УДК 539.3:004.932

©2018. **В.Е. Болнокин, В.Г. Выскуб, В.Н. Дианов, В.И. Сторожев**

СТРУКТУРНЫЕ РЕШЕНИЯ В УПРАВЛЕНИИ СКАНАТОРАМИ С УПРУГИМИ СВЯЗЯМИ

Рассмотрены особенности управления сканаторами с упругими связями. Проведен анализ различных структурных решений задач стабилизации, позиционирования, программного движения. Показана целесообразность использования многорежимного управления.

Ключевые слова: *сканатор, упругие связи, интерференционный измеритель, оптимальное адаптивное управление.*

Введение. Среди конструкций оптико-механических сканаторов можно выделить группу устройств, которым свойственно наличие выраженных упругих связей. Такие связи могут быть принципиально заложены в устройства сканирования на конструкторском уровне, как, например, в гальванометрах на растяжках или MEMS-сканаторах торсионного типа, или проявлять себя вследствие неизбежного использования в механических конструкциях деформируемых элементов с упругими свойствами. При этом задачами управления сканаторами с учетом упругих связей является не только оптимизация колебательных режимов, но и другие характерные для сканирующих систем режимы такие, как позиционирование, программное движение, слежение. Упругие связи усложняют задачу управления, выполнения заданных требований к качественным показателям в указанных режимах. В случае требований высокоточного управления возникает актуальная задача выбора наиболее рационального структурного решения в конкретных приложениях.

В представляемой статье рассмотрены различные варианты структурных решений в области синтеза систем управления сканаторами с упругими связями.

1. Постановка задачи, решение на базе линейного подхода и его ограничения. Двумерный однозеркальный оптико-механический сканатор с магнитоэлектрическим приводом для высокоточного считывания и воспроизведения графической информации является объектом управления, в котором выражены деформативные свойства, связанные с упругостью токовой рамки, условиями закрепления ее с оправой зеркала [1]. Исследования упуругих связей сканатора показали сложный многомодовый характер этих связей. Динамика сканатора зависит от жесткости привода, и его модель с сосредоточенными параметрами может быть описана дифференциальным уравнением седьмого порядка, полученным на основании уравнений Лагранжа второго рода и уравнений магнитоэлектрического взаимодействия [1].

Упрощенная для практических оценок модель сканатора для каждой координаты может быть представлена двумя последовательными колебатель-

ными звеньями и описана передаточной функцией угол–напряжение

$$W(S) = \frac{\varphi(S)}{U(S)} = \frac{K_{\text{об}}}{\left[T_1^2 S^2 + 2\xi_1 T_1 S + 1\right]\left[T_2^2 S^2 + 2\xi_2 T_2 S + 1\right]}. \qquad (1)$$

Здесь $\varphi(S)$, $U(S)$ – операторные выражения угла поворота зеркала и управляющего напряжения; $K_{\text{об}}$ – коэффициент передачи сканатора; S – комплексная переменная преобразования Лапласа [1]. Первое низкочастотное колебательное звено (T_1, ξ_1) отражает наличие гравитационного момента при дисбалансе подвижной части сканатора, а второе звено (T_2, ξ_2) – упругие связи рамки привода.

Конструкция сканатора предусматривает наличие интерференционного измерителя угловых отклонений зеркала по двум координатам с чувствительностью 0.1 угл. с. в диапазоне до двух десятков угловых градусов. Измеритель дискретного типа позволяет создать систему управления положением зеркала в пространстве, обеспечить его стабилизацию и перемещения с погрешностью, допускаемой измерительным преобразователем.

Типовыми режимами работы сканатора являются быстрый переход из одного фиксированного положения в другое, программные режимы непрерывного сканирования заданной поверхности или движения по заданной траектории с предельным быстродействием, что требует согласованного движения сканирующего элемента по двум координатам. Построчное сканирование по траекториям прямоугольной формы реализуется за счет колебательных движений по двум взаимно перпендикулярным осям. Сканирование поля круглой формы может осуществляться по спиральным и розеточным траекториям посредством модулированных гармонических воздействий на координатные приводы.

