

во-механических расчетов методом Парра-Паризера — Попла [5—7] предсказали существование нескольких скрытых электронных переходов в коротковолновой области A -полосы [8]. Экспериментально наличие данных переходов обнаружено в работе [4]. Так как добавление к молекулярной цепи различных структурных групп может вызвать хотя бы частичное снятие запрета по симметрии на электронные переходы в высокочастотной области длинноволновой полосы и увеличить их долю вклада в спектры, следует ожидать более отчетливого проявления данных переходов в поляризационных спектрах.

В поляризационных спектрах флуоресценции оксазольных производных стильбена в коротковолновой части A -полосы поглощения отчетливо регистрируются два участка (обозначим их A' и A''), в области которых значения степени поляризации флуоресценции постоянны. Степень поляризации в области A' -полосы лишь на несколько процентов ниже значения P в длинноволновой части A -полосы поглощения. Для всех исследованных оксазольных производных стильбена значения степени поляризации в области A'' -полосы примерно одинаковы (см. табл. 2).

В спектрах поглощения оксазольных производных стильбена колебательная структура выражена значительно слабее, чем в спектре стильбена. Тем не менее, в поляризационном спектре флуоресценции по поглощению области A' и A'' выражены более четко. Ступенчатый ход поляризационного спектра в коротковолновой части A -полосы, по-видимому, нельзя связать с колебаниями молекул. Объяснить падение степени поляризации флуоресценции в коротковолновой части A -полосы можно, предположив, что в ее формировании, как и у стильбена, участвуют два скрытых электронных перехода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Красовицкий Б. М., Кутуля Л. А., Афанасиadi Л. Ш., Шевченко Л. Е., Егорова Н. П.—ЖПС, 1978, т. 29, № 2, с. 272.
2. Красовицкий Б. М., Кутуля Л. А., Шевченко А. Е., Афанасиadi Л. Ш., Егорова Н. П., Шворина А. Л.—ХГС, 1977, № 5, с. 656.
3. Лазеры на красителях / Под ред. Шефера Ф. П.—М., 1976.
4. Бобровиц В. П., Саржевский А. М., Сеньюк М. А.—ЖПС, 1979, т. 30, № 6, с. 1022.
5. Pariser R.—J. Chem. Phys., 1956, v. 24, № 2, p. 250.
6. Perkamptus H. H., Knop J. V.—Theoret. Chim. Acta, 1966, v. 6, № 1, p. 45.
7. Wettermark G., Schor R.—Theoret. Chim. Acta, 1967, v. 9, № 1, p. 57.
8. Beveridge D. L., Jaffe H. H.—J. Amer. Chem. Soc., 1965, v. 87, № 23, p. 5340.

Поступила в редакцию
21.05.80.

Кафедра общей физики

УДК 621.378; 535.31

Б. Ю. ХАНОХ

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТЕТРАЭДРИЧЕСКОГО ЗЕРКАЛЬНОГО ОТРАЖАТЕЛЯ С ОДНОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОТРАЖАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

В [1] исследованы отражающие свойства зеркального тетраэдрического отражателя с одной цилиндрической отражающей поверхностью, образующие которой пересекают плоские взаимно ортогональные отражающие поверхности под углом 45° .

Настоящая работа посвящена исследованию оптических свойств зеркального тетраэдрического отражателя с одной цилиндрической поверхностью, образующие которой под произвольным углом пересекают две плоские отражающие поверхности, двугранный угол между этими поверхностями имеет небольшое отступление от 90° .

