

УДК 681.5.11

ОДНОКОНТУРНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ОСИ СКАНИРОВАНИЯ ИНФРАКРАСНОГО ТЕЛЕСКОПА С ПРОПОРЦИОНАЛЬНО-ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫМ РЕГУЛЯТОРОМ СКОРОСТИ

В.А. Толмачев, Д.А. Субботин

Сформулированы проблемы повышения точности воспроизведения диаграммы сканирования электроприводом на основе бесконтактного магнитоэлектрического преобразователя с ограниченным углом поворота. Предложена векторно-матричная математическая модель и методика синтеза одноконтурной системы управления с пропорционально-дифференциальным регулятором скорости. Проведено математическое моделирование процессов сканирования при заданных характеристиках магнитоэлектрического преобразователя и параметрах диаграммы сканирования, предложены перспективные структурные решения для системы управления.

Ключевые слова: магнитоэлектрический преобразователь, система стабилизации скорости, методика синтеза, математическая модель, режимы сканирования, инфракрасный телескоп.

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 посвящены работы [1–3] и др. 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.

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). Здесь будем ориентироваться на параметры диаграммы, представленные в табл. 1.

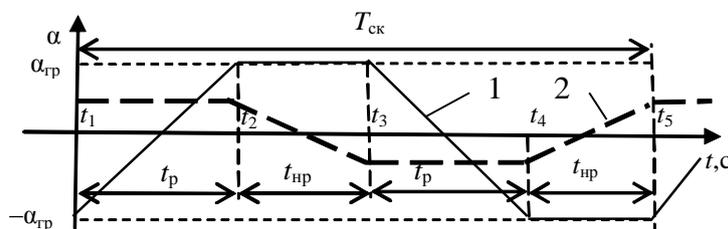


Рис. 1. Диаграммы сканирования электропривода:

- 1 – временная диаграмма сканирования для систем управления, замкнутых по углу поворота вала;
2 – временная диаграмма сканирования для систем управления, замкнутых по скорости вала

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

Таблица 1. Параметры диаграммы сканирования

Время выхода на одну из границ рабочего диапазона углов из произвольной точки первоначального положения не должно превышать 0,2 с.

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 [4]. В работе [5] проведен анализ статических и динамических характеристик МЭП с ограниченным углом поворота для приводов сканирования и малыми индуктивностями обмоток управления. На основе анализа обоснована целесообразность построения системы управления электропривода с внутренним контуром динамической коррекции для демпфирования слабо затухающих угловых коле-

баний вала с обратной связью по скорости вала. В работе [6] предложена векторно-матричная математическая модель и методика синтеза системы управления электропривода оси сканирования с внутренним контуром динамической коррекции и внешним контуром регулирования угла. 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 правомерность предложенной методики синтеза и возможность реализации требуемого движения исполнительской оси в режиме слежения за трапецеидальным задающим воздействием в виде диаграммы 1 на рис. 1. Испытание приводов сканирования на реальных ОПУ показало на 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 работах [5, 6], быстродействие 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 диаграмм, представленных диаграммой 2 на рис. 1. Здесь обсуждается один из возможных вариантов структурного построения замкнутых по скорости систем управления: одноконтурная система с пропорционально-дифференциальным (ПД) регулятором и задающим воздействием U_3 , соответствующим диаграмме 2 на рис. 1.

Структурная схема

Структурная схема исследуемой системы представлена на рис. 2, где штриховыми линиями выделены элементы и связи, образующие структурную схему собственно МЭП, обоснованную в работе [5], а P – ПД-регулятор, осуществляющий компенсацию электрической постоянной времени МЭП $T_3=L/R$, где R и L – соответственно активное сопротивление и индуктивность обмотки управления. Необходимость такой компенсации возникает при значительных величинах индуктивности.