Структурная реализация модального управления сканатором по состоянию является проблематичной. Желаемое распределение корней характеристического уравнения его колебательной системы оказывается возможным только в небольшом диапазоне. Кроме измерения переменных состояния колебательной системы сканатора, даже при существенном различии постоянных времени колебательных звеньев, в число ограничений метода следует отнести высокие коэффициенты усиления и управляющие сигналы, нарушающие линейность рассматриваемой колебательной системы.

Одним из структурных решений однокоординатного управления описанным сканатором с упругими связями является система управления с интерференционной обратной связью по положению и стабилизирующей обратной связью по скорости (рис. 1). На рис. 1 отражены функциональные элементы системы: объект управления – сканатор с передаточной функцией $W_{\text{об}}(S)$; усилитель мощности с коэффициентом усиления $K_{\text{у}}$; интерференционный измеритель перемещений с коэффициентом передачи $K_{\text{дп}}$; цифровое сравнивающее устройство и цифро-аналоговый преобразователь с коэффициентом передачи $K_{\text{эс}}$; датчик скорости с коэффициентом K_c; ошибка обработки входных воздействий ε; функция угла поворота зеркала φ; функция задаю-

щего входного воздействия $\mathbf{g(t)}$. Остальные обозначения на рис. 1 совпадают с принятыми в [1].

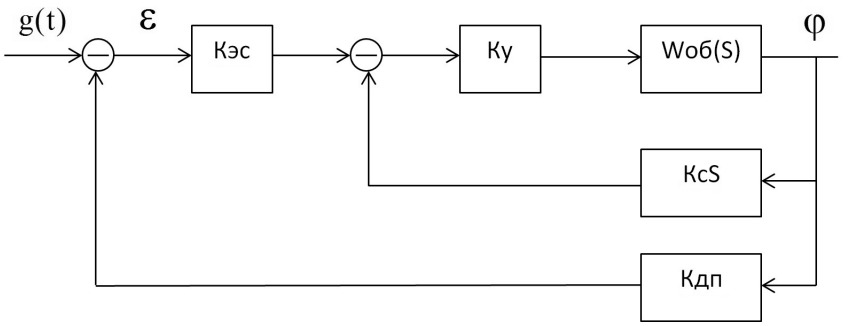

Рис. 1. Структурная схема системы управления сканатором с пропорциональным законом управления.

Частотный метод синтеза линеаризованной системы управления сканатором по заданному показателю колебательности замкнутой системы устанавливает запретные области для фазо-частотной и амплитудно-частотной характеристик разомкнутой системы вблизи частоты среза [2]. При использовании модели линеаризованной системы управления с обратной связью по скорости, условие получения заданного показателя колебательности M накладывает ограничения на параметры звена упругости и коэффициент усиления K разомкнутого по углу контура:

$$T_2 \leq \frac{1}{K}\frac{M}{M+1}2\xi_2. \tag{2}$$

Моделирование и эксперименты с реальным объектом показали, что поведение замкнутой системы при отработке линейного воздействия приближенно отвечает описанию ее в виде эквивалентного колебательного звена, параметры которого зависят от свойств упругости сканатора. Максимальное значение ошибки $\varepsilon_{\max}$ при переходном процессе зависит от скорости изменения входного воздействия и уменьшается с увеличением жесткости сканатора.

Эффективным средством повышения быстродействия системы в линейных режимах является комбинированное управление. Введение дополнительного воздействия, пропорционального частоте импульсов задания, оказывает форсирующее воздействие на переходный процесс и тем самым уменьшает максимальную динамическую ошибку отработки задания. Так, для сканатора с параметрами $T_1 = 0.07$ с., $\xi_1 = 0.4$, $T_2 = 0.0005$ с., $\xi_2 = 0.1$ эффективность составила 1.4 [3].

