

УДК 681.5.11

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМА СКАНИРОВАНИЯ ИНФРАКРАСНОГО ТЕЛЕСКОПА

© Валерий Александрович Толмачёв, Дмитрий Андреевич Субботин

Санкт-Петербургский Государственный Университет
Информационных Технологий Механики и Оптики, Санкт-Петербург, Россия
Subb-Dm@yandex.ru

Аннотация: Обоснована целесообразность обеспечения трапециoidalной диаграммы сканирования с заданной допустимой нелинейностью на рабочих участках путем формирования задающего воздействия в виде суммы конечного числа гармонических составляющих. Приведены аналитические соотношения для расчета амплитуд и начальных фаз гармонических составляющих задающего воздействия. Правомерность подхода и корректность расчетных соотношений подтверждена результатами математического моделирования.

Ключевые слова: ось сканирования, магнитоэлектрический преобразователь, гармоники, задающие воздействие.

INFRARED TELESCOPE SCANNING MODE ANALYSIS

V.A. Tolmachev, D.A. Subbotin

Saint-Petersburgs National Research University
of Information Technologies, Mechanics and Optics

Abstract:

In the article was justified the expediency of providing trapezoidal scan diagram with a given admissible nonlinearity at work periods, through the formation of the driving exposure as the sum of a finite number of harmonic components. The analytical relations for calculating the amplitudes and initial phases of harmonic components defining impact. The legitimacy of the approach and the correctness of the calculated ratios confirmed with the results of mathematical modeling.

Keywords: scanning axis, magneto electric converter, harmonics, transient.

Основу системы наведения (СН) современного телескопа составляют опорно-поворотное устройство (ОПУ) и силовые следящие электроприводы (ССЭП). Например система наведения инфракрасного телескопа строится на основе трёхосного ОПУ с азимутальной, угломестной и сканирующей осями. На каждой из осей расположен электроагрегат, содержащий электрический двигатель и датчики угла поворота и скорости двигателя с жёстко связанными валами. 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 на рис. 1.

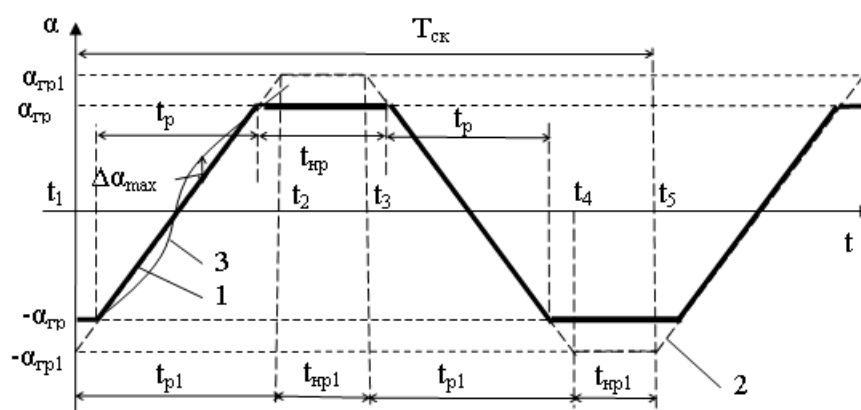


Рис. 1. Диаграмма сканирования электропривода

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_{np} . На участках рабочего хода угол поворота оси должен меняться линейно в пределах от $-\alpha_{гр}$ до $+\alpha_{гр}$ с допустимой погрешностью нелинейности $\Delta_n\%$. Закон изменения угла на участках нерабочего хода не лимитируется. Длительность нерабочего хода измеряется между окончанием одного рабочего хода и началом следующего.

Будем ориентироваться на параметры диаграммы, представленные в таблице.

Таблица 1. Параметры диаграммы сканирования

Режим сканирования	$\alpha_{гр}, ^\circ$	$T_{ск}, с$	$t_p, с$	$t_{np}, с$	$\Delta_n\%$
Широкое угл. поле	30	2,4	1	0,2	15
Узкое угл. поле	5	0,5	0,17	0,08	10

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.

В работе [1] проведен анализ статических и динамических характеристик МЭП с ограниченным углом поворота для приводов сканирования. На основе анализа обоснована целесообразность построения системы управления электропривода по двухконтурной структуре, содержащей внутренний контур динамической коррекции с П-регулятором для демпфирования слабо затухающих угловых колебаний вала с обратной связью по скорости и внешний контур регулирования угла с ПИД-регулятором, настраиваемый на технический оптимум.

