

Рис. 7.

Полученное математическое описание привода с ЛДПТ позволяет разрабатывать алгоритмы управления для решения с его помощью различных задач. На примере моделирования задачи позиционирования показано, что двухрежимное управление приводом может обеспечить достаточно высокое быстродействие (ускорение $\sim 1 \text{ м/с}^2$) и необходимую точность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бурый Л. В., Коронкевич В. П., Нестерихин Ю. Е., Нестеров А. А., Пушной Б. М., Ткач С. Е., Щербаченко А. М. Прецизионный фотограмметрический автомат.— «Автометрия», 1974, № 4, с. 83—89.
2. Егоршин А. О., Иванов В. А. О регуляризации в задаче автоматической настройки параметров модели.— «Автометрия», 1974, № 2, с. 54—62.
3. Иванов В. А. К вопросу о введении адаптации в методе настраиваемой модели при идентификации нестационарных объектов.— В кн.: Системы автоматизации научных исследований. Новосибирск, Изд. ИАиЭ СО АН СССР, 1976.
4. Ламмеранер Н., Штафль М. Вихревые токи. Пер. с чеш. М.—Л., «Энергия», 1967.
5. Понтрягин Л. С., Болтянский В. Г., Гамкрелидзе Р. В., Мищенко Е. Ф. Математическая теория оптимальных процессов. М., «Наука», 1969.
6. Ньютон Дж. К., Гулд Л. А., Кайзер Дж. Ф. Теории линейных следящих систем. М., Изд-во физ.-мат. лит., 1961.

Поступила в редакцию 13 января 1977 г.

УДК 681.327.521

Г. М. МАМОНТОВ, А. К. ПОТАШНИКОВ, Г. Ф. СИТНИКОВ
(Новосибирск)

ВЛИЯНИЕ ДЕСТАБИЛИЗИРУЮЩИХ ФАКТОРОВ НА ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕКТРОННЫХ СКАНИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ

В электронных сканирующих устройствах (ЭСУ) в качестве датчика бегущего светового пятна часто используются высокоразрешающие электронно-лучевые трубки (ЭЛТ) с электромагнитной системой

фокусировки и отклонения луча [1, 2], а в качестве светочувствительного приемника, регистрирующего световой песток, прошедший через элемент носителя,— фотоэлектронный умножитель (ФЭУ). Наиболее критичные параметры фотоэлектрического узла ЭСУ, влияющие на точность и надежность работы всего устройства,— разрешающая способность, зависящая от диаметра светового пятна на экране ЭЛТ, точность позиционирования, стабильность светового потока и стабильность анодной чувствительности ФЭУ.

В данной работе рассмотрено влияние питающих напряжений на параметры датчика светового пятна, а также стабильность работы ФЭУ в электронных сканирующих устройствах.

Современные высокоразрешающие ЭЛТ работают при напряжениях $U_a = 15 \dots 25$ кВ, получаемых, как правило, с помощью электронных преобразователей. Поэтому на выходе высоковольтного стабилизатора всегда присутствуют пульсации с частотой преобразования.

В системах с магнитным отклонением электронного луча полный угол поворота касательной в конце отклоняющего поля определяется выражением [3]

$$\theta = \sqrt{\frac{e}{2mU_a}} \int_{s_1}^{s_2} H_x ds, \quad (1)$$

где e — заряд электрона, m — его масса, s_1 и s_2 — точки траектории, соответствующие началу и концу участка, на котором действует отклоняющее поле H_x . Как видно из выражения (1), необходимая для заданного отклонения напряженность магнитного поля возрастает пропорционально $\sqrt{U_a}$. Изменение угла отклонения, вызванное нестабильностью U_a , при постоянной величине напряженности отклоняющего поля можно выразить следующим образом:

$$\Delta\theta \approx d\theta = (\partial\theta/\partial U_a) dU_a.$$

Дифференцирование выражения (1) дает

$$d\theta = -\frac{1}{2} \left(\frac{e}{2mU_a^3} \right)^{1/2} dU_a \int_{s_1}^{s_2} H_x ds.$$

Относительное изменение угла отклонения от колебаний ускоряющего напряжения

$$\Delta\theta/\theta = -\Delta U_a/2U_a. \quad (2)$$

Отсюда следует, что колебания ускоряющего напряжения в пределах 0,1% от номинального значения приводят к нестабильности угла отклонения до 0,05%.