Пусть ось цилиндрической поверхности POQ отражателя параллельна плоскости XOY и пересекает ось Z прямоугольной системы координат

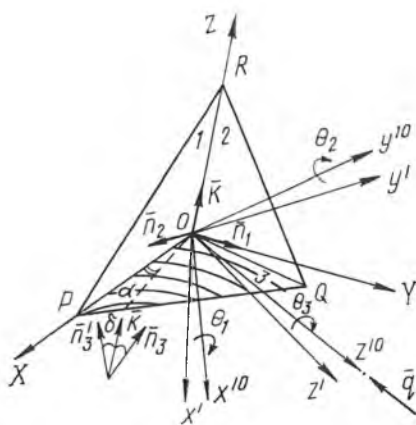


Рис. 1. Выбор систем координат для анализа отражающих свойств тетраэдрического отражателя с двумя плоскими и одной цилиндрической зеркальными отражающими поверхностями

XYZ , связанной с ребрами отражателя (рис. 1), а проекция этой оси на плоскость XOY образует с осью OX произвольный угол α . Две другие отражающие поверхности POR и ROQ — плоские и образуют двугранный угол $(90^\circ - \delta_{12})$. Угол между нормалью к цилиндрической поверхности в точке падения на нее светового луча и базисным вектором оси Z обозначим через δ . Величина этого угла зависит от кривизны отражающей цилиндрической поверхности и от координаты точки падения светового луча на эту поверхность. В системе координат XYZ векторы нормалей $\bar{n}_1$, $\bar{n}_2$, $\bar{n}_3$ и $\bar{n}_3'$ к соответствующим отражающим поверхностям 1 (POR), 2 (ROQ) и 3 (POQ) имеют следующие координаты:

$$\begin{aligned} \bar{n}_1 &= \{0, 1, 0\}, & \bar{n}_3 &= \{-\sin \delta \sin \alpha, \sin \delta \cos \alpha, \cos \delta\}, \\ \bar{n}_2 &= \{\cos \delta_{12}, -\sin \delta_{12}, 0\}, & \bar{n}_3' &= \{\sin \delta \sin \alpha, -\sin \delta \cos \alpha, \cos \delta\}. \end{aligned} \quad (1)$$

В случае $0 < \alpha < 90^\circ$ плоскость, проходящая через ось цилиндрической поверхности и ось Z , делит эту поверхность на две отражающие области с нормальными $\bar{n}_3$ и $\bar{n}_3'$. В предположении малости углов δ_{12} и δ ($\sin \delta_{12} \approx \delta_{12}$, $\sin \delta \approx \delta$, $\cos \delta_{12} \approx \cos \delta \approx 1$), матрицы отражения зеркальных поверхностей, которым соответствуют нормали $\bar{n}_1$, $\bar{n}_2$, $\bar{n}_3$, и $\bar{n}_3'$, будут иметь следующий вид [1]:

$$\begin{aligned} R_1 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, & R_3 &= \begin{bmatrix} +1 & 0 & 2\delta \sin \alpha \\ 0 & 1 & -2\delta \cos \alpha \\ 2\delta \sin \alpha & -2\delta \cos \alpha & -1 \end{bmatrix} \\ R_2 &= \begin{bmatrix} -1 & 2\delta_{12} & 0 \\ 2\delta_{12} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, & R_3' &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & -2\delta \sin \alpha \\ 0 & 1 & +2\delta \cos \alpha \\ -2\delta \sin \alpha & 2\delta \cos \alpha & -1 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (2)$$

У тетраэдрического отражателя с плоскими отражающими поверхностями, каждая из которых имеет только одну нормаль, существует шесть различных последовательностей отражения света [2]. В данном случае у тетраэдрического отражателя с одной отражающей поверхностью, например, при $0 < \alpha < 45^\circ$ есть отражающий сектор на поверхности 3 с двумя различными направлениями нормалей: $\bar{n}_3$ и $\bar{n}_3'$; поэтому в общем случае у такого отражателя будет десять различных последовательностей отражения света:

$$\begin{aligned} \bar{q}_{123} &= R_3 R_2 R_1 \bar{q} = C_{123} \bar{q}, & \bar{q}_{321} &= R_1 R_2 R_3 \bar{q} = C_{321} \bar{q}, \\ \bar{q}_{312} &= R_2 R_1 R_3 \bar{q} = C_{312} \bar{q}, & (\bar{q}_{312} &= R_2 R_1 R_3' \bar{q} = C_{312}' \bar{q}), \\ \bar{q}_{213} &= R_3 R_1 R_2 \bar{q} = C_{213} \bar{q}, & (\bar{q}_{213} &= R_3' R_1 R_2 \bar{q} = C_{213}' \bar{q}), \\ \bar{q}_{132} &= R_2 R_3 R_1 \bar{q} = C_{132} \bar{q}, & (\bar{q}_{132} &= R_2 R_3' R_1 \bar{q} = C_{132}' \bar{q}), \\ \bar{q}_{231} &= R_1 R_3 R_2 \bar{q} = C_{231} \bar{q}, & (\bar{q}_{231} &= R_1 R_3' R_2 \bar{q} = C_{231}' \bar{q}). \end{aligned} \quad (3)$$

Индексы 1, 2, 3 при векторах направлений отраженных оптических лучей и матрице C показывают последовательность отражения коллимированного пучка, падающего на отражатель в направлении единичного вектора $\bar{q}$, от поверхностей 1, 2, 3 соответственно.

При $\alpha = 0^\circ$ одноименные отраженные пучки, взятые в круглые скобки, будут отсутствовать, а при $\alpha = 45^\circ$ исчезают два одноименных отраженных пучка, не имеющих круглых скобок ($\bar{q}_{312}, \bar{q}_{213}$).

В случае $45^\circ < \alpha < 90^\circ$ также имеются десять различных последовательностей отражения падающего светового пучка:

$$\begin{aligned} (\bar{q}_{123} = R_3 R_2 R_1 \bar{q} = C_{123} \bar{q}), \quad \bar{q}_{123} = R'_3 R_2 R_1 \bar{q} = C'_{123} \bar{q}, \\ (\bar{q}_{321} = R_1 R_2 R_3 \bar{q} = C_{321} \bar{q}), \quad \bar{q}_{321} = R_1 R_2 R'_3 \bar{q} = C'_{321} \bar{q}, \\ \bar{q}_{312} = R_2 R_1 R'_3 \bar{q} = C'_{312} \bar{q}, \quad \bar{q}_{213} = R'_3 R_1 R_2 \bar{q} = C'_{213} \bar{q}, \\ (\bar{q}_{132} = R_2 R_3 R_1 \bar{q} = C_{132} \bar{q}), \quad \bar{q}_{132} = R_2 R'_3 R_1 \bar{q} = C'_{132} \bar{q}, \\ (\bar{q}_{231} = R_1 R_3 R_2 \bar{q} = C_{231} \bar{q}), \quad \bar{q}_{231} = R_1 R'_3 R_2 \bar{q} = C'_{231} \bar{q}. \end{aligned} \quad (4)$$

При $\alpha = 90^\circ$ пучки, взятые в круглые скобки в (4), будут отсутствовать.

И, наконец, в случае $90^\circ < \alpha < 180^\circ$ отражение света от цилиндрической поверхности описывается через нормаль $\bar{n}_3$; поэтому в таком отражателе имеются только следующие шесть различных последовательностей отражения:

$$\begin{aligned} \bar{q}_{123} = R'_3 R_2 R_1 \bar{q} = C'_{123} \bar{q}, \quad \bar{q}_{321} = R_1 R_2 R'_3 \bar{q} = C'_{321} \bar{q}, \\ \bar{q}_{312} = R_2 R_1 R'_3 \bar{q} = C'_{312} \bar{q}, \quad \bar{q}_{213} = R'_3 R_1 R_2 \bar{q} = C'_{213} \bar{q}, \\ \bar{q}_{132} = R_2 R'_3 R_1 \bar{q} = C'_{132} \bar{q}, \quad \bar{q}_{231} = R_1 R'_3 R_2 \bar{q} = C'_{231} \bar{q}. \end{aligned} \quad (5)$$

Таким образом, отражающее действие тетраэдрического зеркального отражателя с одной цилиндрической поверхностью описывается матрицами C_{ikl} и C'_{ikl} ($i, k, l = 1, 2, 3$), равными произведению матриц отражения (2), взятых в различной комбинации. Расчеты показывают, что $C_{123} = C'_{312} = D_1$, $C_{321} = C'_{213} = D_2$, $C'_{132} = D_5$, $C'_{231} = D_6$, $C_{213} = C'_{321} = D_3$, $C_{312} = C'_{123} = D_4$, $C_{231} = D_7$, $C_{132} = D_8$, так что фактически имеются восемь различных отраженных пучков.