Дискретный характер съема информации интерференционного измерителя, его большой динамический диапазон, дальнейшее цифро-аналоговое преобразование определяют принципиальную нелинейность системы. Увеличение коэффициентов усиления с целью повышения быстродействия приводит

к автоколебательному режиму, параметры которого зависят от линейной и нелинейной частей системы. Начальный участок нелинейной характеристики определяет автоколебательный процесс в режиме стабилизации и отработку "медленных", т. е. с небольшой ошибкой отработки, входных воздействий. При анализе методом гармонической линеаризации рассмотрение нелинейности как безгистерезисной позволяет рассматривать только синфазную составляющую первой гармоники на выходе нелинейного элемента. Выражение для нахождения частоты автоколебаний ω_a в приведенной структурной схеме имеет вид

$$\omega_a = \sqrt{\frac{2\xi_1 T_1 + 2\xi_2 T_2 + K_{\text{у}} K_{\text{об}} K_{\text{с}}}{2T_1 T_2(\xi_1 T_2 + \xi_2 T_1)}}. \tag{3}$$

При этом соотношение для нахождения амплитуды автоколебаний A по известному коэффициенту гармонической линеаризации $q(A)$ может быть записано в форме

$$q(A) = \frac{(T_1^2 + T_2^2 + 4\xi_1\xi_2 T_1 T_2)\omega_a^2 - \omega_a^4 T_1^2 T_2^2 - 1}{K_{\text{у}} K_{\text{об}} K_{\text{дп}} K_{\text{эс}}}. \tag{4}$$

Дополнительные нелинейности, имеющиеся в системе и сканаторе, увеличивают амплитуду автоколебаний. Описанный закон управления позволяет получить для сканатора с приведенными параметрами стабилизацию в автоколебательном режиме с амплитудой 1–2 единицы отсчета интерференционного измерителя.

2. Синтез структурных решений логического управления. Учитывая числоимпульсный сигнал обратной связи интерференционного измерителя, стабилизацию сканатора в некоторых случаях удобно реализовать с помощью логического закона управления, в котором используется релейное представление отклонения системы от задания и его тенденции во времени [4] и, соответственно, используется только информация о знаках ошибки и скорости ошибки положения. При этом, особенно на малых скоростях, появляется возможность отказаться от датчика скорости на основе цифрового или аналогового частотомеров, которые являются дискретными устройствами.

Структурная схема системы логического управления сканатором приведена на рис. 2, где символом **u** указан релейный управляющий сигнал.

Блок управления в зависимости от знаков ошибки ε и скорости изменения ошибки $\dot{\varepsilon}$ формирует релейные управляющие сигналы

$$\begin{array}{lll} u = U_{\max} & \text{при} & \varepsilon > 0,\ \dot{\varepsilon} > 0; \\ u = U_{\min} & \text{при} & \varepsilon > 0,\ \dot{\varepsilon} < 0; \\ u = 0 & \text{при} & \varepsilon = 0; \\ u = -U_{\max} & \text{при} & \varepsilon < 0,\ \dot{\varepsilon} < 0; \\ u = -U_{\min} & \text{при} & \varepsilon < 0,\ \dot{\varepsilon} > 0. \end{array} \tag{5}$$

Алгоритм [4] позволяет осуществить положительное фазовое смещение первой гармоники управляющего напряжения относительно синусоидального сигнала ошибки за счет изменения соотношения $U_{\max}$ и $U_{\min}$.

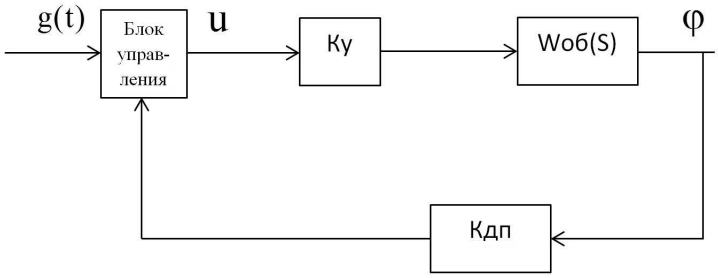

Рис. 2. Структурная схема системы логического управления сканатором.

