

УДК 681.5.11

Астатическая система управления скоростью электропривода оси сканирования трехосного телескопа

В.А. Толмачев, Д.А. Субботин

ФГБОУВПО «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
E-mail: tolmachev@ets.ifmo.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: Одной из актуальных задач в области современного электропривода является задача повышения точности систем наведения трехосных телескопов траекторных измерений с азимутальной, угломестной и сканирующей осями. Синтезу систем управления прецизионных безредукторных следящих электроприводов азимутальной и угломестных осей на основе вентильных двигателей посвящено достаточно много работ. Вопросы построения систем сканирования с поворотом малоинерционного отражающего зеркала также достаточно широко освещены в литературе. Актуальной является задача построения систем управления электроприводов сканирования с поворотом всей оптической системы телескопа, обладающей большим моментом инерции. Вопросам построения таких систем на основе силового электромеханического преобразователя напряжения в пропорциональный угол поворота посвящен ряд статей авторов. Однако сохраняют свою актуальность и вопросы дальнейшего повышения точности поддержания скорости на рабочем участке трапецидальной диаграммы сканирования.

Материалы и методы: При решении поставленной задачи используются методы теории автоматического управления и математическое моделирование.

Результаты: Предложена структурная схема, методика синтеза и векторно-матричная математическая модель двухконтурной астатической по задающему и возмущающему воздействиям системы управления.

Выводы: Предложенная структура и методика ее синтеза позволяют повысить точность воспроизведения приводом заданной трапецидальной диаграммы сканирования электропривода на ее рабочих участках.

Ключевые слова: инфракрасный телескоп, магнитоэлектрический преобразователь, диаграмма сканирования, система управления скоростью, методика синтеза, математическая модель.

Astatic system of three-axis telescope scanning axis electric drive speed control

V.A. Tolmachev, D.A. Subbotin

Saint-Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics,
Saint-Petersburg, Russian Federation
E-mail: tolmachev@ets.ifmo.ru

Abstract

Background: One of the urgent problems in the field of modern electric drives is the task of improving the precision of tracking systems of triaxial telescopes trajectory measurements with azimuth, elevation and scanning axes. Synthesis of control systems for precision gearless azimuth and elevation axes servo drives based on brushless motors is considered in many works. The problems of constructing scanning systems with a fast-response turning reflecting mirror are also well described in the literature. An urgent problem is development of electric drive control systems in which the entire telescope optical system can rotate and has a large moment of inertia. The questions of designing such systems based on electromechanical power voltage conversion to a proportional rotation angle are studied in a number of articles. However, it still remains urgent to further increase the accuracy of maintaining the speed at the trapezoidal scanning diagram work area.

Materials and methods: The control theory and mathematical modeling methods were used in solving the defined problem.

Results: A structural scheme, a synthesis method and a vector-matrix mathematical model of a two-loop astatic reference and disturbing signal control system have been suggested.

Conclusions: The proposed structure and synthesis method allow increasing the accuracy of trapezoid scanning diagram reproduction by the electric drive in its working areas.

Key words: infrared telescope, magnetoelectric converter, scanning diagram, speed control system, synthesis method, mathematical model.

Введение. Основу системы наведения современного телескопа составляют опорно-поворотное устройство (ОПУ) и силовые следящие электроприводы. Например, система наведения инфракрасного телескопа строится на основе трехосного ОПУ с азимутальной, угломестной и сканирующей осями. На каждой из осей расположен электроагрегат, содержащий электрический двигатель и датчики угла поворота и

скорости двигателя с жестко связанными валами. Синтезу систем управления прецизионными безредукторными следящими электроприводами азимутальной и угломестных осей на основе вентильных двигателей посвящено достаточно много работ. Специфическими являются требования к электроприводам осей сканирования. Во многих случаях они должны обеспечивать движение оси в пределах малых углов в соответствии с

временной диаграммой, представленной диаграммой 1 на рис. 1.