Введем новую прямоугольную систему координат $x'y'z'$ (см. рис. 1), расположенную так, чтобы ось z' совпадала с направлением, образующим равные углы с осями OX , OY и OZ , а ось y' была перпендикулярна к оси Z . Матрица перехода из системы координат XYZ в $x'y'z'$ имеет следующий вид:

$$B = \begin{bmatrix} \sqrt{6}/6 & \sqrt{6}/6 & -\sqrt{6}/3 \\ -\sqrt{2}/2 & \sqrt{2}/2 & 0 \\ \sqrt{3}/3 & \sqrt{3}/3 & \sqrt{3}/3 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

а выражения для векторов направлений отраженных пучков в новой системе координат $x'y'z'$ будут равны:

$$\bar{q}'_n = B D_n B^{-1} \bar{q}' = M_n \bar{q}', \quad (7)$$

где $n = 1, 2, \dots, 8$; B^{-1} — матрица, обратная матрице B ; $\bar{q}'$ — единичный вектор направления падающего коллимированного пучка световых лучей в системе координат $x'y'z'$.

В частном случае при нормальном падении (в направлении, параллельном оптической оси отражателя) коллимированного светового пучка на отражатель ($\bar{q}' = 0, 0, -1$) угловые координаты направления распространения отраженных пучков выразятся в следующем виде:

$$\begin{aligned} \bar{q}'_{1,2} = \left\{ \mp 2\delta \sin(\alpha - 45^\circ), \mp \frac{\sqrt{6}}{3} [2\delta_{12} - \sqrt{2}\delta \cos(\alpha - 45^\circ)], 1 \right\}, \\ \bar{q}'_{3,4} = \left\{ \mp 2\delta \sin(\alpha - 45^\circ), \pm \frac{\sqrt{6}}{3} [2\delta_{12} + \sqrt{2}\delta \cos(\alpha - 45^\circ)], 1 \right\}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{q}'_{5,6} &= \left\{ \mp 2\delta \cos(\alpha - 45^\circ), \mp \frac{\sqrt{6}}{3} [2\delta_{12} - \sqrt{2}\delta \sin(\alpha - 45^\circ)], 1 \right\} \\ \bar{q}'_{7,8} &= \left\{ \mp 2\delta \cos(\alpha - 45^\circ), \pm \frac{\sqrt{6}}{3} [2\delta_{12} + \sqrt{2}\delta \sin(\alpha - 45^\circ)], 1 \right\}\end{aligned}\quad (8)$$

Верхние знаки в (8) соответствуют первому индексу при векторах $\bar{q}'$, а нижние — второму индексу при $\bar{q}'$.

На рис. 2 для углов α , равных 0° ; 45° ; 90° ; 135° и 180° , и $\delta_{12} > 0$ схематически показаны картины сечений отраженных пучков плоскостью, параллельной плоскости $x'Oy'$.

При нормальном освещении тетраэдрического зеркального отражателя с одной цилиндрической отражающей поверхностью и «дефектным» двугранным углом между плоскими гранями коллимированным световым пучком формируются два ($\alpha = 0^\circ$; 90° ; 180°), либо три ($0^\circ < \alpha < 180^\circ$) расходящихся пучка ленточной формы, распространяющихся в направлении, противоположном падающему пучку; причем угловое положение сечений ленточных пучков зависит от ориентации цилиндрической поверхности отражателя.

Рассмотрим далее, какие изменения произойдут в картине отраженных пучков при косом падении коллимированного светового пучка на отражатель.