Для обеспечения требуемого линейного изменения угла поворота исполнительной оси на рабочих участках диаграммы сканирования и движения с минимальными скоростями и ускорениями на нерабочих участках, при переходе от одного рабочего участка к другому, необходимо правильно формировать задающее воздействие.

Один из вариантов построения такого задающего воздействия – формирование его в виде суммы конечного числа гармонических составляющих периодического трапециидального сигнала, представленного на рис. 1., а число гармоник определять путем математического моделирования по степени приближения закона движения оси сканирования на рабочих участках к линейному.

Известно [3] и др., что периодический трапециидальный сигнал с амплитудой $\alpha_{гр}$ можно представить в виде суммы синусоидальных составляющих с частотами кратными основной частоте ω , т.е.

$$\alpha(t) = \sum_{k=1}^{\infty} \alpha_{mk} \sin(k\omega t + \psi_k). \quad (2)$$

Амплитуды α_{mk} гармоник с четными номерами ($k=2, 4, 6, \dots$) равны нулю, амплитуды гармоник с нечетными номерами определяются формулой

$$\alpha_{mk} = \frac{4\alpha_{гр}}{k\pi} \frac{\sin(k\theta)}{k\theta}, \quad (3)$$

где

$$\theta = \pi \frac{t_p}{T_{ск}}. \quad (4)$$

Математическое моделирование показало, что допустимая нелинейность на рабочих участках режима сканирования может быть обеспечена при минимальном числе гармонических составляющих сигнала задания, если при формировании трапеции расширить длительность участков t_2-t_3 и t_4-t_5 до значения $t_{p1} = (1.1-1.2) t_p$ или что тоже формировать линейное движение с той же скоростью, но в диапазоне углов от $-\alpha_{гр1}$ до $+\alpha_{гр1}$ при $\alpha_{гр1} = (1.1-1.2) \alpha_{гр}$ (кривая 2 на рис.1). Естественно, что период сканирования остается прежним.

В соответствии с техническим заданием, допустимое максимальное отклонение закона колебаний от линейного на рабочем участке при сканировании в узком поле не должно превышать 10%, в широком поле- 15%. Для оценки отклонения от линейного движения будем использовать понятие приведенной погрешности воспроизведения линейной зависимости $\chi\%$. Если, например, эталонная линейная зависимость представлена прямой 1 на рис. 1, а истинное движение на рабочем участке характеризуется кривой 3, то приведенная погрешность определяется формулой

$$\chi\% = 100 \frac{|\Delta\alpha_{max}|}{2\alpha_{гр}}, \quad (5)$$

где $\Delta\alpha_{max}$ – модуль максимального отклонения истинной кривой от эталонной прямой, а $2\alpha_{гр}$ – верхний предел изменения угла в рабочем диапазоне в предположении, что нижний предел – ноль.

Расчетные значения амплитуд 1, 3 и 5 гармоник ($\alpha_{m1}, \alpha_{m3}, \alpha_{m5}$) трапециидальных кривых изменения угла для режимов сканирования в широком и узком угловых полях представлены в таблице 2, где ω - угловая частота первой гармоники. Знак (-) означает начальную фазу гармоники - $\pm\pi$ рад.

Таблица 2.

Режим сканирования	$\alpha_{гр1}$, рад	θ , рад	ω , с ⁻¹	α_{m1} , рад	α_{m3} , рад	α_{m5} , рад
Широкое угл. поле	9.35E-3	1.41	2.62	8.192E-3	-8.492E-4	2.633E-4
Узкое угл. поле	1.75E-3	1.274	12.736	1.673E-3	-1.221E-4	5.929E-6

Поскольку полоса пропускания частот замкнутой системы регулирования угла, настроенной на технический оптимум не превышает величины $1/2 T_{\mu}$ [4] и частоты ряда гармоник находятся за пределами этой полосы, то при формировании сигнала задания следует учитывать возможное ослабление амплитуд гармонических составляющих угла на исполнительной оси и их фазовые сдвиги относительно гармонических составляющих сигнала задания.

Для замкнутой системы, настроенной на технический оптимум, комплексный коэффициент передачи (АФЧХ) определяется известной формулой [4]

$$W(j\omega) = \frac{(1 - 2T_{\mu}^2\omega^2)}{(1 - 2T_{\mu}^2\omega^2)^2 + (2T_{\mu}\omega)^2} - j \frac{2T_{\mu}\omega}{(1 - 2T_{\mu}^2\omega^2)^2 + (2T_{\mu}\omega)^2} = A(\omega) + jB(\omega), \quad (6)$$

где ω – угловая частота сигнала задания.