Применение метода гармонической линеаризации, а также моделирование дают возможность установить зависимости амплитуды и частоты автоколебаний от значений управляющих воздействий и параметров объекта. Исследования этого закона управления показали увеличение частоты и амплитуды автоколебаний при увеличении $U_{\max}$. С увеличением $U_{\min}$ происходит нарастание амплитуды и снижение частоты автоколебаний. С увеличением жесткости сканатора эффективность логического управления возрастает. Так, при уменьшении в указанном объекте постоянной времени T_2 до величины 0.0001 с, более чем на порядок увеличиваются управляющие воздействия при неизменной амплитуде автоколебаний. При небольших позиционных перемещениях сканирующего элемента и возмущающих воздействиях система логического управления может оказаться более предпочтительной.

Выбор управляющих сигналов оказывается противоречивым. С одной стороны они должны удовлетворять требованиям допустимых автоколебаний, а с другой – требованиям заданных скоростей перемещения. Увеличения быстродействия можно достичь за счет использования системы с переменной структурой, сочетающей комбинированное и релейное управление. Начальный этап движения осуществляется с ускорением, путем подачи на вход сканатора постоянного управляющего воздействия U_p. В момент достижения первого экстремума ошибки коэффициент передачи управления по возмущению уменьшается до значения, реализующего нулевую установившуюся ошибку по скорости (рис. 3). Форсирующее устройство управления работает в начальной стадии переходного процесса, тем самым не влияя на устойчивость и точность замкнутой системы в установившемся режиме.

Система управления может быть описана уравнениями

$$\varepsilon(t) = g(t) - K_{\text{дп}}\varphi(t); \quad u(t) = u_k + \varepsilon(t)K_{\text{эс}}; \quad \varphi(t) = K_{\text{у}}W_{\text{об}}(S)u(t). \qquad (6)$$

Уравнение системы управления относительно угла поворота сканирующего элемента на начальном этапе переходного процесса имеет вид

$$\left(T_1^2S^2 + 2\xi_1T_1S + 1\right)\left(T_2^2S^2 + 2\xi_2T_2S + 1\right) \cdot \varphi(t) = K_{\text{об}}U_p. \qquad (7)$$

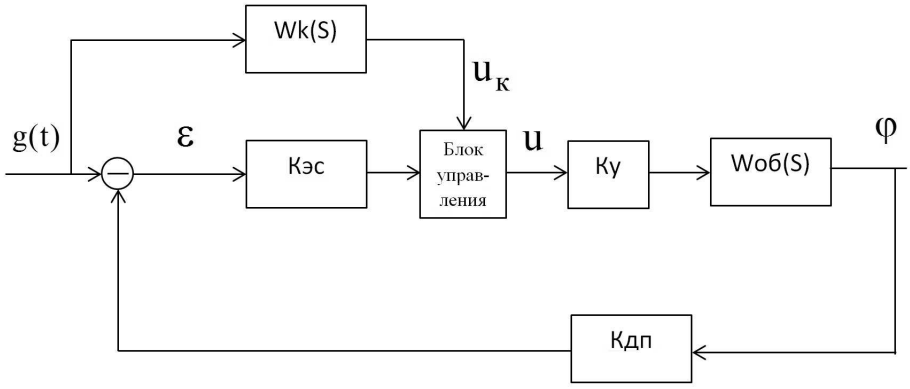

Рис. 3. Структурная схема системы с переменной структурой.

