ck_m n \qquad (3)$$

Градиент функционала разницы между входом и выходом устремим к минимуму:

$$G(u) = \frac{1}{2}\left[\omega(t,u) - \omega_{\text{вх}}(t,u)\right]^2 \to \min \qquad (4)$$

Для того чтобы это условие или другое условие устойчивости было выполнено существуют разные варианты. Интересным здесь становится вариант при котором рассматривается неравенство, Действительно такой неравенство можно решать с коэффициентом запаса K, можно показать, что это и есть коэффициент финишной корректирующей обратной связи, но сама формула оконечного дифференциала будет другой, так же как структура оконечного алгоритма.

$$d \mid G(u) \mid < 0$$

Смысл применения такого метода в том, чтобы вектор градиент разницы всегда смотрел в сторону экстремума, но существует опасность, что он окажется локальным. Проведем моделирование покажем, что причина неустойчивости не сводится к «залипанию» вектора градиента.

Остановимся более подробно на варианте искусственного устремления функционала к нулю.

$$G^{\cdot}(u) \to 0 \qquad (5)$$

Пусть:

$$\frac{du}{dt} = \lambda \frac{dG(u)}{du}\text{, тогда } \dot{u} = k(\xi^{(4)} - \varphi^{(4)})\text{, где } k = -B_0\lambda \qquad (6)$$

Тогда если получить на основе формулы для дифференциалов входа, выхода и функционала, то такой параметр будет иметь характер адаптивной настройки финишной обратной связи. Порядок производных закона управления можно повысить, выполним условия вплоть до третьей производной:

$$u = k(\xi^{(3)} - \varphi^{(3)}) \qquad (7)$$

$$(p^3 + c_2p^2 + c_1p + c_0)\omega_M = \omega_{BX}(d_1p + d_0) \qquad (8)$$

$$\left(1 + \frac{c_2}{p} + \frac{c_1}{p^2} + \frac{1}{p^3}\right)\omega_M = \omega_{BX}\left(\frac{d_1}{p^2} + \frac{d_0}{p^3}\right) \qquad (9)$$

$$\omega_M = \omega_{BX}\left(\frac{d_1}{p^2} + \frac{d_0}{p^3}\right) - \omega_M\left(\frac{c_2}{p} + \frac{c_1}{p^2} + \frac{1}{p^3}\right) \qquad (10)$$

$$\omega_M = \omega_{BX}\frac{1}{p^2}\left(d_1 + \frac{d_0}{p}\right) - \omega_M\frac{1}{p}\left(c_2 + \frac{c_1}{p} + \frac{1}{p^2}\right) \qquad (11)$$

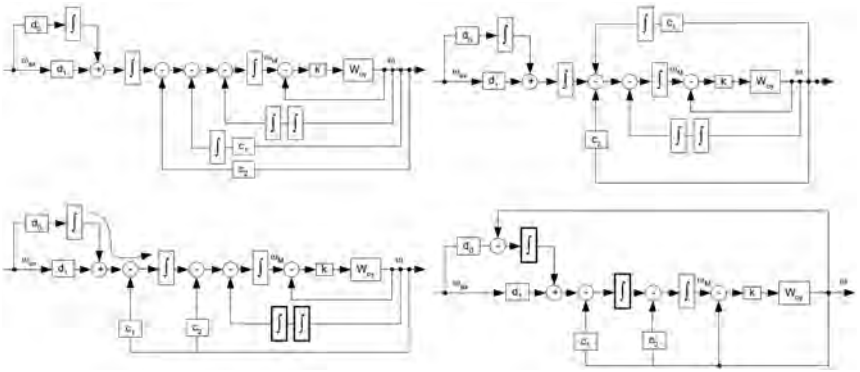

Рис. 5. Получение структуры регулятора на основе градиентного метода

$$\omega_M = \frac{1}{p}\left[\omega_{BX}\frac{1}{p}\left(d_1 + \frac{d_0}{p}\right) - \omega_M\left(c_2 + \frac{c_1}{p} + \frac{1}{p^2}\right)\right] \qquad (12)$$

Градиентный метод в пространстве состояний абсолютно валиден внутри рабочего диапазона по тому, что как только система вышла на локальный экстремум размещенный в вершине кривого пространственного «параболоида», окружающая поверхность сразу же меняется, и система ищет следующий, смещается и сама точка, которая была вершиной. Но временное отрабатывание на простой не исключено, т.е. иногда не исключена некоторая задержка. По краям диапазона градиентный алгоритм не абсолютно валиден, поскольку нахождение наилучшего приближения связано, не с поиском экстремума, а с поиском минимального значения, однако, следует выбирать рабочий диапазон регулятора так, чтобы предусмотреть правильный рабочий диапазон.

Результаты моделирования для двух групп параметров объекта управления

Финишную обратную связь с коэффициентом регулирования *K*, введем в виде комбинации входа и выхода через постоянный коэффициент.