Амплитудно- частотная характеристика (модуль АФЧХ) определяется как

$$H(\omega) = \text{mod}W(j\omega) = \sqrt{A(\omega)^2 + B(\omega)^2} = \sqrt{\frac{1}{1 + 4T_{\mu}^4 \omega^4}}, \quad (7)$$

а фазочастотная характеристика представляется зависимостью

$$\varphi(\omega) = \text{arctg}[B(\omega)/A(\omega)] = \text{arctg} \frac{2T_{\mu} \omega}{(1 - 2T_{\mu}^2 \omega^2)}. \quad (8)$$

Рассчитанные по формулам (7) и (8) значения коэффициента передачи и фазового сдвига для системы с $T_{\mu} = 0.033$ с. при $\omega_k = k\omega$ представлены в таблицах 3 и 4 соответственно для режимов сканирования в широком и узком угловом поле.

Таблица 3

Частота , Гц	0.417 (κ=1)	1.251(κ=3)	2,085 (κ=5)
ω_k , 1/с	2.62	7.86	13.1
$H(\omega_k)$	1	0.991	0.852
$\varphi(\omega_k)$, рад	-0.188	-0.524	-1.38

Таблица 4

Частота , Гц	2.027 (κ=1)	6.81(κ=3)	10,135 (κ=5)
ω_k , 1/с	12.736	38.208	63.68
$H(\omega_k)$	0.941	0.295	0.11
$\varphi(\omega_k)$, рад	-0.93	-2.443	-2.93

Будем производить формирование сигнала задания мы в виде суммы трех синусоид $\alpha_3(t) = \alpha_{3m1} \text{Sin}(\omega t + \psi_{31}) + \alpha_{3m3} \text{Sin}(3\omega t + \psi_{33}) + \alpha_{3m5} \text{Sin}(5\omega t + \psi_{35})$, (9)

с амплитудами α_{3mk} и начальными фазами Ψ_k , определяемыми соответственно формулами

$$\alpha_{3mk} = \frac{4\alpha_{Гр1} \text{Sin}(k\omega)}{k\pi k\theta H(\omega_k)}, \quad (10)$$

$$\psi_{3k} = \psi_k - \varphi(\omega_k). \quad (11)$$

Параметры этих синусоид представлены в таблице 5.

Таблица 5

Режим сканирования	α_{3m1} , рад	Ψ_{31} , рад	α_{3m3} , рад	Ψ_{33} , рад	α_{3m5} , рад	Ψ_{35} , рад
Широкое угл. поле	8.192E-3	0.188	-8.57E-4	0.524	3.091E-4	1.38
Узкое угл. поле	1.778E-3	0.93	4.139E-4	2.443	5.39E-5	2.93

Результаты моделирования процессов сканирования в синтезированной системе с параметрами задающего воздействия, приведенными в таблице 5, сведены в таблицу 6. При этом исследование проводилось с использованием детальной математической модели привода, предложенной в [2]. В процессе моделирования определялись приведенная погрешность воспроизведения линейной зависимости $\chi\%$ на рабочих участках цикла сканирования, максимальное мгновенное значение тока в обмотке управления $i_{y\text{max}}$ и максимальное мгновенное значение напряжения на обмотке управления $u_{y\text{max}}$. Интересующие нас параметры определялись в каждом режиме при трех вариантах формирования кривой угла задания. В первом варианте кривая задания содержала только первую гармонику ($\alpha_{3m1} \neq 0$, $\alpha_{3m3} = 0$, $\alpha_{3m5} = 0$), во втором – сумму первой и третьей

гармоник ($\alpha_{3m1} \neq 0, \alpha_{3m3} \neq 0, \alpha_{3m5} = 0$), в третьем- сумму первой, третьей и пятой гармоник ($\alpha_{3m1} \neq 0, \alpha_{3m3} \neq 0, \alpha_{3m5} \neq 0$).