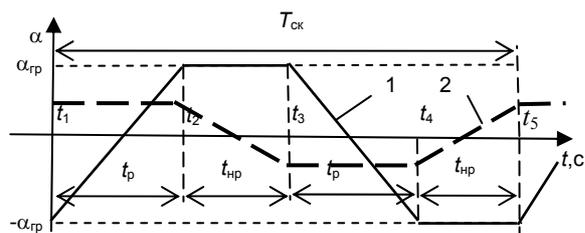


Рис. 1. Диаграмма сканирования электропривода

Полный цикл сканирования $T_{ск}$ содержит 2 участка рабочего хода (t_1-t_2 и t_3-t_4) с длительностью t_p и 2 участка нерабочего хода (t_2-t_3 и t_4-t_5) с длительностью $t_{нр}$. На участках рабочего хода угол поворота оси должен меняться линейно в пределах от $-\alpha_{гр}$ до $+\alpha_{гр}$ с допустимой погрешностью поддержания скорости на рабочем участке $\Delta\%$. Закон изменения угла на участках нерабочего хода не лимитируется. Длительность нерабочего хода измеряется между окончанием одного рабочего хода и началом следующего. Параметры диаграммы и требования к точности ее воспроизведения зависят от заданного режима сканирования (в широком или узком угловом поле). Мы будем ориентироваться на параметры диаграммы, представленные в таблице.

Параметры диаграммы сканирования

Режим сканирования	$\alpha_{гр},'$	$T_{ск}, c$	t_p, c	$t_{нр}, c$	$\Delta\%$
Широкое угловое поле	30	2,4	1	0,2	5
Узкое угловое поле	5	0,5	0,17	0,08	5

Ввиду достаточно малого диапазона изменения угла поворота оси сканирования для реализации электропривода нет необходимости использовать традиционные электродвигатели с неограниченным углом поворота. Перспективно применение для этих целей бесконтактных магнитоэлектрических преобразователей (МЭП) входного электрического сигнала (напряжения) в пропорциональное угловое перемещение его ротора [1]. Проведенное математическое моделирование процессов сканирования при заданных характеристиках МЭП, параметрах диаграммы сканирования, незначительных индуктивностях

обмотки управления МЭП и малых статических моментах нагрузки на оси подтвердило возможность реализации требуемого движения исполнительной оси в режиме слежения за трапецидальным задающим воздействием в виде диаграммы 1 на рис. 1. Испытание приводов сканирования на реальных ОПУ показало необходимость учета при синтезе как значительных величин индуктивности обмоток управления МЭП, так и моментов нагрузки типа «сухое трение» в опорах оси.

При подходах, описанных в [2, 3], быстрое действие системы управления становится соизмеримым с длительностью рабочих участков диаграммы сканирования, а увеличение моментов нагрузки на оси приводит к существенному ухудшению линейности. В этих условиях требуемое движение оси невозможно обеспечить ни в одном из режимов сканирования. Устранение влияния указанных факторов возможно в структурах, замкнутых по скорости вала электромеханического преобразователя, при отработке входных воздействий в виде диаграммы 2 на рис. 1. В ходе моделирования режимов сканирования были установлены минимально реализуемые ошибки, при которых значение амплитуды всплеска напряжения на обмотке управления магнитоэлектрического преобразователя не превышает предельно допустимого значения 48 В.

Структурная схема системы управления. Структурная схема исследуемой системы представлена на рис. 2, где штриховыми линиями выделены элементы и связи, образующие структурную схему собственно МЭП, обоснованную в работе [2]; P_1 – ПД-регулятор, осуществляющий компенсацию электрической постоянной времени МЭП $T_3 = L/R$ (где R и L – активное сопротивление и индуктивность обмотки управления соответственно [4]). Необходимость такой компенсации возникает при значительных величинах индуктивности; P_2 – синтезируемый регулятор во внешнем контуре системы, призванный обеспечить повышение астатизма по задающему воздействию и моменту нагрузки на валу МЭП.

Дальнейшее повышение точности воспроизведения заданной диаграммы требует иных структурных решений системы управления и алгоритмов управления. Ниже рассматривается один из возможных вариантов решения.