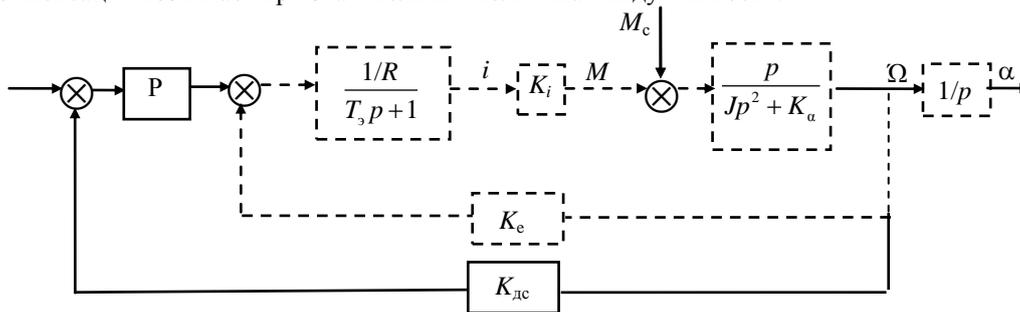


Рис. 2. Структурная схема системы управления

В приведенной схеме: 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 противо-э.д.с.; 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»; $K_f = dM/di$ – 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: $K_\alpha = 4500 \text{ Н}\cdot\text{м/рад}$; $K_f = 120 \text{ Н}\cdot\text{м/А}$; $K_e = 1,5 \text{ В}\cdot\text{с/рад}$; $L = 0,6 \text{ Гн}$; $R = 10,5 \text{ Ом}$; $J = 250 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$; $f = 0$; $T_3 = L/R = 0,057 \text{ с}$; $K_{dc} = 20 \text{ В}\cdot\text{с/рад}$. Возможный диапазон изменения момента $M_{c0} - 5-25 \text{ Н}\cdot\text{м}$. Предельно допустимое значение напряжения на обмотке управления $U_{доп} = 48 \text{ В}$.

Векторно-матричная математическая модель и методика синтеза одноконтурной системы управления с ПД-регулятором скорости

Рассмотрим динамические свойства одноконтурной системы регулирования скорости. Передаточная функция ПД-регулятора имеет вид

$$W_{pd}(p) = \frac{K_n(T_d p + 1)}{T_v p + 1},$$

где K_n – коэффициент передачи; T_d – постоянная времени дифференцирования и T_v – постоянная времени дополнительного инерционного звена. На рис. 3 представлена детализированная структурная схема (ДСС) регулятора, где $\varepsilon = U_3 - K_{dc} \cdot \Omega$ – ошибка регулирования, а U_3 – напряжение задания, соответствующее диаграмме 2 на рис. 1.

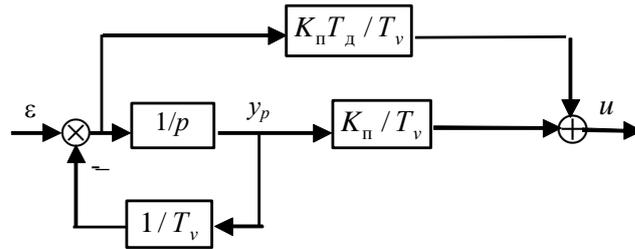


Рис. 3. Детализированная структурная схема ПД-регулятора

Используя ДСС, опишем ПД-регулятор следующими уравнениями:

$$\dot{y}_p = U_3 - K_{dc} \cdot \Omega - (1/T_v)y_p, \tag{1}$$

$$u = -\frac{K_p T_d K_{dc}}{T_v} \Omega - \frac{K_p (T_d - T_v)}{T_v^2} y_p + \frac{K_p T_d}{T_v} U_3, \tag{2}$$

где y_p – выходной сигнал интегратора ДСС; u – напряжение на обмотке управления МЭП.