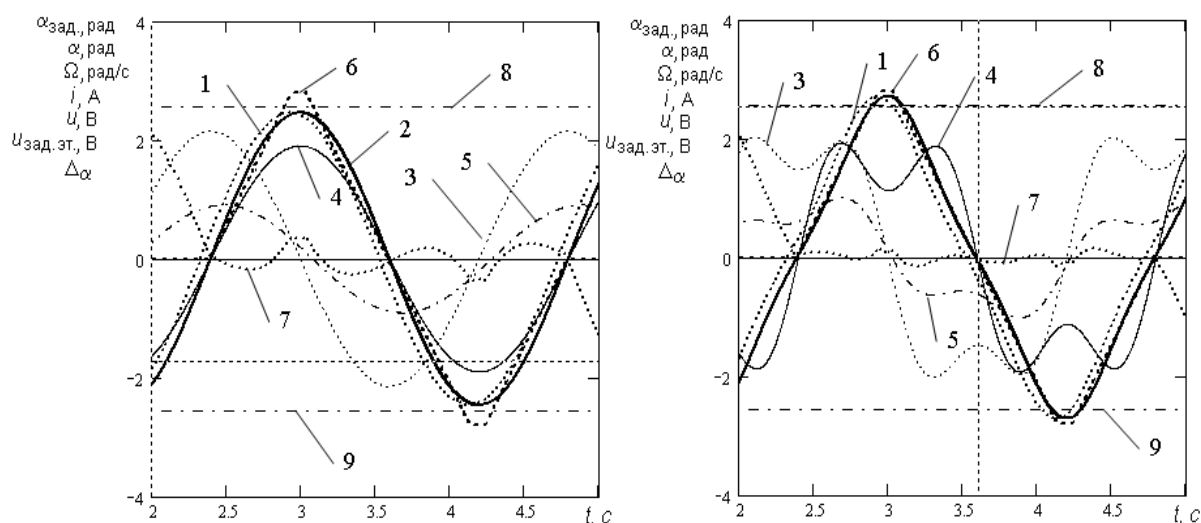


Рис.2,а,б. Графики координат электропривода при сканировании в широком поле

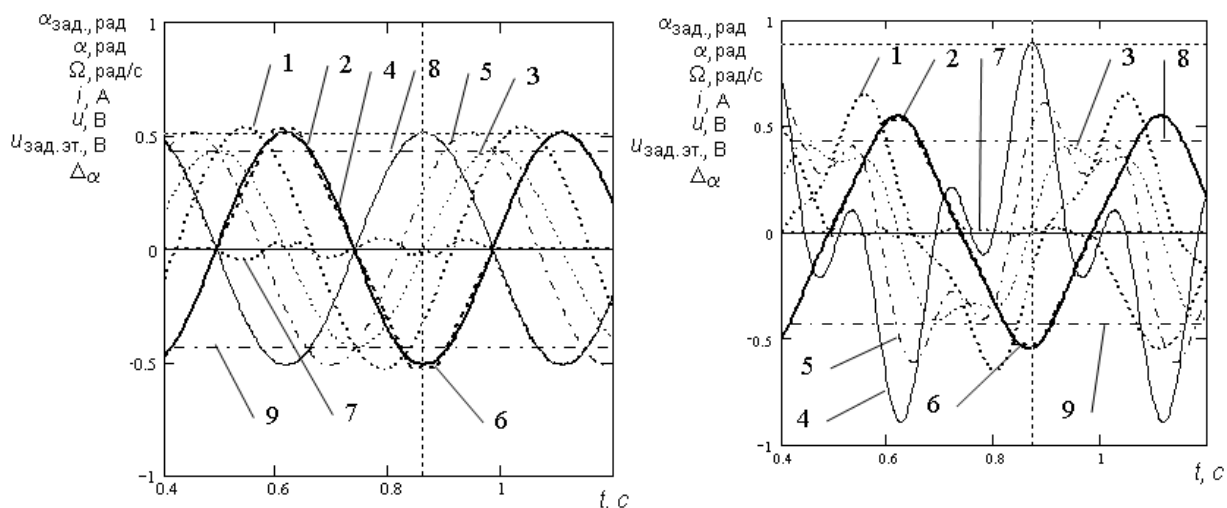


Рис.3,а,б. Графики координат электропривода при сканировании в узком поле

На рис.2.а -2,б и 3,а-3,б представлены графики изменения основных координат системы в установившемся режиме сканирования соответственно в широком и узком угловом поле. На всех рисунках : 1 - кривая угла задания $\alpha_3(t)$, 2 – угол поворота сканирующей оси $\alpha(t)$, 3- скорость вращения оси $\Omega(t)$, 4- ток в обмотке управления ЭМП, 5- напряжение на обмотке управления $u(t)$ ЭМП , 6 – эталонная трапеция, 7- разность эталонной и истинной кривой угла поворота, 8,9 – границы рабочих зон режима сканирования.