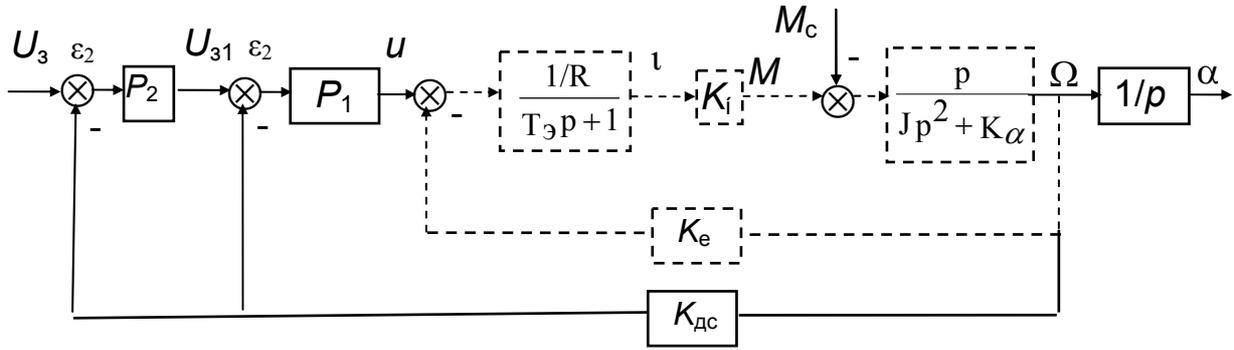


Рис. 2. Структурная схема системы управления

В приведенной схеме (рис. 2): u и i – соответственно напряжение на обмотке управления МЭП и ток в обмотке; α и Ω – соответственно угол поворота оси и ее угловая скорость; K_e – крутизна противоЭДС; J – суммарный момент инерции по оси сканирования; $M_c = M_{c0} \cdot \text{sign } \Omega$ – момент типа «сухое трение» в опорах оси; $K_\alpha = dM/d\alpha$ – жесткость механической характеристики или жесткость «магнитной пружины»; $K_i = dM/di$ – жесткость моментной (тяговой) характеристики или чувствительность по току; f – коэффициент внутреннего демпфирования. Далее при расчетах и моделировании будем ориентироваться на следующие параметры МЭП с нагрузкой: $K_\alpha = 4500 \text{ Н}\cdot\text{м/рад}$; $K_i = 120 \text{ Н}\cdot\text{м/А}$; $K_e = 1,5 \text{ В}\cdot\text{с/рад}$; $L = 0,6 \text{ Гн}$; $R = 10,5 \text{ Ом}$; $J = 250 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$; $f = 0$; $T_3 = L/R = 0,057 \text{ с}$; $K_{дс} = 20 \text{ В}\cdot\text{с/рад}$.

Возможный диапазон изменения момента M_{c0} – 5–25 Н·м. Предельно допустимое значение напряжения на обмотке управления – $U_{доп} = 48 \text{ В}$.

Рассмотрим динамические свойства внутреннего контура регулирования скорости.

Передаточная функция ПД-регулятора имеет вид

$$W_{p1}(p) = \frac{K_{п1}(T_d p + 1)}{T_v p + 1}, \quad (1)$$

где $K_{п1}$ – коэффициент передачи; T_d – постоянная времени дифференцирования; T_v – постоянная времени дополнительного инерционного звена.

На рис. 3 представлена детализированная структурная схема (ДСС) регулятора, где $\varepsilon_1 = U_{31} - K_{дс}\Omega$ – ошибка регулирования; U_{31} – напряжение задания.

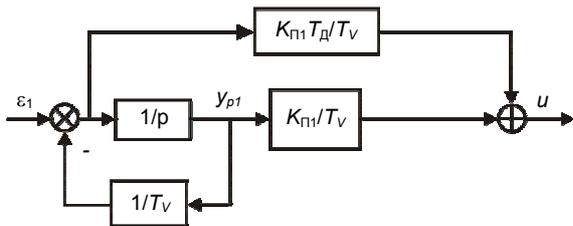


Рис. 3. ДСС ПД-регулятора

Используя ДСС, составим выражение для напряжения u на обмотке управления МЭП в следующем виде:

$$u = -\frac{K_{п1}T_d K_{дс}}{T_v} \Omega - \frac{K_{п1}(T_d - T_v)}{T_v^2} y_{p1} + \frac{K_{п1}T_d}{T_v} U_{31}, \quad (2)$$

где y_{p1} – выходной сигнал интегратора ДСС; u – напряжение на обмотке управления МЭП.