Дополнив систему уравнений, описывающих поведение собственно МЭП, приведенную в работе [5], уравнениями регулятора (1) и (2), представим описание рассматриваемой структуры в векторно-матричной форме:

$$\frac{d\mathbf{Y}}{dt} = \mathbf{A}\mathbf{Y} + \mathbf{B}\mathbf{U}, \tag{3}$$

где

$$\mathbf{Y}^T = [i \quad \Omega \quad \alpha \quad y_p], \quad \mathbf{U}^T = [U_3 \quad M_c],$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & -\frac{K_e T_v + K_{dc} T_d K_p}{L T_v} & 0 & -\frac{(T_d - T_v) K_p}{L T_v^2} \\ \frac{K_i}{J} & -\frac{f}{J} & -\frac{K_\alpha}{J} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -K_{dc} & 0 & -\frac{1}{T_v} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{K_p \cdot T_d}{L \cdot T_v} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{J} \\ 0 & 0 \\ 1 & -\frac{1}{T_v} \end{bmatrix}.$$

Осуществляя компенсацию электрической постоянной времени обмотки управления выбором $T_d = T_\alpha$ и $T_v \ll T_{дв}$, без большой погрешности передаточные функции контура по задающему U_3 и возмущающему M_c воздействиям можно представить в виде выражений

$$\frac{\Omega(p)}{U_3(p)} = \frac{p K_\Omega^*}{\left(\frac{1}{\omega_0^2} p^2 + \frac{K_\Omega^*}{\omega_0^2} p + 1\right) K_{dc} \omega_0^2},$$

$$\frac{\Omega(p)}{M_c(p)} = \frac{p}{\left(\frac{1}{\omega_0^2} p^2 + \frac{K_\Omega^*}{\omega_0^2} p + 1\right) K_\alpha},$$

где $\omega_0 = \sqrt{K_\alpha / J}$ – резонансная частота МЭП;

$$K_\Omega^* = \frac{K_i K_p K_{dc}}{J R}. \tag{4}$$

Эти передаточные функции при $K_{dc} \gg K_e$ и выборе коэффициента K_Ω^* из условия $K_\Omega^* \geq 2\omega_0$ принимают вид

$$\frac{\Omega(p)}{U_3(p)} = \frac{K_\Omega^* p}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1) K_{dc} \omega_0^2}, \tag{5}$$

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

Постоянные времени определяются по формулам

$$T_1 = \frac{1}{\frac{K_{\Omega}^*}{2} - \sqrt{\left(\frac{K_{\Omega}^*}{2}\right)^2 - \omega_0^2}}, T_2 = \frac{1}{\frac{K_{\Omega}^*}{2} + \sqrt{\left(\frac{K_{\Omega}^*}{2}\right)^2 - \omega_0^2}}. \quad (7)$$

Анализ передаточных функций (5) и (6) показывает, что при постоянных напряжении задания и моменте 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.

Математическое моделирование

Реакция контура на скачкообразное входное воздействие определяется выражением

$$\Omega(t) = \Omega_3 \frac{K_{\Omega}^*}{\omega_0^2} \cdot \left[\frac{1}{T_1 - T_2} \exp(-t/T_1) - \frac{1}{T_1 - T_2} \cdot \exp(-t/T_2) \right]$$

или

$$\Omega(t) = \Omega_3 \cdot \gamma \cdot [\exp(-t/T_1) - \exp(-t/T_2)], \quad (8)$$

где $\Omega_3 = U_3/K_{\Omega}$ – заданное значение скорости; $\gamma = \frac{K_{\Omega}^*}{\omega_0^2(T_1 - T_2)}$.

Следует отметить, что при достаточно больших значениях K_{Ω} , γ близко к 1.

Реакция координат привода с параметрами МЭП, приведенными выше, и $K_{\Omega} = 200$ на скачкообразное входное воздействие $\Omega_3 = 1$ град/с (0,018 1/с) представлена на рис. 4. Здесь 1 – заданное значение скорости Ω_3 ; 2, 3, 4 – кривые соответственно скорости Ω , угла поворота α , тока в обмотке управления i , полученные на математической модели (3) в среде Mathcad; 5 – кривая скорости, рассчитанная по выражению (8). Как видно, кривые 2 и 5 практически совпадают, что говорит о корректности предложенного далее подхода к синтезу регулятора.