Введем неподвижную прямоугольную систему координат $x^{10}y^{10}z^{10}$, где проанализируем характер изменений в картине отраженных пучков при поворотах отражателя, т. е. при его произвольной ориентации. Положим, что в исходном состоянии оси неподвижной системы координат совпадают с соответствующими осями подвижной системы координат $x'y'z'$, жестко связанной с отражателем. Взаимную ориентацию подвижной системы координат относительно неподвижной можно описать тремя углами поворота Θ_1 , Θ_2 и Θ_3 (углы Эйлера) подвижной системы координат вокруг трех взаимно перпендикулярных осей Ox^{10} , Oy^{10} , Oz^{10} неподвиж-

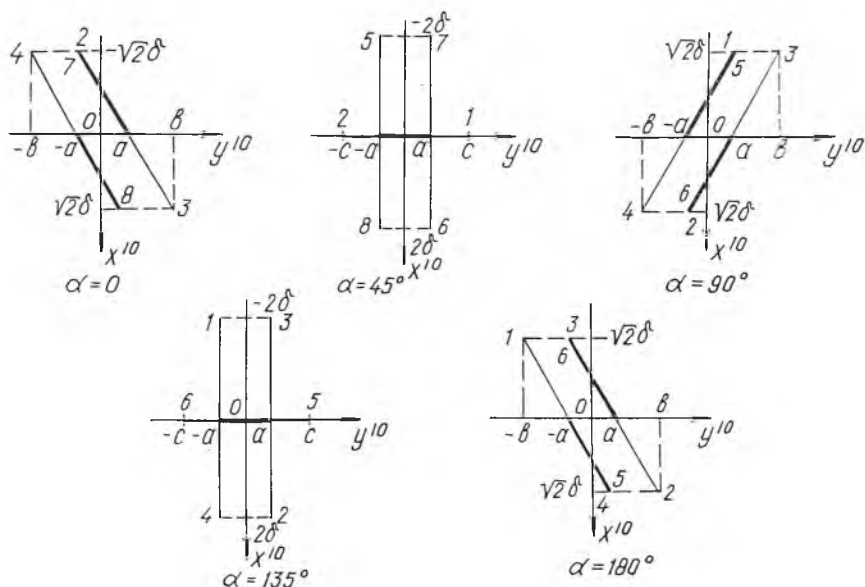


Рис. 2. Картина сечения отраженных пучков в плоскости анализа при различных углах α между проекцией оси цилиндрической поверхности на плоскость XOY и осью X в случае $\delta_{12} > 0$: $a = \frac{2\sqrt{6}}{3} \delta_{12}$, $b = \frac{\sqrt{6}}{3} (2\delta_{12} + \delta)$, $c =$

$$= \frac{2\sqrt{3}}{3} (\delta - \sqrt{2}\delta_{12})$$

ной системы координат (см. рис. 1). Тогда матрица перехода из системы координат $x^{10}y^{10}z^{10}$ в $x'y'z'$ имеет следующий вид:

$$T = \begin{bmatrix} C_2C_3 & S_1S_2C_3 - C_1S_3 & C_1S_2C_3 + S_1S_3 \\ C_2S_3 & S_1S_2S_3 + C_1C_3 & C_1S_2S_3 - S_1C_3 \\ -S_2 & S_1C_2 & C_1C_2 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

где C_1, C_2, C_3 есть $\cos \Theta_1, \cos \Theta_2, \cos \Theta_3$, а S_1, S_2, S_3 — $\sin \Theta_1, \sin \Theta_2, \sin \Theta_3$ соответственно.

Применив правило перехода из подвижной системы координат в неподвижную в (7) [3], получим следующее соотношение для нахождения координат направления отраженных пучков в неподвижной системе координат:

$$\bar{q}_n^{10} = T^{-1} M_n T \bar{q}^{10}, \quad (10)$$

где T^{-1} — матрица, обратная матрице T .