Таблица 6

Вариант кривой задания	Вариант 1			Вариант 2			Вариант 3		
	$\chi\%$	$i_{y\max,A}$	$u_{y\max,B}$	$\chi\%$	$i_{y\max,A}$	$u_{y\max,B}$	$\chi\%$	$i_{y\max,A}$	$u_{y\max,B}$
Широкое поле	5.2	0.019	0.93	2.8	0.019	1	2	0.028	1.11
Узкое поле	5	0.051	1.02	2.5	0.09	1.2	1.8	0.094	1.2

Анализируя результаты моделирования режимов сканирования при нулевых моментах нагрузки на оси, представленные в таблице 6, можно установить следующие закономерности:

- приведенная погрешность воспроизведения линейной зависимости на рабочих участках не превышает 5.2% уже при формировании кривой задания только в виде первой гармоники эталонной трапеции с параметрами, указанными в таблице 2.4, при сканировании как в широком, так и в узком поле;
- добавление третьей гармоники в кривую задания позволяет снизить указанную погрешность практически вдвое;
- добавление пятой гармоники приводит к снижению приведенной погрешности на величину (0.7-0.8)%, так что при формировании кривой задания из 1, 3 и 5 гармоник указанная погрешность составляет величину (1.8-2)%;
- добавление высших гармоник в кривую задания приводит, естественно, к отклонению кривых токов и напряжений на обмотке управления от синусоидальных и к росту их максимальных мгновенных значений, как это видно из рисунков 3,4;
- наиболее существенен этот рост при сканировании в узком поле, когда с добавлением третьей гармоники максимальное мгновенное значение тока возрастает с 51 мА до 90 мА.

Результаты анализа влияния величины момента типа «сухое трение» на величину погрешности нелинейности представлены в таблице 7.

Таблица 7

Момент M_c , Нм	0			0.8			1.2		
	$\chi\%$	$i_{y\max,A}$	$u_{y\max,B}$	$\chi\%$	$i_{y\max,A}$	$u_{y\max,B}$	$\chi\%$	$i_{y\max,A}$	$u_{y\max,B}$
Широкое поле	2	0.019	0.93	2	0.035	1.19	2.4	0.037	1.22
Узкое поле	1.8	0.051	1.02	5.2	0.086	1.6	10	0.082	1.2

Как видно из приведенной таблицы, уже при номинальном моменте 0.8 Нм погрешность нелинейности при сканировании в узком поле возрастает относительно погрешности при нулевом моменте практически втрое, но при этом остается вдвое меньше максимально допустимой (10%). При повышении момента нагрузки на 50 % относительно номинального, погрешность достигает максимально допустимой. Следует отметить относительно слабое влияние изменения момента нагрузки в указанном диапазоне на максимальные мгновенные значения тока и напряжения на обмотке управления. При дальнейшем повышении момента нагрузки погрешность нелинейности возрастает в пропорции 7.5%/Нм.

При сканировании в широком угловом поле изменение момента нагрузки в диапазоне от 0 до 2 $M_{сном}$ оказывает слабое влияние как погрешность нелинейности, так и на величины максимальных мгновенных значений тока и напряжения на обмотке управления МЭП. При повышении момента нагрузки погрешность нелинейности возрастает в пропорции 3%/Нм.

Анализ показал, что появление ветрового момента нагрузки практически не оказывает влияния на величину погрешности нелинейности. С ростом этого момента растут лишь постоянные составляющие тока и напряжения на обмотке управления.

Литература

1. Толмачёв В.А., Демидова Г.Л. Математические модели и динамические характеристики электромеханических преобразователей с ограниченным углом поворота. // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т.51, № 11. с.18-23.

2. Толмачёв В.А., Демидова Г.Л., Субботин Д.А. Система управления электропривода сканирующей оси телескопа // Изв. вузов. Приборостроение.
3. Атабеков Г.И. Теоретические основы электротехники . Ч.1. Линейные электрические цепи. –М.: Энергия, 1978. 592 с.
4. Ф. Фрер, Ф. Ортенбургер. Введение в электронную технику регулирования. Москва. Энергия. 1973.

Поступила: 20.06.11.