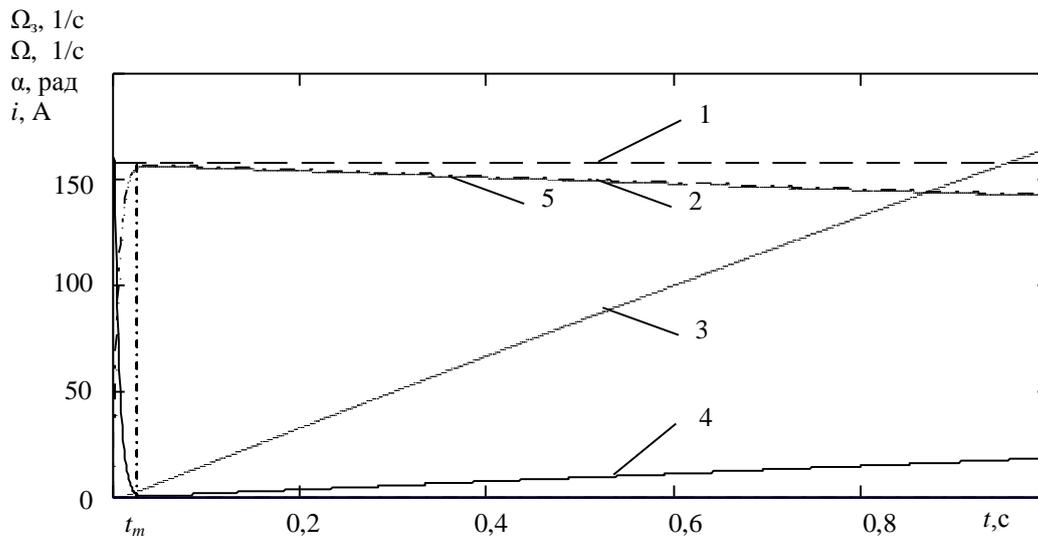


Рис. 4. Диаграмма реакции координат на скачкообразное задающее воздействие: 1 – заданное значение скорости Ω_3 ; 2 – кривая скорости Ω , полученная на математической модели (3); 3 – угол поворота α ; 4 – ток в обмотке управления i ; 5 – кривая скорости, рассчитанная по выражению (8)

Находя время достижения максимума t_m кривой (8) из условия $\frac{d\Omega}{dt}(t_m) = 0$, получим

$$t_m = \frac{T_1 \cdot T_2}{T_1 - T_2} \ln\left(\frac{T_1}{T_2}\right). \quad (9)$$

Максимальное значение скорости в переходном процессе Ω_m определяется по формуле

$$\Omega_m = \Omega_3 \cdot \gamma \cdot [\exp(-t_m/T_1) - \exp(-t_m/T_2)]. \quad (10)$$

При $T_1 \gg T_2$ и $T_1 \gg t_p$ на участке спада кривой 2 без большой погрешности процесс падения скорости можно считать линейным с ускорением $-\Omega_3 \cdot \gamma / T_1$. Тогда к концу рабочего участка скорость упадет на $\Omega_3 \cdot \gamma \cdot t_p / T_1$, а относительная погрешность поддержания заданного значения скорости составит $\Delta = t_p / T_1$. За-

даваясь допустимой погрешностью Δ , определяем требуемое значение постоянной времени T_1 и из выражения (4) находим требуемое значение коэффициента K_{Ω}^* по формуле

$$K_{\Omega}^* = (\omega_0^2 + \Delta^2)t_p / \Delta. \quad (11)$$

Используя соотношение (4), легко найти значение коэффициента передачи K_{Π} :