Когда параметры объекта соответствуют более сложной системе по ускорению и по скорости наблюдается расходящийся процесс, но система все-таки проявляет свойства устойчивости на промежутке. А система с ПИД-регулятором в такой ситуации вообще не приносит результат, тем более, если добавить возмущение по выходу.

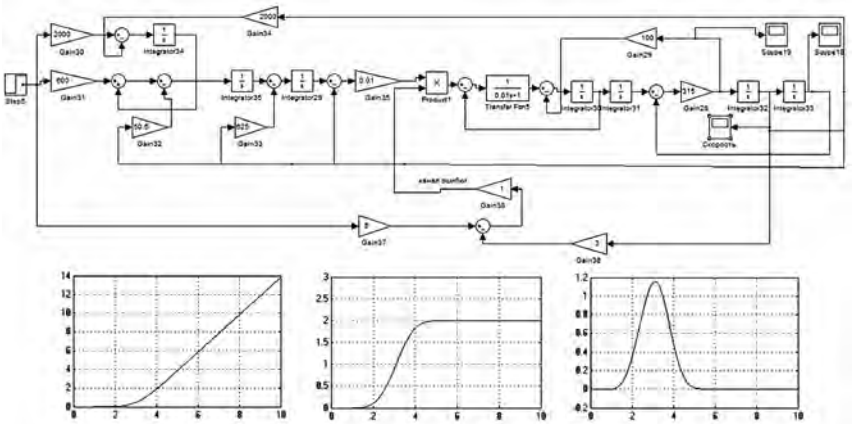

Рис. 6. Система с градиентным регулятором с группой параметров 1: а) угол, б) скорость, в) ускорение

Такие переходные процессы (рис. 7) заставляют задуматься о причинах возникновения неустойчивости в такой системе. Когда градиентный метод применяется в части обеспечения неравенства градиента модуля разницы выхода и входа, существует опасность попасть в область экстремума, и не выйти из нее поскольку градиент всегда направлен в сторону минимума, т.е. в экстремум такого локального параболоида. Когда, функционал устремляется к нулю искусственно, возникает желание посмотреть переходной процесс по градиенту. Видно, что причина неустойчивости кроется именно в объекте и его параметрах, в знании его структуры с учетом физического условия устойчивости, с четом необходимой частичной или полной идентификации, но так может быть не всегда как в данном случае, когда из схемы ОУ не следует метод обеспечения устойчивости. Если снять переходной процесс по градиенту, следует заметить, что применение квантования при расчете дифференциала меняет

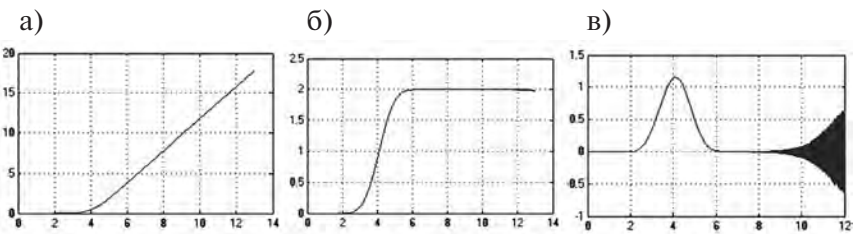

Рис. 7. Переходные процессе в системе с градиентным регулятором с группой параметров 2: а) угол, б) скорость, в) ускорение

метод пересчета модели в МатЛаб и переходные процессы меняются в зависимости от величины периода квантования. А сам дифференциал градиента следует брать по *u*, поэтому обычная формула дифференциала не очень-то и подходит. Однако, градиентный метод, при неединичных связях с не уточненной структурой, дает очень не плохой результат, что представляется с точки зрения теории управления несколько неожиданным, т.е. связи в среде моделирования близки к единицы, хотя и отличны от нее. Благополучная работа метода в базовой структуре параметрически-адаптивного алгоритма объясняется тем, что в процессе движения по фазовой траектории, пространство состоянии в системе координат *x, y, u, G* постоянно меняется и точка текущего положения мгновенно переходит из категории экстремума в обычную в переменном пространстве состояний.

Аналитика гладкого выхода. Обеспечение гладкого выхода

Одним из самых известных фильтров является фильтр Калмана. Однако, он предназначен только для того, чтобы устранить постоянную составляющую спектральной плотности шума, поэтому даже если его поставить, то при случайном текущем значении спектральной плотности. Поэтому устранить шум можно и в процессе простого синтеза.

Недостатком преобразования Фурье обычно является его чистая аналитичность, так как для синтеза нужно точное, а не приближенное представление, которое по Фурье обычно связано с разложением в бесконечный ряд с которым неудобно работать. Поэтому проведем аналитический синтез точно и получим модель пригодную для моделирования.

$$M_{\text{В}}(t) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{+\infty} S_{\text{В}}(j\omega)e^{j\omega t}d\omega \;;\; \alpha(t) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{+\infty} S_{\alpha}(j\omega)e^{j\omega t}d\omega \quad (13)$$

$$S_{\text{В}}(j\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} M_{\text{В}}(t)e^{-j\omega t}dt \;;\; S_{\alpha}(j\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \alpha(t)e^{-j\omega t}dt \quad (14)$$

Первичный преобразования приводят к жесткой системе в которой следует предусмотреть демпфер-коэффициент для числителя, который позволял бы влиять на амплитуду и сделать выход системы гибким.