Поставив далее в (10) явные выражения матриц для избранного направления падения коллимированного светового пучка $\{\bar{q}^{10} = 0, 0, -1\}$, получим координаты отраженных пучков $\bar{q}_n^{10}$ при произвольной ориентации отражателя в следующем виде:

$$\begin{aligned} \bar{q}_{1,2}^{10} &= \left\{ \mp \frac{2\sqrt{3}}{3} [(\delta_{12} + \sqrt{2}\delta \cos(\alpha - 45^\circ)) S_1C_2 - C_1 \cos^{-1} \psi [(\sqrt{2}\delta_{12} - \right. \\ &\quad \left. - \delta \cos(\alpha - 45^\circ)) \cdot \sin(\psi - \theta_3) - \sqrt{3}\delta \sin(\alpha - 45^\circ) \cos(\psi - \theta_3)]], \right. \\ &\quad \left. \mp \frac{2\sqrt{3}}{3} [(\delta_{12} + \sqrt{2}\delta \cos(\alpha - 45^\circ)) S_2 + C_2 [(\sqrt{2}\delta_{12} - \delta \cos(\alpha - 45^\circ)) C_3 - \right. \\ &\quad \left. - \sqrt{3}\delta \sin(\alpha - 45^\circ) S_3]], 1 \right\}; \\ \bar{q}_{3,4}^{10} &= \left\{ \pm \frac{2\sqrt{3}}{3} [(\delta_{12} - \sqrt{2}\delta \cos(\alpha - 45^\circ)) S_1C_2 - C_1 \cos^{-1} \psi [(\sqrt{2}\delta_{12} + \right. \\ &\quad \left. + \delta \cos(\alpha - 45^\circ)) \cdot \sin(\psi - \theta_3) + \sqrt{3}\delta \sin(\alpha - 45^\circ) \cos(\psi - \theta_3)]], \right. \\ &\quad \left. \pm \frac{2\sqrt{3}}{3} [(\delta_{12} - \sqrt{2}\delta \cos(\alpha - 45^\circ)) S_2 + C_2 [(\sqrt{2}\delta_{12} + \delta \cos(\alpha - 45^\circ)) C_3 + \right. \\ &\quad \left. + \sqrt{3}\delta \sin(\alpha - 45^\circ) S_3]], 1 \right\}; \\ \bar{q}_{5,6}^{10} &= \left\{ \mp \frac{2\sqrt{3}}{3} [(\delta_{12} + \sqrt{2}\delta \sin(\alpha - 45^\circ)) S_1C_2 - C_1 \cos^{-1} \psi [(\sqrt{2}\delta_{12} - \right. \\ &\quad \left. - \delta \sin(\alpha - 45^\circ)) \cdot \sin(\psi - \theta_3) - \sqrt{3}\delta \cos(\alpha - 45^\circ) \cos(\psi - \theta_3)]], \right. \\ &\quad \left. \mp \frac{2\sqrt{3}}{3} [(\delta_{12} + \sqrt{2}\delta \sin(\alpha - 45^\circ)) S_2 + C_2 [(\sqrt{2}\delta_{12} - \delta \sin(\alpha - 45^\circ)) C_3 - \right. \\ &\quad \left. - \sqrt{3}\delta \cos(\alpha - 45^\circ) S_3]], 1 \right\}; \\ \bar{q}_{7,8}^{10} &= \left\{ \pm \frac{2\sqrt{3}}{3} [(\delta_{12} - \sqrt{2}\delta \sin(\alpha - 45^\circ)) S_1C_2 - C_1 \cos^{-1} \psi [(\sqrt{2}\delta_{12} + \right. \\ &\quad \left. + \delta \sin(\alpha - 45^\circ)) \cdot \sin(\psi - \theta_3) + \sqrt{3}\delta \cos(\alpha - 45^\circ) \cos(\psi - \theta_3)]], \right. \\ &\quad \left. \pm \frac{2\sqrt{3}}{3} [(\delta_{12} - \sqrt{2}\delta \sin(\alpha - 45^\circ)) S_2 + C_2 [(\sqrt{2}\delta_{12} + \delta \sin(\alpha - 45^\circ)) C_3 + \right. \\ &\quad \left. + \sqrt{3}\delta \cos(\alpha - 45^\circ) S_3]], 1 \right\}, \quad (11) \end{aligned}$$

где $\psi = \arctg(S_2 \operatorname{tg} \Theta_1)$.