Уравнение системы относительно угла поворота сканирующего элемента на завершающей стадии переходного процесса и в установившемся режиме принимает форму

$$\left[\left(T_1^2S^2 + 2\xi_1T_1S + 1\right)\left(T_2^2S^2 + 2\xi_2T_2S + 1\right) + K_{\text{эс}}K_{\text{у}}K_{\text{об}}K_{\text{дп}}\right]\varphi(t) = \\ = K_{\text{об}}K_{\text{эс}}K_{\text{у}}g(t) + K_{\text{у}}K_{\text{об}}W_k(S)g(t). \tag{8}$$

Параметры звена коррекции $W_k(S)$ системы комбинированного управления выбраны из условия нулевой установившейся ошибки. При переходном процессе отработки линейного воздействия $g(t) = \upsilon t$ ошибка имеет минимум, на который может быть настроена система по величине U_p. Отметим, что при отработке указанного воздействия обычной комбинированной системой максимальная динамическая ошибка была вдвое больше. Дальнейшее (при увеличении U_p) возрастание величины ошибки связано с упругими свойствами сканатора. В данном случае может быть подобран момент переключения, обеспечивающий лучшее качество управления, т. е. удается осуществить "развязку" переходного и установившегося режимов. Таким образом, увеличение жесткости сканатора позволяет не только повысить коэффициенты усиления системы, работающей в установившемся режиме, но и получить значительно большие управляющие сигналы U_p в переходном режиме.

3. Синтез квазиоптимального управления. Упругие звенья сканатора оказывают существенное влияние на релейные режимы управления, в том числе на режим оптимального по быстродействию управления. Наличие второго колебательного звена, связанного с упругими свойствами, значительно осложняет функцию переключения. При этом число интервалов знакопостоянных управляющих воздействий и их продолжительность зависят от начального состояния и резонансных частот сканатора. Применение в системе позиционирования простейшего алгоритма двухинтервального управления: "половина пути – разгон, половина пути – торможение" с максимальным

ускорением в силу отличия реальной передаточной функции от передаточной функции двойного интегратора приводит либо к перерегулированию, либо к неполной отработке заданного перемещения.

Функциональная схема квазиоптимальной системы управления сканатором приведена на рис. 4. Блок управления осуществляет режим "разгон–торможение" с переключением управления на половине пути, а также включает систему стабилизации при выполнении соответствующего условия. В качестве системы стабилизации может, например, рассматриваться система пропорционального управления. Для выбора рационального квазиоптимального закона управления на практике используется варьирование как величины релейного сигнала, т. е. ускорения или торможения, так и времени переключения с ускорения на торможение, с отключением в определенных областях управляющего воздействия. Время позиционирования t_n при совместной работе релейной системы и системы стабилизации состоит из двух составляющих: времени движения в релейном режиме t_p и времени стабилизации сканирующего элемента t_{cm}. При переключениях должно быть выполнено условие $t_n = \min(t_p + t_{cm})$. Простейшими в реализации такой системы управления сканатором являются условия переключения структур при равенстве нулю ошибки по положению или равенстве нулю скорости на этапе торможения.

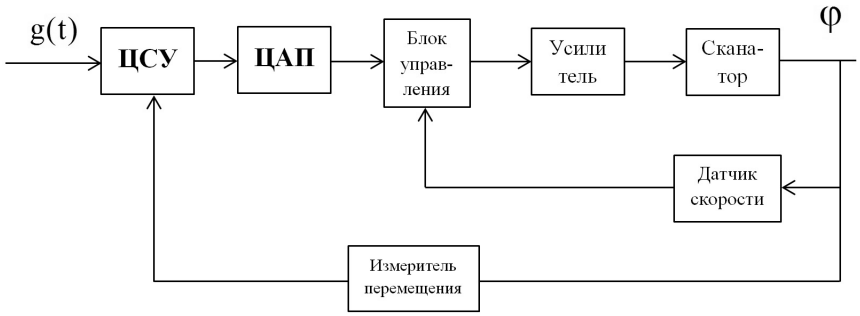

Рис. 4. Функциональная схема системы квазиоптимального управления сканатором.

Выполнение условий непревышения абсолютными значениями ошибки по положению и скорости определенных величин используется для установления областей работы системы стабилизации. Проведенное моделирование совместной работы релейной системы и системы стабилизации для различных величин перемещения и различных условий включения системы стабилизации [5] показало, что с уменьшением скорости, при достижении которой включается система стабилизации, качество процесса улучшается. Однако при больших величинах ошибки положения и производных выходного сигнала в момент подключения система стабилизации может оказаться в области нелинейности. При неизменных условиях переключения и величины перемещения изменения релейного сигнала оказывают существенное влияние на значения переменных состояния в момент отключения реле и, как следствие,

достигаются различные времена переходных процессов. Область ограничения по скорости должна учитывать величину перемещения, так как от него зависят значения производных выходного сигнала.