Выполним синтез из условия минимума дисперсии

$$D(\ddot{\alpha}) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{+\infty} S_{\text{ускорения}}(\omega)d\omega \to \min .$$

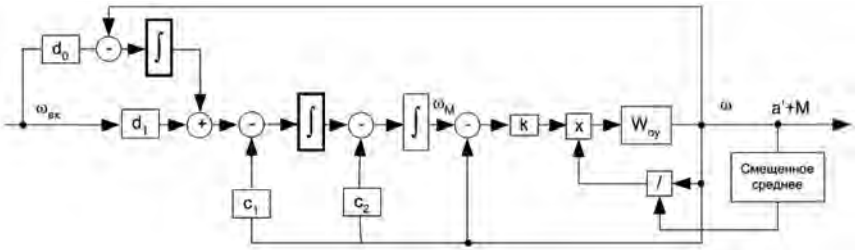

Рис. 8. Структура системы для обеспечения гладкости выхода

$$u' = k(\ddot{\alpha}_M - \ddot{\alpha} - M) = k(\dot{\omega}_M - \dot{\omega}_{BX} - \tfrac{1}{p}M) \tag{15}$$

$$u' = k(\ddot{\alpha}_M - \ddot{\alpha} - M) = k(\dot{\omega}_M - \dot{\omega}_{BX} - \tfrac{1}{p}M) \tag{16}$$

$$uW_{OY}(p) \neq \dot{\alpha} + M \tag{17}$$

$$u'W_{OY}(p) = \dot{\alpha} + M \tag{18}$$

$$uW_{OY}(p) = \dot{\alpha}\,;\ \frac{u'}{u} = \frac{\dot{\alpha} + M}{\dot{\alpha}} \tag{19}$$

Таким образом, скорректированное напряжение составит:

$$u_k = u \times \frac{\dot{\alpha} + M}{\dot{\alpha}}, \tag{20}$$

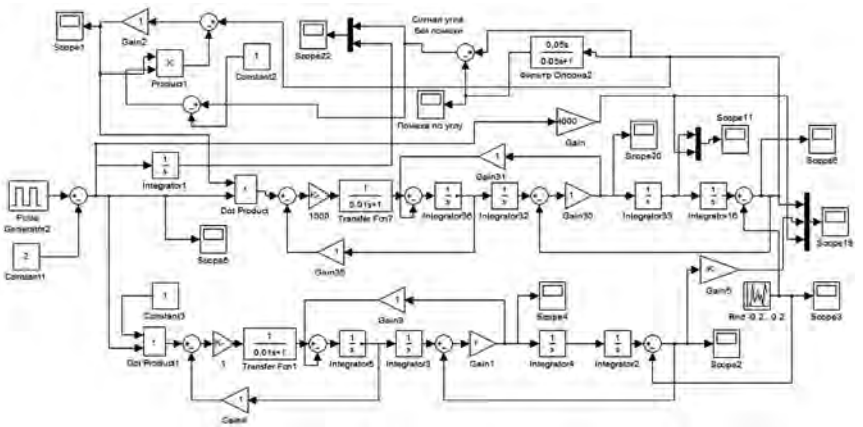

Рис. 9. Двухмассовая система с рысканьем по выходу с регулятором и фильтром и без