Из (11) следует, что при косом падении коллимированного светового пучка на отражатель изменяется не только угловое положение сечений отраженных ленточных пучков, но и их размер.

Полученные соотношения позволяют количественно оценивать неко-

торые параметры пучков, отраженных зеркальным тетраэдрическим отражателем с одной цилиндрической поверхностью при произвольной ориентации отражателя и любом положении цилиндрической поверхности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бондаренко И. Д., Ханох Б. Ю. — ОМП, 1975, № 12, с. 21.
2. Тудоровский А. И. — Труды ГОИ, 1941, т. 14, вып. 112—120, с. 137.
3. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. — М., 1973.

Поступила в редакцию
12.06.80.

Кафедра электрофизики

УДК 621.396.963.8

Б. Н. КРАСНОГОЛОВЫЙ

СИНТЕЗ УПРАВЛЯЮЩИХ СИГНАЛОВ ДЛЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ РАЗВЕРТОК

До сих пор предполагалось, что ОС является идеальной индуктивностью, и управляющий ток представляет собой ток через катушку индуктивности, создающий отклонение луча [1]. В эквивалентную схему реальной ОС (рис. 1), кроме индуктивности L , входят омическое сопротивление R_k , распределенная емкость C и параллельное сопротивление R , включением которого учитываются потери на вихревые токи (в катушках с ферромагнитным сердечником) или потери в специально поставленном шунтирующем сопротивлении.

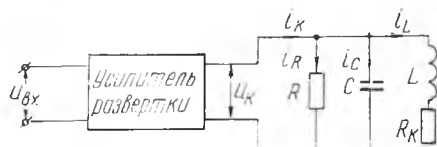


Рис. 1. Эквивалентная схема включения отклоняющей системы

Теперь уже род управляющего сигнала (напряжение или ток) и его форма будут зависеть не только от параметров ОС, но и от типа усилителя развертки, нагруженного на отклоняющую систему.

Если усилитель развертки обладает низким выходным сопротивлением (близок к генератору напряжения), форма управляющего напряжения u_k определяется как

$$u_k = u_L + u_{R_k} = L \frac{di_L}{dt} + i_L R_k. \quad (1)$$

Подставляя в (1) в соответствии с выражением (13) из [1] $i_L = At / \sqrt{1+Bt^2}$ для линейной развертки, получаем

$$u_k = AL(1+Bt^2)^{-3/2} + AR_k t(1+Bt^2)^{-1/2}. \quad (2)$$

Управляющее напряжение без учета дисторсии, как известно, имеет вид [2, 3]

$$u'_k = kL + kR_k t. \quad (3)$$

Сравнивая выражения (2) и (3), легко заметить, что в напряжении u_k обе составляющие оказались зависимыми от времени. Кроме того, начальный перепад напряжения $u_k(0) = AL = k_2 L / (NR_0)$, т. е. уменьшился в NR_0 раз.

При подключении ОС к усилителю развертки с высоким выходным сопротивлением (генератору тока) для управляющего тока i_k , повторяющего форму входного напряжения $u_{вх}$, получим

$$i_k = i_L + i_C + i_R, \quad (4)$$

где $i_L = At(1+Bt^2)^{-1/2}$; $i_C = C \frac{du_k}{dt} = \delta(t) + A\{R_k C[(1+Bt^2)^{-1/2} - Bt^2(1+Bt^2)^{-3/2}] - 3BCLt(1+Bt^2)^{-5/2}\}$; $i_R = \frac{u_k}{R} = \frac{AL}{R}(1+Bt^2)^{-3/2} + \frac{AR_k}{R}t(1+Bt^2)^{-1/2}$.