Теперь найдем выражение, связывающее погрешность позиционирования светового пятна на экране ЭЛТ с величиной колебаний ускоряющего напряжения ΔU_a . Пусть угол отклонения получил приращение $\Delta\theta$. При этом величина смещения электронного луча получит приращение

$$\Delta h = L [\operatorname{tg}(\theta + \Delta\theta) - \operatorname{tg} \theta],$$

где $h = L \operatorname{tg} \theta$ — отклонение электронного луча от центра экрана, а L — расстояние от центра отклоняющей системы до экрана. Тогда погрешность позиционирования, вызванная колебаниями ускоряющего напряжения, с учетом выражения (2) может быть записана в следующем виде:

$$|\Delta h| = L \{ \operatorname{tg}[\theta(1 \pm (\Delta U_a/2U_a))] - \operatorname{tg} \theta \}. \quad (3)$$

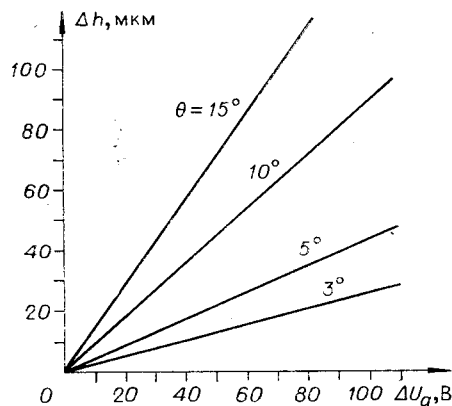


Рис. 1.

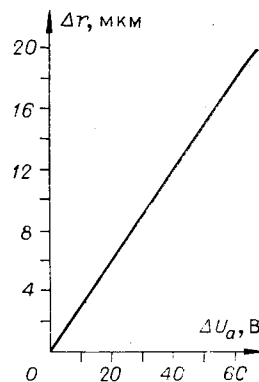


Рис. 2.

На рис. 1 приведена зависимость $|\Delta h|$ от ΔU_a , соответствующая выражению (3) при $U_a = 15$ кВ, $L = 150$ мм и различных углах θ . Графики позволяют оценить влияние колебаний U_a на точность позиционирования светового пятна. Так, колебания U_a , составляющие 0,1% от номинального значения 15 кВ, при угле отклонения $\theta = 20^\circ$ приводят к погрешности позиционирования $\Delta h = 20$ мкм.

Рассмотрим влияние колебаний ускоряющего напряжения на величину дефокусировки светового пятна. Фокусирующее действие катушки, заключенной в корпус из магнитомягкого материала с воздушным зазором, описывается выражением

$$f = AU_a / (I^2 N^2), \quad (4)$$

где A — постоянный коэффициент, IN — ампер-витки, f — фокусное расстояние. Из (4) легко найти выражение для относительного изменения фокусного расстояния при изменении U_a :

$$\Delta f / f = \Delta U_a / U_a. \quad (5)$$

Найдем теперь зависимость приращения радиуса светового пятна Δr на экране ЭЛТ при изменении фокусного расстояния на величину Δf . Для рассматриваемых фокусирующих катушек справедлива формула тонкой линзы

$$1/f = 1/a + 1/b. \quad (6)$$

Поэтому если расстояние a от кроссовера до главной плоскости линзы неизменно, то приращение фокусного расстояния вызовет смещение плоскости оптимальной фокусировки на величину Δb :

$$1/(f + \Delta f) = 1/a + 1/(b + \Delta b). \quad (7)$$

Радиус светового пятна на экране ЭЛТ получит приращение

$$\Delta r = d \Delta b / (b + \Delta b), \quad (8)$$

где $d = a \operatorname{tg} \alpha$ — радиус сечения электронного пучка главной плоскостью фокусирующей линзы, α — половина апертурного угла этого пучка.

Величина $\operatorname{tg} \alpha$ легко находится из геометрических представлений, если известны радиус r_0 нефокусированного светового пятна на экране ЭЛТ и расстояние между кроссовером и экраном:

$$\operatorname{tg} \alpha = r_0 / (a + b). \quad (9)$$

Вытя выражение (7) из (6), получим уравнение, связывающее Δf с Δb :

$$\Delta f/[f(f+\Delta f)] = \Delta b/[b(b+\Delta b)]. \quad (10)$$

После подстановки формул (8) и (9) в (10) и преобразования получим выражение, связывающее Δr с относительным изменением фокусного расстояния:

$$\Delta r = r_0 \frac{\Delta f/f}{1 + \Delta f/f}. \quad (11)$$

Воспользовавшись выражением (5), можно найти зависимость Δr от величины колебаний ускоряющего напряжения:

$$\Delta r = r_0/(U_a/\Delta U_a + 1). \quad (12)$$

График зависимости Δr от ΔU_a при $U_a = 15$ кВ и $r_0 = 3,5$ мм представлен на рис. 2. Из него видно, что изменение J_a на 0,1% от номинального значения приводит к возрастанию радиуса светового пятна на экране на величину $\Delta r \approx 3,5$ мкм.