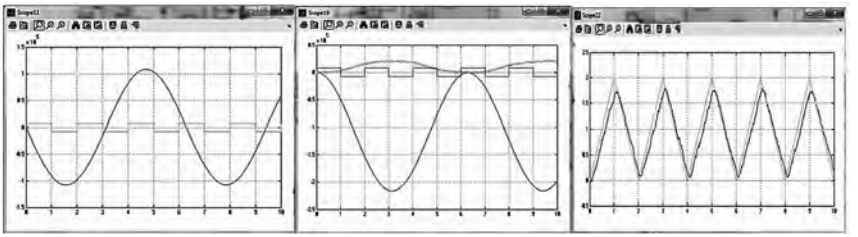

Рис. 10. Задание по углу и сигнал с выхода фильтра Олсона и выхода системы

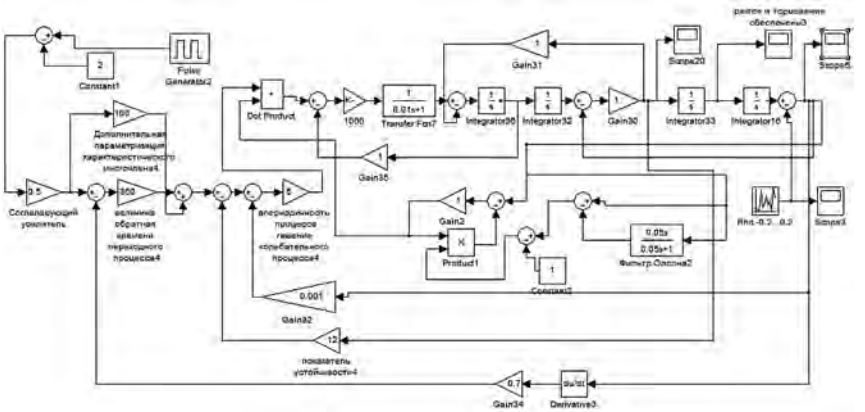

Рис. 11. Двухмассовая система с ПИД-регулятором и обеспечением гладкого выходом

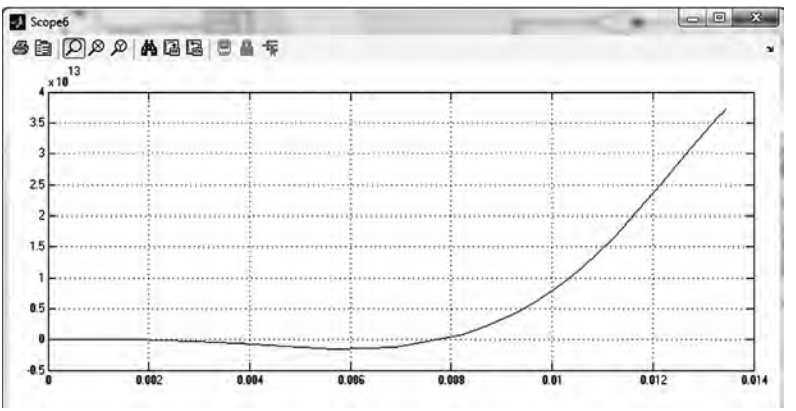

Рис. 12. Гладкого выход система с ПИД-регулятором и ДПТ

Вместо фильтра смещенного среднего можно использовать фильтр Олсона, для низкочастотной помехи, например для рыскания под действием силы ветра.

Сравним объект с фильтром для получения гладкого выхода с объектом без управления.

Синусоидальный выход, почти не меняется при изменении входа, т.е. система слишком зажата, но выход при этом гладкий. Остается ввести коэффициент демпфирования коррекцию по амплитуде числителя. В системе с фильтром Олсона сигнал не абсолютно, гладкий, но можно использовать другой фильтр. Шероховатость после фильтра Олсона не постоянная, т.е. фильтром Калмана ее не устранить.

В системе с ПИД-регулятором выход достаточно гладкий, но наблюдается неустойчивость.

Несобственный интеграл для дисперсии для двухмассовой системы. Управляемость двухмассовой системы

Приведем к одному аргументу:

$$\beta = \frac{1}{2\pi j}\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{u(p)ck_m - ck_m\Omega_Д k_\omega}{(J_Н p^2 - M_В(p))\left\{(c + Jn^2p^2) + Jn^2p^2\right\}(Lp + R)}dp \quad (21)$$

Заметим, что под знаком несобственного интеграла по сути дробь, которая может раскладываться на элементарные дроби, поскольку вырожденное ядро экспоненты свойственное, например, для преобразования Лапласа в данном интеграле отсутствует, поэтому вообще говоря ничего не мешает такой интеграл взять.

X, Y – независимые параметры (мы сами их формируем, или они внешние, т.е. их можно выносить за знак интеграла), т.е. они автономны и независимы, и определяются внешними алгоритмами, что приводит интеграл к описанию несобственного интеграла с независимым параметром:

$$\beta_2 = -\frac{1}{2\pi j}\int_{-\infty}^{+\infty}\frac{1}{J_H p^2 - X}\frac{ck_m\Omega_Д k_\omega}{\left\{(c + Jn^2p^2) + Jn^2p^2\right\}(L / s + R)}dp =$$

$$= -\frac{1}{2\pi j}\int_{-1}^{+1}\frac{1}{J_H / s^2 - X}\frac{ck_m\Omega_Д k_\omega}{\left\{(c + Jn^2 / s^2) + Jn^2 / s^2\right\}(L / s + R)}d1 / s =$$

$$= \frac{ck_m}{2\pi j}\int_{-1}^{+1}\frac{1}{J_H / s^2 - X}\frac{\Omega_Д k_\omega}{\left\{(c + Jn^2 / s^2) + Jn^2 / s^2\right\}(L / s + R)s^2}ds \quad (22)$$

Т.е. можно считать, что управляющие напряжение и возмущение связаны через коэффициенты уравнением.

$$\beta_1 = \frac{ck_m}{2\pi j}\int_{-1}^{+1}\frac{Y}{s^2(X - J_{\text{Н}} / s^2)\left\{(c + Jn^2 / s^2) + Jn^2 / s^2\right\}(L / s + R)}ds \tag{23}$$

Вывод. Здесь видно, что такое уравнение устанавливает связь через коэффициент, который нужно получить расчетным путем, а для управления желательно, чтобы коэффициенты определялись в процессе работы системы, или зависели от параметров эталонной модели. Кроме того, дисперсия зависит при таком подходе от момента инерции нагрузки. Поэтому для управления дисперсией выхода следует прибегнуть к робастному алгоритму, т.е при условии неопределенности внутренней структуры, которая определяет эту дисперсию.