Область работы системы стабилизации по заданной ошибке положения должна в этом случае также регулироваться. С одной стороны желательно уменьшать величину области стабилизации, а с другой – увеличивать при увеличении перемещения, релейного сигнала и увеличении постоянной времени второго колебательного звена. Уменьшение остаточной ошибки возможно также за счет изменения момента переключения релейного элемента или изменения величины тормозящего сигнала. Таким образом, выбор области включения системы стабилизации и величины перемещения необходимо связывать с остаточными значениями переменных состояния, при которых система стабилизации еще не входит в область существенной нелинейности.

Учитывая широкий диапазон перемещений (2^{18} единиц перемещения) невозможно определить постоянную область включения системы стабилизации, рациональную для всех перемещений. Однако при ограниченном числе перемещений такие области можно установить.

4. Синтез структурных решений при неопределенности параметров модели. В ряде задач управления оптико-механическими сканаторами, которые описываются математическими моделями второго, третьего порядка, достаточно эффективными оказались линейные пропорционально-интегрально-дифференцирующие (ПИД) законы управления [6]. Вместе с тем, в оптико-механических сканаторах ряд коэффициентов и характеристик, например, определяющих упругие связи, вязкое внутреннее трение, вязкое и сухое трение внешних сил, нелинейности, обусловленные конструкцией, являются трудно определимыми. В двухмерных и многомерных сканаторах может возникать взаимное влияние каналов. Учет указанных эффектов связан с использованием громоздких расчетных формул, с усложнением математической модели сканатора или сканирующей системы в целом, с трудностями в ее применении для инженерных расчетов. Погрешности сканирующих систем в ряде случаев стремятся свести до приемлемого уровня за счет прецизионной оптико-механической части, что создает дополнительные трудности, связанные с настройкой, юстировкой и эксплуатацией всей системы. Неполнота информации о свойствах сканаторов, элементов устройств и систем управления сканаторами, повышение требований к точности позиционирования и воспроизведения траекторий движения приводят к необходимости рассмотрения более сложных законов управления. Так, в работе [7] в целях линеаризации статической характеристики торсионного электростатического привода микрозеркала применено нечеткое управление. Привод зеркала является многоэлектродным. В многовходовой конструкции при выборе электродов и подаваемых напряжений на основе нечеткой логики удалось улучшить линейность характеристики угол-напряжение, а также улучшить качество переходных процессов. Адаптивная система управления торсионным микрозеркалом с электростатическим приводом и емкостным датчиком угла приведена в [8]. Система выполнена по схеме с настраиваемой моделью объекта (рис. 5).

Управляющее устройство вырабатывает по сигналам обратной связи, идентификатора и задания сигналы управления и корректирует по сигналам идентификатора свою настройку в режиме реального времени. При работе системы управления идентификатор выполняет оценку параметров сканатора. Модель сканатора с торсионной подвеской описана дифференциальным уравнением второго порядка.

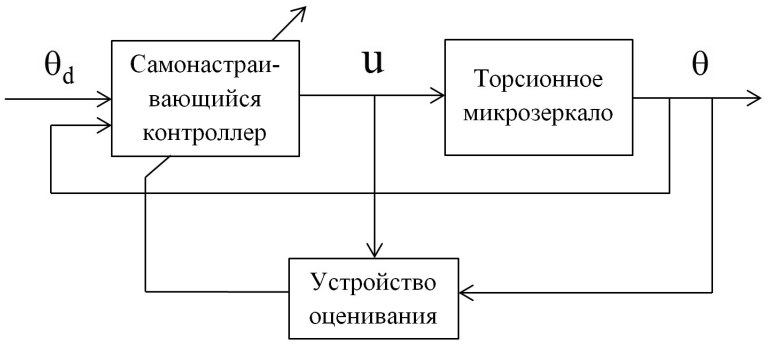

Рис. 5. Функциональная схема системы адаптивного управления микрозеркалом.