При введении обозначений

$$\omega_0 = \sqrt{K_\alpha / J}, \quad (3)$$

$$K_\Omega = \frac{K_i K_{п1} K_{дс}}{JR} \quad (4)$$

и условиях $T_d = T_3$, $T_v \ll T_d$, $K_{дс} \gg K_e$, $K_\Omega \geq 2\omega_0$

передаточные функции внутреннего контура по задающему U_{31} и возмущающему M_c воздействиям без большой погрешности можно представить в виде следующих выражений:

$$\frac{\Omega(p)}{U_{31}(p)} = \frac{K_\Omega p}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)K_{дс}\omega_0^2}; \quad (5)$$

$$\frac{\Omega(p)}{M_c(p)} = \frac{p}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)K_\alpha}, \quad (6)$$

где постоянные времени определяются по формулам:

$$T_1 = \frac{1}{\frac{K_\Omega}{2} - \sqrt{\left(\frac{K_\Omega}{2}\right)^2 - \omega_0^2}}; \quad (7)$$

$$T_2 = \frac{1}{\frac{K_\Omega}{2} + \sqrt{\left(\frac{K_\Omega}{2}\right)^2 - \omega_0^2}}. \quad (8)$$

После выбора K_Ω из условия $K_\Omega \geq 2\omega_0$ коэффициент передачи $K_{п1}$ находится из выражения (4).

Анализ передаточных функций (5) и (6) показывает, что при постоянных значениях напряжения задания и момента нагрузки, независимо от их величины, установившееся значение скорости равно нулю. Это обстоятельство и определяет специфику синтеза системы управления скоростью МЭП – обеспечение заданной точности поддержания скорости на рабочем участке

диаграммы сканирования в условиях принципиально стремящейся к нулю скорости.

Диаграммы, представленные на рис. 4, соответствуют внутреннему контуру системы с параметрами МЭП, приведенными выше, синтезированному из условия обеспечения погрешности $\Delta = 5\%$ в предположении, что на вход его подается задающее воздействие U_{31} в виде кривой 2 на рис. 1 с параметрами, соответствующими режиму сканирования в широком угловом поле.

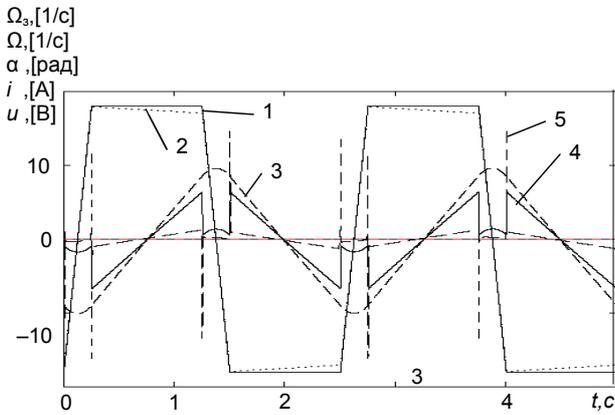


Рис. 4. Процессы сканирования в широком угловом поле для внутреннего контура электропривода: 1 – заданное значение скорости $\Omega_3 = U_{31}/K_{дс}$ [1/c] в масштабе 1000:1; 2, 3, 4 – кривые соответственно скорости Ω [1/c] в масштабе 1000:1, угла поворота α [рад] в масштабе 1000:1, тока в обмотке управления i [А] в масштабе 20:1, полученные на математической модели в среде Mathcad; 5 – диаграмма напряжения на обмотке управления u [В] в масштабе 1:3, сформированная по уравнению (2)

При воспроизведении диаграммы сканирования (рис. 4) имеют место всплески напряжения на обмотке управления в моменты смены рабочих и нерабочих участков. Анализ показал, что амплитуда этих всплесков связана с величиной коэффициента передачи $K_{п1}$. Снижение ошибки на рабочем участке связано с повышением коэффициента передачи регулятора $K_{п1}$. Однако повышение $K_{п1}$ приводит к росту амплитуды всплесков напряжения u .