Однако, интересно взять интеграл, чтобы посмотреть как и какие параметры системы влияют на дисперсию, можно даже говорить о характеристиках.

$$\beta_2 = \frac{ck_m\Omega_{\text{Д}}k_\omega}{2\pi j}\int_{-1}^{+1}\frac{1}{J_{\text{Н}} - Xs^2}\frac{s}{\left\{(c + Jn^2 / s^2) + Jn^2 / s^2\right\}(L + Rs)}ds \tag{24}$$

$$\beta_2 = \frac{ck_m\Omega_{\text{Д}}k_\omega}{2\pi j}\int_{-1}^{+1}\frac{1}{J_{\text{Н}} - Xs^2}\frac{s^3}{\left\{(cs^2 + 2Jn^2\right\}(L + Rs)}ds \tag{25}$$

Далее видно, что во второй составляющей важную роль играет не само возмущение по ускорению, а его вторая производная, т.е. возмущение правильно ввести именно по ускорению.

$$\beta_2 = \frac{ck_m\Omega_{\text{Д}}k_\omega}{2\pi j\mu}\int_{-1}^{+1}\frac{1}{J_{\text{Н}} - Xs^2}\frac{\mu s^3}{\left\{(cs^2 + 2Jn^2\right\}(L + Rs)}ds$$

$$\frac{1}{J_{\text{Н}} - Xs^2}\frac{s^3}{\left\{(cs^2 + 2Jn^2\right\}(L + Rs)} = \frac{A}{J_{\text{Н}} - Xs^2} + \frac{B}{cs^2 + 2Jn^2} + \frac{C}{L + Rs}$$

$$\frac{1}{J_{\text{Н}} - Xs^2}\frac{\mu s^3}{\left\{(cs^2 + 2Jn^2\right\}(L + Rs)} = \frac{As}{(L + Rs)(cs^2 + 2Jn^2)} +$$

$$+ \frac{B}{J_{\text{Н}} - Xs^2} + \frac{C}{L + Rs}$$

(здесь член, содержащий возмущение, выделился отдельно)

$$As(J_{\text{Н}} - Xs^2) + B(L + Rs)(cs^2 + 2Jn^2) + C(cs^2 + 2Jn^2) = \mu s^3$$

$$AsJ_{\text{Н}} - AXs^3 + B(Lcs^2 + L2Jn^2 + Rcs^3 + Rs2Jn^2) +$$
$$+Ccs^2 + C2Jn^2 = \mu s^3$$

$$AsJ_{\text{Н}} - AXs^3 + BLcs^2 + BL2Jn^2 + BRcs^3 + BRs2Jn^2 +$$
$$+Ccs^2 + C2Jn^2 = \mu s^3$$

$$3 : BRc - AX = \mu$$

$$2 : BLc + Cc = 0$$

$1 : BR2Jn^2 + AJ_{\text{Н}} = 0$ (4 уравнения, а не известных три, поэтому кажется, что лучше ввести «мю»)

$$0 : BL2Jn^2 + C2Jn^2 = 0$$

Решаем линейную систему в Mapple7:

```
> eqn1:= m = B*R*c-A*X;
> eqn2:= 0=B*L*c+C*c;
> eqn3:=0=B*R*2*J*n*n+A*Jn;
> eqn4:=B*L*2*J*n*n+C*2*J*n*n;
```

$$\text{eqn1:} = m = B\,R\,c - A\,X$$
$$\text{eqn2:} = 0 = B\,L\,c + C\,c;$$
$$\text{eqn3:} = 0 = 2\,B\,R\,J\,n^2 + A\,Jn;$$
$$\text{eqn4:} = 2\,B\,L\,2\,J\,n^2 + 2\,C\,J\,n^2;$$

```
> solve( {eqn1, eqn2, eqn3, eqn4}, {A, B, C, m} );
```

$$\left\{C = -BL,\ A = -2\frac{BRJn^2}{Jn},\ m = \frac{BR\left(cJn + 2Jn^2X\right)}{Jn},\ B = B\right\}$$

«*B*» переменный параметр, т.е. есть возможность для демпфирования параметров.

Управляющее напряжение является все-таки изображением и функцией $1/p$ поэтому результат нужно получить в таком виде, чтобы он содержат интегрирование единичного или большего порядка.