Результаты моделирования и эксперименты показали эффективность алгоритма адаптивного управления на основе квадратичной функции Ляпунова при позиционном управлении и слежении, определенные преимущества перед ПИД-регулятором в части самонастройки в реальном времени. Система позволяет компенсировать несовершенства изготовления сканатора и точнее воспроизводить траекторию торсионного зеркала. В этой связи представляют интерес вопросы выбора наиболее подходящих для управления структур, алгоритмов и оценки точностных возможностей адаптивного управления сканаторами других типов с упругими звеньями в реальных условиях.

5. Заключение. Упругие связи сканирующих устройств с выраженными свойствами многомодовости усложняют задачи стабилизации и управления. Увеличение жесткости сканатора за счет конструктивных решений оказывается не всегда допустимым. Требования высокой точности и быстродействия приводят к необходимости комбинации законов управления, применения более сложных законов управления. Многорежимность является средством обеспечения независимости законов управления и гибкости при выполнении различных задач сканирования. При позиционных перемещениях предпочтительны квазиоптимальные законы с подключением на завершающем этапе системы стабилизации.

1. *Петраков А.В., Выскуб В.Г.* Высокоточные телевизионные читающие автоматы. – М.: Энергоатомиздат, 2008. – 576 с.
2. *Бесекерский В.А., Попов Е.П.* Теория систем автоматического регулирования. – М.: Наука, 1966. – 992 с.

3. *Выскуб В.Г., Задернюк В.Б., Михеев В.П., Савельев В.И.* Анализ комбинированной системы управления лазерно-зеркальным сканатором // Изв. вузов. Приборостроение. – 1981. – № 9. – С. 29 – 35.
4. *Выскуб В.Г., Сырямкин В.И., Шидловский В.С.* Устройства и системы автоматического управления высокой точности. – Томск: Изд-во Томского гос. ун-та, 2009. – 308 с.
5. *Выскуб В.Г.* Система управления оптико-механическим сканатором с магнитоэлектрическим приводом // Изв. вузов. Приборостроение. – 2005 – № 2. – С. 68–72.
6. *Pannu S., Chang C., Muller R.S., Pisano A.P.* Closed-loop feedback-control system for improved tracking in magnetically actuated micro-mirrors // 2000 IEEE/LEOS Conf. on Optical MEMS (Kauai, Hawaii 2000). – P. 107–108.
7. *Chiou J.C., Lin Y.C., Wu S.D.* Closed-Loop Fuzzy Control of Torsional Micromirror with Multiple Electrostatic Electrodes // Optical MEMS. Conf. Digest (IEEE/LEOS International Conf., August 2002). – P. 85–86. 0-7803-7595-5/02/S17.00 @2002 IEEE.
8. *Liao K.-M., Wang Y.-C., Yeh C.-H., Chen R.* Closed-loop adaptive control for electrostatically driven torsional micromirrors // J. Microlith., Microfab., Microsystems. – 2005. – **4**(4) – 041503. – P. 041503-1 – 041503-9.

V.E. Bolnokin, V.G. Vyskub, V.N. Dianov, V.I. Storozhev

Control of opto-mechanical scanners with elastic links

The paper describes the features of the control for mirror scanners with elastic links. The analysis of various structural solutions is carried out. Considered the problem of stabilization, positioning, programmed movement. The advisability of multi-mode control is shown.

Keywords: *scanner, elastic links, interference sensor, optimal adaptive control.*

Ин-т машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва;
ФГБНУ "Республ. исслед. научно-консультац. центр экспертизы" МОН РФ, Москва;
ФГУП "Научно-исслед. и эксперимент. ин-т автомобильной электроники и электрооборудования", Москва;
ГОУ ВПО "Донецкий национальный ун-т", Донецк
stvistvi@mail.ru

Получено 10.07.18