

УДК 681.586.5

ГОРНОСТАЕВ Г.Ф.,  
ПАСИЧНЫЙ В.В., ТКАЧЕНКО Г.В.

*Институт проблем материаловедения НАН Украины*

## РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ ТУРБОГЕНЕРАТОРА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИМИ ДАТЧИКАМИ

Досліджено можливість діагностики рівня іскріння щітково – контактної апарату турбогенератора за допомогою оптичних волокон. Для реєстрації полум'я при витокі водню з корпусу турбогенератора при пожежі розроблено датчик, що визначає довжину і координату полум'я.

Исследована возможность диагностики уровня искрения щеточно-контактного аппарата турбогенератора с помощью оптических волокон. Для регистрации пламени при утечке водорода из корпуса турбогенератора при пожаре разработан датчик, определяющий длину и координату пламени.

The possibility for diagnostic of sparking level of the brush-contact apparatus in turbogenerator by means of optical fibers are researched. The sensor for registration the flame when hydrogen are leakage from the cabinet of turbogenerator are developed. The sensor permit to gain the information concerning the location and length of flame.

$A$  – числовая апертура пучка;  
 $A_0$  – номинальная числовая апертура световода;  
 $B$  – ширина полосы частот пропускания;  
 $D_F$  – диаметр фокального пятна;  
 $d$  – диаметр лазерного пучка;  
 $f$  – частота появления электрической дуги;  
 $I$  – рабочий ток;  
 $J_B$  – световой поток, выходящий из световода через боковую поверхность;  
 $J_p$  – световой поток, отраженный от внешней боковой поверхности световода;  
 $J_y = (J_B + J)$  – уходящий поток;  
 $J_{фп}$  – световой поток на фотоприемнике;  
 $J_{ц}$  – световой поток, вошедший в световод;  
 $J_w$  – падающий световой поток;  
 $J_\beta$  – рассеянный на микродефектах световой поток;  
 $L$  – длина пути луча;  
 $L_9$  – “эффективная” длина пути потока  $J_{ц}$  в световоде;  
 $L_0$  – длина световода;  
 $L_3$  – длина пламени;  
 $N$  – активная мощность;  
 $n_{об}$  – показатель преломления оболочки световода;  
 $\mathbf{P}$  – вектор в пространстве признаков  $\phi, f, \sigma$ ;  
 $P_i$  – мощность излучения  $i$ -ой дуги;  
 $Q$  – реактивная мощность;  
 $R_{и}$  – фотосопротивление датчика при наличии искрения;

$R_{л}, R_{п}$  – фотосопротивление левого и правого приемников;  
 $R_c$  – световое фотосопротивление;  
 $R_T$  – темновое фотосопротивление;  
 $R_{фo}$  – фотосопротивление датчика при наличии только фонового излучения;  
 $R_{ш}$  – сопротивление шунта;  
 $R_s = (R_{фo}/R_{и})$  – кратность изменения фотосопротивления;  
 $\Delta R = (R_{фo} - R_c)$  – изменение фотосопротивления при освещении излучателем;  
 $\Delta R_{л-п}$  – разница величин фотосопротивлений, расположенных на левом и правом торцах световода;  
 $r_*$  – допустимый радиус изгиба световода;  
 $S$  – площадь освещенной части боковой поверхности световода;  
 $\Delta t$  – общая дисперсия в оптоволокне;  
 $U$  – рабочее напряжение;  
 $u$  – угловая апертура световода;  
 $X$  – координата вдоль оси световода;  
 $X_{л}, X_{п}$  – расстояние левой и правой границ освещенного пятна световода до фотоприемника;  
 $X_0$  – координата точки пересечения оси светового пучка с осью световода;  
 $Y_1$  – расстояние лазерного диода от оси световода;  
 $Y_2$  – расстояние от диаметральной плоскости линзы до оси световода;

$Y_3$  – расстояние оси пламени от оси световода;  
 $\alpha_1$  – угол между осью лазерного пучка и осью световода;  
 $\alpha_2$  – угол между осью линзового пучка и осью световода;  
 $\alpha_3$  – азимут оси пламени относительно оси световода;  
 $\beta$  – коэффициент рассеяния;  
 $\lambda$  – длина волны;  
 $\lambda_m$  – длина волны максимума чувствительности фотоприемника;  
 $\rho$  – коэффициент отражения оболочки световода;  
 $\sigma$  – плотность распределения электрических дуг в междушечном пространстве;  
 $\tau_d$  – коэффициент пропускания световода для диффузного излучения;  
 $\tau_{кф}$  – коэффициент пропускания компенсирующего фильтра;  
 $\tau_m$  – коэффициент пропускания масляной пленки;  
 $\tau_{ср}$  – коэффициент пропускания среды;  
 $\tau_\varepsilon$  – “эффективный” коэффициент пропускания световода при боковом освещении;  
 $\tau_s$  – относительный коэффициент пропускания световода;  
 $\tau_\beta$  – коэффициент пропускания, обусловленный рассеянием излучения на микродефектах;  
 $\tau_\rho$  – коэффициент пропускания световода, обусловленный отражением падающего потока от границы “воздух-оболочка”;  
 $\phi$  – яркость электрической дуги;  
 $\varphi$  – угол между падающим лучом и боковой поверхностью световода;  
 $\psi$  – чувствительность датчика к изменению  $L_3$ ;  
 $\omega$  – мощность излучателя;  
**ЩКА** – щеточно-контактный аппарат.