Учитывая что *X* нельзя выносить представим другие варианты решения линейной системы с учетом вариации параметра *B*:

$$C = -B;\ \ A = -2\frac{BRJn^2}{J_H};\ \ m = 1;\ \ B = \frac{J_{\text{Н}}}{\text{c}J_{\text{Н}} + 2Jn^2\text{X}} \qquad (26)$$

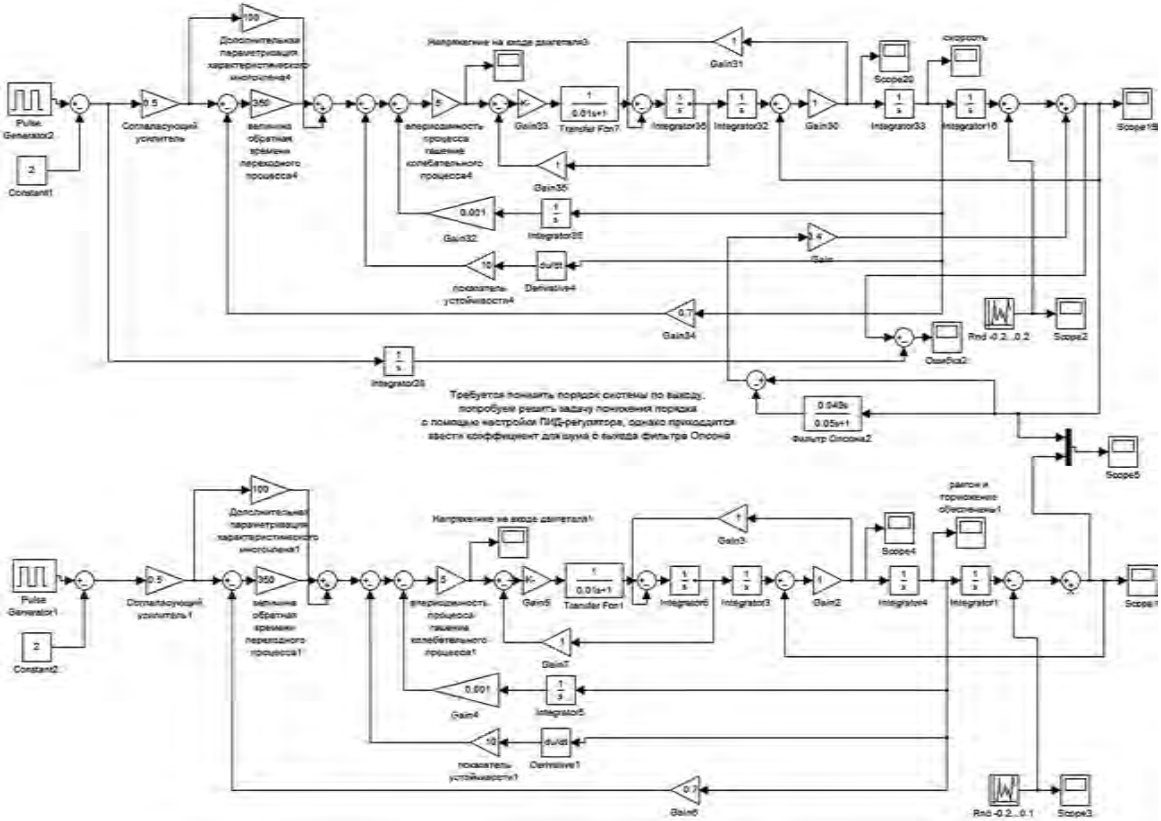

Рис. 13. Системе с ПИД-регулятором и фильтром Олсона

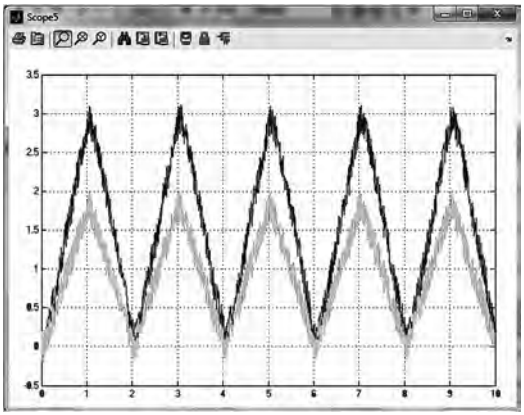

Рис. 14. Переходные процессы в системе с ПИД-регулятором и фильтром Олсона на базе сумматора

Однако, при таком подходе, не выделить член, содержащий *X*, поэтому нет смысла продолжать выкладки.

Поэтому и интересные все варианты «Масла-масляного» будь-то интеграл или параметр.

Вывод: Вторая часть интеграла управляема с учетом возмущения, до конца можно выкладки не доводить, так как один параметр можно варьировать.