При снижении допустимой ошибки до величины, меньшей 5 %, амплитуда всплесков может многократно превышать предельно допустимую величину [4].

Одним из путей повышения точности при обеспечении предельно допустимого напряжения на обмотке управления МЭП является введение второго (внешнего) контура регулирования

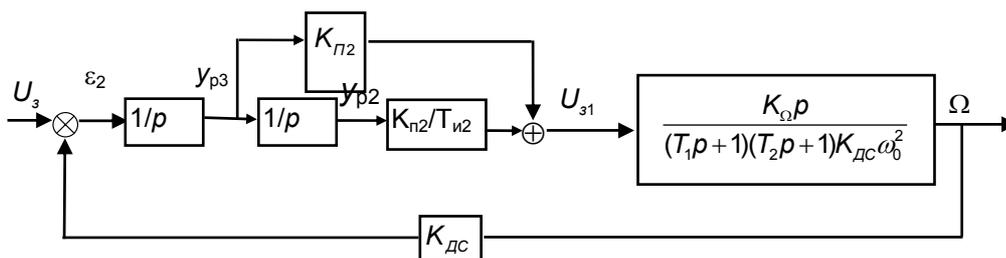


Рис. 5. Расчетная структурная схема внешнего контура регулирования скорости

ния скорости, с регулятором, обеспечивающим повышение порядка астатизма как по задающему, так и по возмущающему воздействию в виде момента нагрузки типа «сухое трение».

Передаточная функция регулятора P_2 внешнего контура имеет вид

$$W_{p2}(p) = \frac{K_{п2}(T_{u2}p + 1)}{T_{u2}p^2} \quad (9)$$

Такой регулятор обеспечивает астатизм первого порядка контура по задающему воздействию и астатизм второго порядка по моменту нагрузки M_c и позволяет осуществить настройку контура на технический оптимум. При этом передаточную функцию замкнутого контура по задающему воздействию можно представить выражением

$$W_3(p) = \frac{\Omega(p)}{U_3(p)} = \frac{1}{(2T_{\mu}^2 p^2 + 2T_{\mu} p + 1)K_{дс}}, \quad (10)$$

где T_{μ} – некомпенсированная постоянная времени, определяющая расчетное время переходного процесса в системе при реакции на скачок напряжения задания как

$$t_{пр} = 4,7 T_{\mu} \quad (11)$$

Учитывая малое влияние коэффициента K_e на динамические процессы в системе и исключая соответствующую обратную связь в структурной схеме на рис. 2, легко найти передаточную функцию системы по возмущению (моменту нагрузки) в виде выражения

$$W_e(p) = \frac{\Omega(p)}{M_c(p)} = - \frac{1}{W_{p1}(p)W_{p2}(p)} \frac{R(T_3 p + 1)}{K_i} W_3(p),$$

которое с учетом (1), (9) и (10) приводится к виду

$$W_e(p) = - \frac{T_{u2} p^2 (T_v p + 1) (T_3 p + 1) R}{K_{п1} K_{п2} K_i (T_{u2} p + 1) (T_d p + 1)} W_3(p). \quad (12)$$

Выражение (12) позволяет сделать заключение о втором порядке астатизма контура по возмущению.

Оптимизация внешнего контура. Для оптимизации контура используем структурную схему, приведенную на рис. 5, где регулятор с передаточной функцией (9) представлен детализированной структурной схемой; внутренний контур системы – звеном с передаточной функцией (5); $\varepsilon_2 = U_3 - K_{дс}\Omega$ – ошибка на входе регулятора внешнего контура.