Перейдем к анализу влияния колебаний тока фокусировки на диаметр светового пятна. Как уже было показано, приращение радиуса пятна Δr является функцией относительного изменения фокусного расстояния. Поэтому определим $\Delta f/f$ как функцию относительного изменения тока фокусировки $\Delta I/I$. Нетрудно показать, что $\Delta f/f = -2\Delta I/I$. Знак минус в этом выражении указывает на то, что увеличение тока фокусировки приводит к уменьшению фокусного расстояния электромагнитной линзы.

Воспользовавшись формулой (11), получим выражение, описывающее зависимость Δr от ΔI :

$$\Delta r = r_0/(I/2\Delta I + 1). \quad (13)$$

Допустимая нестабильность тока фокусировки, таким образом, зависит от апертуры электронного ЭЛТ, так как $r_0 = (a+b) \operatorname{tg} \alpha$. При увеличении апертуры пучка требования к стабильности I повышаются.

На рис. 3 приведен график зависимости Δr от ΔI , соответствующий выражению (13) при $I = 435$ мА и $r_0 = 3,5$ мм. Для датчика с такими параметрами нестабильность тока фокусировки не должна превышать 0,02% для сохранения диаметра пятна с точностью ± 1 мкм.

Нестабильность и пульсации питающих ЭЛТ напряжений приводят также к паразитной модуляции тока луча, а следовательно, и яркости светового пятна. Известно, что ток луча пропорционален току катода

$$I_{\text{л}} = \kappa I_{\text{к}},$$

где κ — коэффициент перехвата, показывающий, какая часть тока $I_{\text{к}}$ достигает экрана ЭЛТ.

Аналитическое выражение модуляционной характеристики катодного тока, обеспечивающее достаточно хорошее приближение к реальным характеристикам, может быть записано в следующем виде [3]:

$$I_{\text{к}} = M(U_3 - U)^{\gamma} U_3^{3/2 - \gamma}, \quad (14)$$

где M — постоянный коэффициент, который определяется эффективностью катода; $U_3 = kU_a$ — напряжение запирающего ЭЛТ (k является функцией геометрических размеров прожектора); U — напряжение, действующее между модулятором и катодом; $\gamma = 2n + 3/2$ ($1/2 \leq n < 1$).

Изменение тока катода может быть записано следующим образом:

$$\Delta I_{\text{к}} \approx dI_{\text{к}} = \frac{\partial I_{\text{к}}}{\partial U_3} dU_3 + \frac{\partial I_{\text{к}}}{\partial U} dU.$$

Из (14) следует:

$$\frac{\partial I_k}{\partial U_3} = M[\gamma(U_3 - U)^{\gamma-1} U_3^{3/2-\gamma} - (\gamma - 3/2)(U_3 - U)^{\gamma} U_3^{1/2-\gamma}];$$

$$\frac{\partial I_k}{\partial U} = -M\gamma(U_3 - U)^{\gamma-1} U_3^{3/2-\gamma}.$$

Теперь легко получить выражение для относительного изменения тока катода

$$\frac{\Delta I_k}{I_k} = \left[\frac{\gamma}{1 - U/U_3} - (\gamma - 3/2) \right] \frac{\Delta U_3}{U_3} + \frac{\gamma}{1 - U_3/U} \frac{\Delta U}{U},$$

или

$$\frac{\Delta I_k}{I_k} = \left[\frac{\gamma}{1 - U/U_3} - (\gamma - 3/2) \right] \frac{\Delta U_a}{U_a} + \frac{\gamma}{1 - U_3/U} \frac{\Delta U}{U},$$

так как $\Delta U_3/U_3 = \Delta U_a/U_a$.