Теперь рассмотрим первую часть интеграла:

$$\beta_1 = \frac{1}{2\pi j}\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{u(p)ck_m}{\left(J_{\text{Н}}p^2 - M_{\text{В}}(p)\right)\left\{\left(c + Jn^2p^2\right) + Jn^2p^2\right\}(Lp + R)}dp \quad (27)$$

$$\beta_1 = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\nu Yck_m}{\left(J_{\text{Н}}p^2 - X\right)\left\{\left(c + Jn^2p^2\right) + Jn^2p^2\right\}(Lp + R)}dp \quad (28)$$

Сравним знаменатель со знаменателем второй части.

$$\frac{1}{J_{\text{Н}} - Xs^2}\,\frac{\mu s^3}{\left\{cs^2 + 2Jn^2\right\}(L + Rs)} \quad (29)$$

Знаменатель такой же как и для первой.

Вывод: Система полностью управляема с учетом возмущения.

Роль фильтра в системе

Роль фильтра в системе состоит не только в том, чтобы устранить шум сам по себе. Проникая в систему, шум влияет на размах амплитуды выхода, что критично отработки задания пово-

ротным механизмом, например при повороте элерона в процессе рыскания.

Если подавать выход с фильтра Олсона, через коэффициент, то можно отрегулировать изменение угла от 0 до 3,14 радиан, в отличие от неполного угла без фильтра. Поэтому наиболее важной проблемой является не сам дребезг, а корректировка выхода с тем, чтобы устранить влияние шума по целевой амплитуде.

Заключение

Чтобы система была устойчива и работала правильно, необходимо обеспечить тенденцию, чтобы при правильном изменении управляющего напряжения, изменение выхода также происходило в правильном направлении. Чтобы обеспечить тенденцию следует рассматривать функционал, т.е. требуется согласовать градиент ошибки системы и градиент изменения управляющего напряжения. Таким образом, основным методом получения дополнительных уравнений оказывается, составление уравнений связи или структуры для разных входных воздействий, с универсализацией структуры связи или структуры системы.

В случае когда поворачивается элерон или лопатка с постоянной скоростью, т.е. имеет место линейное изменение угла или по ломаной, достаточно рассмотреть статический и динамический режим и объединить структуры регуляторов в одну универсальную структуру. Если предполагается более сложное изменение угла по выходу, с отработкой рысканья, то для другого типового входа следует также выполнить синтез и объединить три структуры, в общую универсальную. Если заранее известно, что отдельное воздействие отрабатывается универсальной связью или структурой, то комбинация таких отдельных воздействий также отрабатывается в виде суммы, поэтому дальше можно рассматривать реакции на произведения типовых входных воздействий, однако можно минимизировать или четко определить необходимый их набор.

Фильтрация шумов перспективна в смысле возможности обеспечения гладкого выхода разными способами. Чтобы системы с гладким выходом не была слишком жесткой, в числитель замкнутой системы необходимо ввести дополнительный параметр для принудительного регулирования числителя замкнутой системы. В случае когда система не жесткая, например с фильтрацией на базе сумматора, дребезг необходимо устранять дополнительно, но по крайней мере амплитуды сигналов оказываются согласованными в рамках установленного рабочего диапазона,

в случае двухмассовой системы с двигателем постоянного тока рабочий диапазон —изменение угла в пределах 360 градусов, т.е. полный оборот. Таким образом, шум и рыскание по выходу приводят к неполно оборотной реакции исполнительного двигателя по выходу системы через редуктор и муфту.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бесекерский В.А.*, *Попов Е.П.* Теория систем автоматического регулирования. – М., 1966. – 992 с.
2. Сборник задач по теории автоматического регулирования и управления / Под ред. В.А. Бесекерского, 5-е изд., перераб. – М.: Наука, 1978. – 512 с.
3. *Андреев Н.И. и др.* Задачник по теории автоматического управления: Учеб. пособие для вузов / Под ред. А.С. Шаталова, 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1979. – 544 с.
4. *Певзнер Л.Д.* Практикум по теории автоматического управления. Учебное пособие. – М.: Высшая школа, 2006. – 590 с.
5. *Крутько П.Д.* Вариационные методы синтеза систем с цифровыми регуляторами. – М.: Советское радио, 1967. – 440 с.
6. *Певзнер Л.Д.* Теория систем управления. – М.: Изд-во МГГУ, 2002. – 472 с.
7. *Голованов М.А.*, *Иванов М.А.* Теория цифровых систем автоматического управления. Учебное пособие. Ч. 1. – М.: Изд-во МГТУ. 1990. – 70 с., ил.
8. *Волошиновский К.И.* Исследование и испытание и приборов и систем. Учебное пособие. – М.: МГГУ, 2014. – 120 с.
9. *Тетельбаум И.М., Шнейдер Ю.Р.* 400 схем для АВМ. – М.: Энергия, 1978. – 248 с.
10. *Козаченко В.Ф.* Микроконтороллеры. Руководство по применению 16-разрядных микроконтроллеров Intel MSC-196/296 во встроенных системах. – М.: Изд-во ЭКОМ, 1997. – 688 с.
11. *Олсон Г., Пиани Д.* Цифровые системы автоматизации и управления. – СПб.: Невский диалект, 2001. – 557 с.
12. *Херреро Д., Уиллонер Г.* Синтез фильтров / Под. ред. И.С. Гоноровского. – М.: Советское радио, 1971. – 231 с. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Волошиновский Кирилл Иванович – кандидат технических наук, доцент, e-mail: gas7dev@gmail.com, МГИ НИТУ «МИСиС».

Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2016. No. 5, pp. 17–35.

UDC 621.3.07

K.I. Voloshinovskiy

CONTROL OF DOUBLE MASS SYSTEM WITH DIRECT CURRENT DRIVE AND OUTPUT YAW

A control object of an automatic system may be either an engineering unit, for instance, a drive, or an economical, metrological or other system. Before starting analyzing economi-

cal efficiency or entropy as a characteristic of uncertainty, in particular, metrological uncertainty, it is required that the analysis uses a control algorithm if the target values of control quality have been achieved for sure. Therefore, algorithms should be available and it should be understood how the algorithms are obtained, and which finite structure rather than primary objects of control are subjected to the analysis of entropy and dispersion. A system with a control algorithm should be stable while a control object not always possesses a physical property–condition, fulfillment of which results in stability of output of the control object, or this property–condition is unknown beforehand. Furthermore, it is challenging both to construct an algorithm, to achieve a preset dynamic accuracy and to control uncertainty, from the viewpoint of its minimization, which makes sense only for a system with a control algorithm. Moreover, real-world problems of control, when output drive is under force of wind, have to account for noise and interference and to combat their aftereffects.

Key words: algorithm, control, drive, gradient method, yaw, interference, synthesis, noise.

AUTHORS

Voloshinovskiy K.I., Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor,
e-mail: gas7dev@gmail.com,
Mining Institute, National University of Science and Technology «MISiS»,
119049, Moscow, Russia.

REFERENCES

1. Besekerskiy V. A., Popov E. P. *Teoriya sistem avtomaticheskogo regulirovaniya* (Theory of automatic adjustment systems), Moscow, 1966, 992 p.

2. *Sbornik zadach po teorii avtomaticheskogo regulirovaniya i upravleniya*. Pod red. V. A. Besekerskogo, 5-e izd. Collection of problems on automatic adjustment and control theory. Besekerskiy V. A. (Ed.) 5th edition), Moscow, Nauka, 1978, 512 p.

3. Andreev N. I. *Zadachnik po teorii avtomaticheskogo upravleniya*: Uchebnoe posobie dlya vuzov. Pod red. A. S. Shatalova (Book of problems on automatic control theory. Higher educational aid. Shatalov A. S. (Ed.), 2nd edition), Moscow, Energiya, 1979, 544 p.

4. Pevzner L. D. *Praktikum po teorii avtomaticheskogo upravleniya*. Uchebnoe posobie (Workshop on automatic control theory. Educational aid), Moscow, Vysshaya shkola, 2006, 590 p.

5. Krut'ko P. D. *Variatsionnye metody sinteza sistem s tsifrovymi regulyatorami* (Variation methods of synthesis of systems with digital governors), Moscow, Sovetskoe radio, 1967, 440 p.

6. Pevzner L. D. *Teoriya sistem upravleniya* (Theory of control systems), Moscow, Izd-vo MGGU, 2002, 472 p.

7. Golovanov M. A., Ivanov M. A. *Teoriya tsifrovykh sistem avtomaticheskogo upravleniya*. Uchebnoe posobie. Ch. 1(Theory of digital systems of automatic control. Educational aid, part 1), Moscow, Izd-vo MGTU. 1990, 70 p.

8. Voloshinovskiy K. I. *Issledovanie i ispytanie i priborov i sistem*. Uchebnoe posobie (Analysis and testing of instrumentation and systems. Educational aid), Moscow, Izd-vo MGGU, 2014, 120 p.

9. Tetel'baum I. M., Shneyder Yu. R. *400 skhem dlya AVM* (400 circuits for analog computers), Moscow, Energiya, 1978, 248 p.

10. Kozachenko V. F. *Mikrokontorollery. Rukovodstvo po primeneniyu 16-razryadnykh mikrokontrollerov Intel MSC-196/296 vo vstroennykh sistemakh* (Microcontrollers. Guidance on use of 16-bit microcontrollers IntelMSC196/296 in inhouse systems), Moscow, Izd-vo EKOM, 1997, 688 p.

11. Olson G., Piani D. *Tsifrovye sistemy avtomatizatsii i upravleniya* (Digital systems of control automation), Saint-Petersburg, Nevskiy dialekt, 2001, 557 p.

12. Kherrero D., Uilloner G. *Sintez fil'trov*. Pod. red. I. S. Gonorovskogo (Synthesis of filters. Gonorovskiy I. S. (Ed.)), Moscow, Sovetskoe radio, 1971, 231 p.