$$K_{\Pi} = \frac{K_{\Omega}^* J R}{K_i K_{дс}}. \quad (12)$$

В табл. 2 приведены значения коэффициента передачи ПД-регулятора, рассчитанные по формуле (12), и параметры кривой скорости, рассчитанные по формулам (7), (9), (10) из условия обеспечения заданной погрешности Δ при $\Omega_3=1$ град/с (0,018 1/с), на рабочем участке при сканировании в режиме широкого углового поля ($t_p=1$) и параметрах МЭП, приведенных выше. В последнем столбце таблицы приведены значения амплитуд всплесков напряжения U_m на обмотке управления МЭП, возникающих в моменты смены участков трапецеидальной диаграммы сканирования, полученные при математическом моделировании режима сканирования в широком угловом поле при $M_{c0}=0$. Это видно из диаграмм, представленных на рис. 5, а, соответствующих системе, синтезированной из условия обеспечения погрешности $\Delta=5\%$. Здесь 1 – заданное значение скорости Ω_3 ; 2, 3, 4 – кривые соответственно скорости Ω , угла поворота α , тока в обмотке управления i , полученные на математической модели (3) в среде Mathcad; 5 – диаграмма напряжения на обмотке управления u , сформированная по уравнению (2).

$\Delta\%$	T_1, c	K_{Π}	T_2, c	t_m, c	γ	$\Omega_m, 1/c$	U_m, B
20	5,06	100	0,011	0,067	1,004	0,018	12
10	10	200	0,0056	0,042	1,001	0,018	24
5	20	390	0,0025	0,025	1	0,018	44
2	50.	984	0,0011	0,012	1	0,018	88

Таблица 2. Результаты расчета и моделирования режима сканирования в широком угловом поле

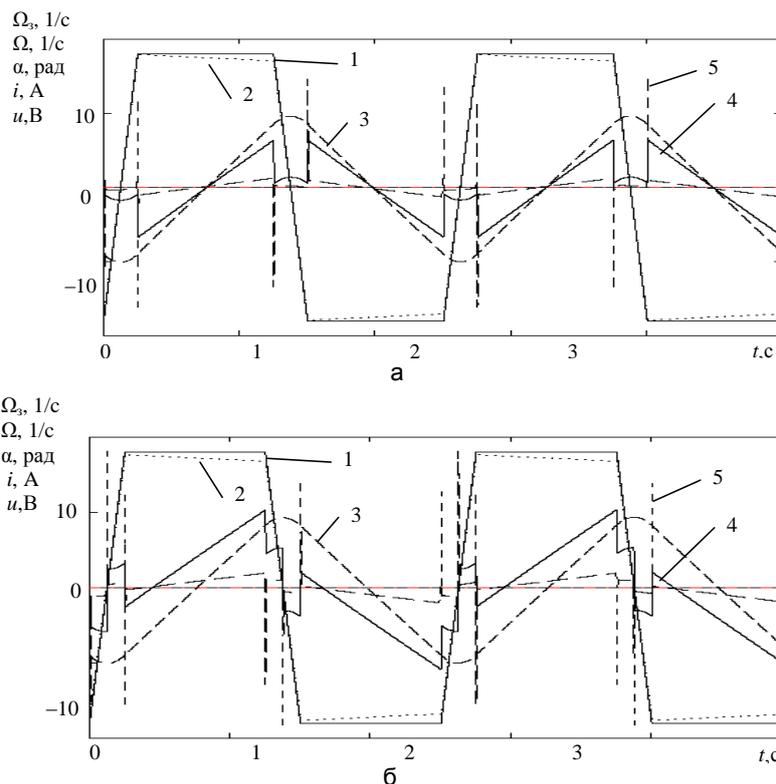


Рис. 5. Диаграмма моделирования режима сканирования в широком угловом поле при $M_{c0}=0$ (а); при $M_{c0}=25$ Нм (б): 1 – заданное значение скорости в масштабе 1000:1; 2 – скорость в масштабе 1000:1 (рад/с); 3 – угол поворота вала МЭП в масштабе 1000:1; 4 – ток в обмотке управления в масштабе 20:1; 5 – напряжение на обмотке управления в масштабе 1:3

Как явно следует из табл. 2, снижение ошибки на рабочем участке связано с повышением коэффициента передачи регулятора K_{Π} . Однако повышение K_{Π} приводит к росту амплитуды U_m всплесков напряжения u на выходе ПД-регулятора на границе смены рабочих участков диаграммы сканирования. Дело в том, что такая система является статической по задающему воздействию, и, следовательно, ей

свойственна ошибка, пропорциональная скорости изменения сигнала задания на нерабочем участке диаграммы сканирования. Поскольку скорость задания при смене участков меняется практически скачком, скачком изменяется и ошибка на входе ПД-регулятора. Этим обусловлены и всплески напряжения на обмотке управления.