Рассмотрим конкретный пример. Для ЭЛТ 13ЛК16А(Л) $U_{3 \max} = 85$ В, при этом рекомендуемое напряжение модуляции ($U_m = U_3 - U$) $U_{m \max} = 22$ В, что соответствует току луча $I_{\mu} \approx 5$ мкА. Коэффициент γ выберем минимальным. Тогда

$$(\Delta I_k/I_k)_{\max} \approx 8,7 \Delta U_a/U_a + 7,1 \Delta U/U,$$

т. е. при нестабильности источников питания 0,1% колебания тока катода ЭЛТ достигают 1,58%.

Аналитическое выражение, описывающее влияние нестабильности тока корректирующих катушек на точность позиционирования, получить трудно, так как необходимо учитывать влияние магнитного поля фокусирующей катушки, смещающего пучок отклоненных электронов к центральной оси. Поэтому график зависимости смещения светового пятна от колебаний тока корректирующей катушки, приведенный на рис. 4, был получен экспериментально для датчика на ЭЛТ 13ЛК16А(Л), разработанного в СКБ НИИ СО АН СССР.

Как уже отмечалось, в ЭСУ световой поток, прошедший через фотоэмulsionный слой, обычно регистрируется фотоэлектронным умножителем, причем импульсный ток анода ФЭУ может изменяться от 0 до 5 мА [4]. Работа ФЭУ при таких токах анода и импульсных засветках фотокатода изучена недостаточно, поэтому был проведен ряд измерений с целью исследования временной стабильности коэффициента усиления

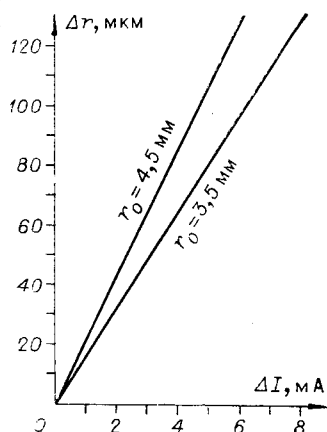


Рис. 3.

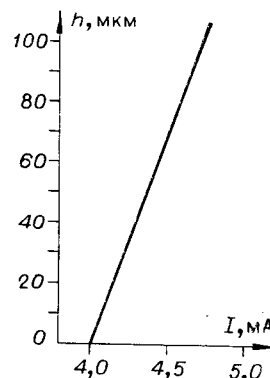


Рис. 4.

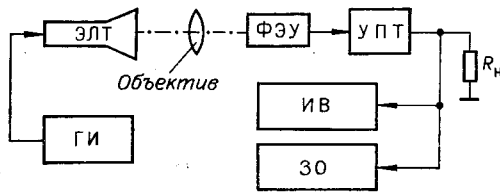


Рис. 5.

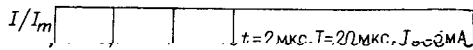


Рис. 6.

время возгорания люминофора которой составляло 10^{-7} с. Чтобы исключить влияние структурного шума и утомления люминофора ЭЛТ на стабильность светового потока, фокусировка электронного пучка не производилась. При этом радиус светового пятна на экране составлял $\sim 4,5$ мм. Нестабильность светового потока, падающего на фотокатод, не превышала 0,2% от выбранного уровня.

Результаты измерений показали, что при подаче на фотокатод световых импульсов постоянной амплитуды наблюдается изменение коэффициента усиления. Характерная для всех ФЭУ кривая изменения чувствительности во времени (длительность импульса $t=2$ мкс, период повторения $T=20$ мкс и начальная амплитуда импульса тока $I_m=5$ мА), на которой можно выделить два различных участка, приведена на рис. 6.

Для первого участка характерно некоторое увеличение анодной чувствительности. Известно [5], что коэффициент вторичной эмиссии динодов зависит от состояния их поверхности. При определенной мощности электронного потока, падающего на динод, происходит очистка его поверхности от различных примесей. Это приводит к увеличению коэффициента вторичной эмиссии. Объяснить подъем чувствительности можно также и наличием эффекта Мальтера, суть которого заключается в том, что на поверхности динода возникают положительно заряженные области под воздействием электронной бомбардировки. Эти заряды соз-

некоторых типов умножителей (ФЭУ-13, ФЭУ-15, ФЭУ-16, ФЭУ-84, ФЭУ-93) в режиме больших выходных сигналов.