Сигнал задания для внутреннего контура определяется выражением

$$U_{з1} = y_{p3}K_{п2} + \frac{K_{п2}}{T_{u2}} \cdot y_{p2}. \quad (13)$$

После подстановки (13) в (2) получим формулу для расчета напряжения на обмотке управления МЭП для рассматриваемой структуры в следующем виде:

$$u = -\left(\frac{T_D K_{п1} K_{ДС}}{T_V}\right) \Omega - \left(\frac{(T_D - T_V) K_{п1}}{T_V^2}\right) y_{p1} + \frac{T_D K_{п1}}{T_V} \frac{K_{п2}}{T_{u2}} y_{p2} + \frac{T_D K_{п1} K_{п2}}{T_V} y_{p3}, \quad (14)$$

где y_{p2} и y_{p3} – выходные сигналы интеграторов ДСС.

Настройка контура заключается в выборе таких параметров регулятора, при которых передаточная функция разомкнутого контура соответствует эталонной:

$$W_{pз}(p) = \frac{1}{2T_{\mu}p(T_{\mu}p + 1)}. \quad (15)$$

Поскольку $T_1 > T_2$, то постоянную времени T_1 следует компенсировать выбором $T_{и2} = T_1$, а некомпенсированную постоянную времени сформировать как

$$T_{\mu} = T_2 + T_V, \quad (16)$$

где $T_V \ll T_2$ – постоянная времени дополнительного инерционного звена ПД-регулятора внутреннего контура системы, не учтенная в передаточной функции (5).

Тогда передаточная функция разомкнутого внешнего контура примет вид

$$W_p(p) = \frac{K_{п2}}{T_1 p} \cdot \frac{1}{(T_{\mu} p + 1)} \cdot \frac{K_{\Omega}}{\omega_0^2}. \quad (17)$$

Сравнивая передаточную функцию (17) с эталонной передаточной функцией (15), получим условие для выбора коэффициента передачи $K_{п2}$ в виде

$$K_{п2} = \frac{T_1 \omega_0^2}{2T_{\mu} K_{\Omega}}. \quad (18)$$

Теперь можно сформулировать достаточно строгую методику синтеза системы управления из условия обеспечения заданного времени переходного процесса $t_{пр}$ при известных параметрах МЭП:

– определяется значение постоянной времени T_{μ} по формуле (11) из условия обеспечения заданного быстродействия и далее – значение постоянной времени T_2 по формуле (16);

– из выражения (8) находится значение коэффициента K_{Ω}

$$K_{\Omega} = \frac{1}{T_2} + T_2 \omega_0^2; \quad (19)$$

– из выражения (4) определяем значение $K_{п1}$ как

$$K_{п1} = \frac{K_{\Omega} J R}{K_i K_{ДС}}; \quad (20)$$

– по формуле (7) определяем требуемое значение постоянной времени T_1 и постоянную времени интегрирования $T_{и2} = T_1$.

На рис. 6 представлены результаты моделирования процессов при сканировании в широком угловом поле электропривода с двухконтурной системой управления, синтезированной по предложенной выше методике из условия обеспечения времени переходного процесса при реакции на задающее воздействие $t_{пр} = 18,8$ мс. Параметры системы: $T_V = 1$ мс, $T_D = 57$ мс, $T_{\mu} = 4$ мс, $T_2 = 3$ мс, $K_{\Omega} = 333,4$, $T_1 = T_{и2} = 18,5$ с, $K_{п1} = 364,6$, $K_{п2} = 125$, $M_{с0} = 25$ Нм.

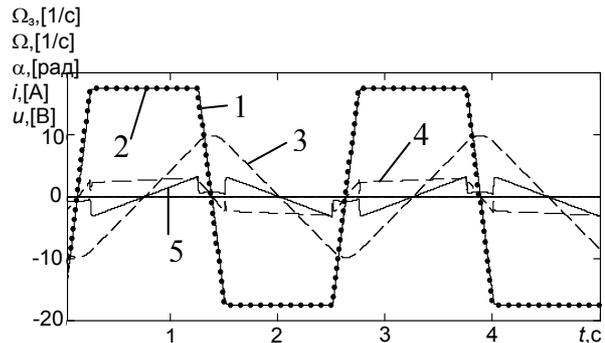


Рис. 6. Процессы сканирования в широком угловом поле в двухконтурной системе управления скоростью МЭП: 1 – заданное значение скорости $\Omega_z = U_z/K_{ДС}$ [1/с] в масштабе 1000:1, соответствующее диаграмме сканирования; 2 – истинное значение скорости Ω [1/с] в масштабе 1000:1; 3 – угол поворота вала α [рад] в масштабе 1000:1, 4 – напряжение на обмотке управления МЭП u [В] в масштабе 1:10, сформированное по выражению (14); 5 – ток в обмотке управления i [А] в масштабе 10:1