Результаты моделирования, представленные на рис. 5, б, иллюстрируют процессы сканирования в широком угловом поле при наличии момента сухого трения в опорах оси с величиной $M_{c0}=25$ Нм для системы, синтезированной из условия обеспечения погрешности $\Delta=5\%$. Влияние такого момента нагрузки проявляется как в увеличении на 2% относительно расчетной погрешности поддержания скорости на рабочем участке диаграммы сканирования, так и в появлении дополнительных всплесков напряжения на обмотке управления МЭП в моменты перехода скорости через 0. Эти всплески, по амплитуде достигающие значения 68 В, объясняются высокой скоростью изменения тока в обмотке управления и, следовательно, всплеском напряжения на индуктивности обмотки управления при смене знака реактивного момента M_c .

При сканировании в узком угловом поле ($t_p=0,17$) и при расчете K_n по формулам (11) и (12) из условия обеспечения $\Delta=2\%$ имеем $K_n=167$; $T_1=8,5$ с; $T_2=0,0065$ с. При этом амплитуда всплеска напряжения на обмотке управления $U_m=48$ В. Таким образом при заданном предельно допустимом напряжении на обмотке управления в системе с ПД-регулятором скорости 48 В при сканировании в широком угловом поле может быть реализована погрешность не менее 5%, а при сканировании в узком поле – не менее 2%.

Одним из путей повышения точности при обеспечении предельно допустимого напряжения на обмотке управления МЭП является формирование траектории движения на нерабочем участке так, чтобы подход к рабочему участку и выход с него осуществлялся с нулевым ускорением. Более радикальный путь – использование двухконтурной структуры, обеспечивающей повышение порядка астатизма как по задающему, так и по возмущающему воздействию в виде момента нагрузки типа «сухое трение».

Заключение

В ходе работы была предложена векторно-матричная модель и методика синтеза одноконтурной системы регулирования скорости электропривода оси сканирования инфракрасного телескопа с компенсацией электрической постоянной времени с помощью пропорционально-дифференциального регулятора. Полученные расчетные соотношения позволяют аналитически получить требуемые значения коэффициента пропорциональности пропорционально-дифференциального регулятора при заданном значении погрешности поддержания скорости на рабочем участке диаграммы сканирования. 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: при сканировании в широком угловом поле может быть реализована погрешность не менее 5%, а при сканировании в узком поле – не менее 2%. Намечены пути снижения ошибки на рабочих участках диаграммы сканирования и амплитуды всплесков напряжения на обмотке управления в моменты смены рабочих и нерабочих участков.

Литература

1. Борисов П.А., Томасов В.С. Методы анализа и синтеза энергоподсистем электротехнических комплексов с высокими энергетическими показателями // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2009. – № 1 (59). – С. 5–13.
2. Толмачев В.А., Никитина М.В., Сергеева М.Е. Синтез системы управления электропривода азимутальной оси алтайского телескопа ТИ.3-12 // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2010. – № 5 (69). – С. 39–43.
3. Толмачев В.А., Антипова И.В., Фомин С.Г. Математическая модель следящего электропривода оси опорно-поворотного устройства // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2007. – № 44. – С. 142–147.
4. Решетников Е.М., Саблин Ю.А. Электромеханические преобразователи гидравлических и газовых приводов. – М.: Машиностроение, 1982. – 144 с.
5. 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.
6. 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.

Толмачев Валерий Александрович – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, tolmachev@ets.ifmo.ru

Субботин Дмитрий Андреевич – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, SubbDm@yandex.ru