Измерения проводились на установке, структурная схема которой представлена на рис. 5, где ГИ — генератор импульсов, УПТ — усилитель постоянного тока, ИВ — интегрирующий амплитуды и длительности формировались с помощью генератора и просвечивающей электронно-лучевой трубки 13ЛК16Л,

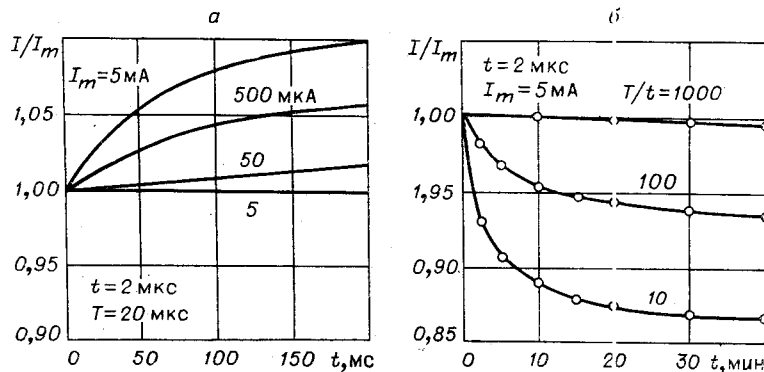


Рис. 7.

дают вблизи поверхности металла подложки электрические поля, вызывающие дополнительную автоэлектронную эмиссию.

Проверка зависимости величины и скорости нарастания анодной чувствительности при изменении амплитуды и скважности световых импульсов показала, что подъем коэффициента усиления ФЭУ начинается при среднем токе анода, равном ~ 10 мкА. Причем чем больше выходной ток ФЭУ, тем больше относительное увеличение чувствительности и тем меньше время, за которое достигается ее максимум. Кривые зависимости величины и скорости нарастания анодной чувствительности от относительного изменения импульсного тока анода приведены на рис. 7, а.

На втором участке кривой наблюдается уменьшение анодной чувствительности ФЭУ. Для определения влияния утомления фотокатода на изменение усиления фотоумножителя была проведена проверка ФЭУ в режиме фотоэлемента. При выбранных уровнях засветки утомление фотокатода замечено не было. Медленное уменьшение чувствительности ФЭУ можно объяснить температурным нагревом последних динодов. При среднем токе последнего динода 0,5 мА и напряжении между динодами 100 В выделяется дополнительная мощность 50 мВт, которая приводит к значительному повышению температуры динода. Увеличение температуры динода вызывает уменьшение коэффициента вторичной эмиссии [6], а следовательно, и уменьшение коэффициента усиления ФЭУ.

Кривые изменения коэффициента усиления ФЭУ на втором участке при скважности световых импульсов 10, 100, 1000 и начальной амплитуде выходного тока 5 мА приведены на рис. 7, б.

Полученные экспериментальные данные показывают, что при работе ФЭУ в режиме импульсных засветок и токе анода ~ 5 мА происходят значительные обратимые изменения анодной чувствительности; величина этих изменений зависит как от амплитуды, так и от скважности световых импульсов. Изменение чувствительности приводит к погрешности измерения оптической плотности в электронных сканирующих устройствах. Для устранения этой погрешности необходимо стабилизировать коэффициент усиления ФЭУ.

Приведенный анализ позволяет также сформулировать требования, предъявляемые к источникам питания датчика бегущего светового пятна. Эти требования в каждом конкретном случае зависят от необходимой точности электронной сканирующей системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Авдеев В. С., Васьков С. Т., Мамонтов Г. М., Обидин Ю. В., Поташников А. К., Ткач С. Е. «Карат» — устройство вывода графической информации из ЭВМ на микрофильм. — «Автометрия», 1976, № 1, с. 33.
2. Горелик С. Л., Горелов А. А., Маркович М. Г., Шапешкин Н. А. Блок проекционной электронно-лучевой трубки для высокоточной телевизионной системы. — «Вопросы радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения», 1975, вып. 2, с. 50.
3. Миллер В. А., Куракин Л. А. Приемные электронно-лучевые трубки. М., «Энергия», 1971.
4. Васьков С. Т., Остапенко А. М. Устройство ввода в ЭВМ полутоновых изображений. — В кн.: Средства ввода в ЭВМ и отображения графической информации. Новосибирск, Изд. ИАиЭ СО АН СССР, 1974, с. 46.
5. Бронштейн И. М., Фрайман Б. С. Вторичная электронная эмиссия. М., «Наука», 1969.
6. Перцев А. Н., Сошин Л. Д., Толкач П. Н. Определение температурных коэффициентов вторичной эмиссии динодов и квантового выхода фотокатодов фотоумножителей. — «Приборы и техника эксперимента», 1969, № 3, с. 169.

Поступила в редакцию 3 января 1977 г.