Сравнение результатов моделирования процессов при сканировании в режиме широкого углового поля для одноконтурной системы (системы 1), синтезированной по методике [4] (рис. 4) и для двухконтурной системы (системы 2), синтезированной по предложенной методике (рис. 6), при одинаковых параметрах МЭП и нагрузки показывает, что в системе 2 скорость на всем протяжении рабочего участка диаграммы сканирования поддерживается постоянной и равной заданной и при этом отсутствуют всплески напряжения на обмотке управления МЭП в моменты смены участков диаграммы сканирования.

Заключение

Предложенная двухконтурная структура системы регулирования скорости с регулятором, обеспечивающим повышение порядка астатизма как по задающему воздействию, так и по возмущению в виде статического момента нагрузки на оси привода, и методика параметрического синтеза системы управления позволяют повысить точность воспроизведения трапецеидальной диаграммы сканирования на ее рабочем участке электроприводом, построенным на основе электромеханического преобразователя постоянного напряжения в пропорциональный угол поворота.

Список литературы

1. Решетников Е.М., Саблин Ю.А. Электромеханические преобразователи гидравлических и газовых приводов. – М.: Машиностроение, 1982. – 144 с.
2. Толмачев В.А., Демидова Г.Л. Математические модели и динамические характеристики электромеханических преобразователей с ограниченным углом поворота // Изв. вузов. Приборостроение. – 2008. – Т. 51. – № 6. – С. 18–23.
3. Толмачев В.А., Субботин Д.А. Синтез системы управления электропривода сканирующей оси инфракрасного телескопа // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2011. – № 5 (75). – С. 53–57.
4. Толмачев В.А., Субботин Д.А. Одноконтурная система управления оси сканирования инфракрасного телескопа с пропорционально–дифференциальным регулятором скорости // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2012. – № 3 (79). – С. 73–78.

Толмачев Валерий Александрович,

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики,
кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и прецизионных электромеханических систем,
e-mail: tolmachev@ets.ifmo.ru

Субботин Дмитрий Андреевич,

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики,
аспирант,
e-mail: Subb-Dm@yandex.ru

References

1. Reshetnikov, E.M., Sablin, Yu.A. *Elektromekhanicheskie preobrazovateli gidravlicheskih i gazovykh privodov* [Electromechanical actuators of gas and hydraulic converters]. Moscow, Mashinostroenie, 1982. 144 p.
2. Tolmachev, V.A., Demidova, G.L. Matematicheskie modeli i dinamicheskie kharakteristiki elektromekhanicheskikh preobrazovateley s ogranichennym uglom povorota [Mathematical models and dynamic characteristics of Electromechanical Converters with a Limited Rotation Angle]. *Izvestiya vuzov. Priborostroenie*, 2008, vol. 51, no. 6, pp. 18–23.
3. Tolmachev, V.A., Subbotin, D.A. Sintez sistemy upravleniya elektroprivoda skaniruyushchey osi infrakrasnogo teleskopa [Control system synthesis of infrared telescope scanning axis electric drive]. *Nauchno-tekhnicheskij vestnik SPbGU ITMO*, 2011, no. 5(75), pp. 53–57.
4. Tolmachev, V.A., Subbotin, D.A. Odnokonturnaya sistema upravleniya osi skanirovaniya infrakrasnogo teleskopa s proporcional'no–differentsial'nym regulyatorom skorosti [Single loop scanning axis control system of infrared telescopes with a proportional-differential speed regulator]. *Nauchno-tekhnicheskij vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki*, 2012, no. 3(79), pp. 73–78.