#### Индексы:

в – выходящий;  
 д – диффузный;  
 и – искра;  
 к – кривизна;  
 кф – компенсирующий фильтр;  
 л – левый;  
 м – масло;  
 об – оболочка;  
 п – правый;  
 с – световой;  
 ср – среда;  
 т – темновой;  
 у – уходящий;  
 фо – фоновый;  
 фп – фотоприемник;  
 фпо – опорный фотоприемник;  
 ц – циркулирующий;  
 ш – шунт;  
 э – эффективный;  
 F – фокальный;  
 h – число дуг;  
 i – номер дуги;  
 m – максимальный;  
 s – относительный;  
 w – поверхность;  
 $\beta$  – рассеянный;  
 $\rho$  – отраженный;  
 0 – световод;  
 1 – лазер;  
 2 – лампа;  
 3 – пламя;  
 \* – допустимый.

I. Важным направлением диагностики мощного турбогенератора является разработка аппаратуры контроля искрения щеточно-контактного аппарата (ЩКА). Искрение щеток может быть следствием неправильного выбора марки щеток, давления и зазоров, неровностей поверхности, биения валопровода и контактных колец. Согласно существующим представлениям о механизме искрения щеток, нагруженный большой плотностью тока сбегаящий край щетки раскаляется и подгорает, в следствие чего площадь контакта здесь уменьшается. Через подгоревшую часть поверхности щетки проходит лишь неболь-

шая часть тока. Благодаря неровностям поверхности средняя плотность тока здесь невелика и протекание тока носит случайный характер: ток часто обрывается, вызывая появление небольших вольтовых дуг на кольцах и щетках. Дальнейшее развитие этого процесса может привести к потере возбуждения, вызвать асинхронный ход генератора и отказ в работе.

Под действием движущегося потока воздуха, охлаждающего ЩКА, электрические светящиеся дуги перемещаются в пространстве и образуют случайно распределенные источники излучения нитевидной формы. Эти источники можно оха-

рактизовать следующими основными параметрами: яркость, частота появления и плотность пространственного распределения. Одна и та же суммарная мощность их излучения может быть получена при различных сочетаниях значений величин  $\phi$ ,  $f$  и  $\sigma$ . Классификатором уровня искрения щетки может служить вектор в пространстве признаков  $\phi$ ,  $f$  и  $\sigma$ , длина которого равна суммарной мощности излучения источников:

$$\mathbf{P} = \sum_{i=1}^{i=h} P_i(\phi, f, \sigma)$$

На Киевской ТЭЦ – 5 были проведены испытания волоконно-оптического датчика искрения ЩКА.

Целью испытания являлось определение корреляции выходного сигнала устройства (включает оптоволоконно, фоторезистор, регистратор) и уровня искрения щеток при наличии внешнего фонового освещения контакта “щетка-кольцо”. Интенсивность фонового освещения оценивалась с помощью второго такого же датчика. В результате замены щеток на положительном кольце турбогенератора было отмечено междущеточное искрение, уровень которого оценивался визуально исходя из интенсивности и частоты искрения. Измерения проводились со стороны встречного движения вала ротора в трех точках на поверхности скользящего контакта “щетка-кольцо”, расположенных через 45 градусов. Эксплуатационные параметры на роторе были следующие:  $U = 220$  В,  $I = 1,41$  кА,  $N = 110$  МВт,  $Q = 80$  МВар; подогрев воздуха, охлаждающего ЩКА,  $5$  °С.

Станционные испытания датчика проводились с помощью изолирующей штанги. Входной торец оптического волокна располагался на расстоянии  $\sim 8$  мм от поверхности токоподводящего кольца. Длительность одного измерения составляла 0,5 ч. Основной особенностью искры как источника оптического излучения является ее амплитудно-частотная и пространственная неопределенность. Как свидетельствуют результаты проведенных нами экспериментальных исследований, использование единичных оптических моноволокон с диаметром сердцевины 200, 400, 700 мкм и числовой апертурой 0,3 не позволяет зафиксировать искрение, поскольку малы веро-

ятность попадания дуги в пределы апертурного угла и время ее нахождения в пределах апертуры световода. Не исключено также отрицательное влияние дисперсии коротких световых импульсов в световоде.

При этом ширина полосы частот пропускания ограничивается как оптоволоконном ( $B = \Delta 0,44/t$ ), так и фотоприемником. Даже если частота модуляции составит 1000 Гц, у фотоприемника сохранится сигнал порядка 20%, который существенно превышает уровень шумов. Для того чтобы диагностировать различные уровни искрения щетки, волоконно-оптический датчик должен иметь максимально возможные диапазоны регистрации параметров  $\phi$ ,  $f$  и  $\sigma$ .

Применение гибкого волоконно-оптического жгута с регулярной укладкой волокон позволяет передать на фотоприемник изображение большого числа одновременно существующих вольтовых дуг. Это позволило суммировать их мощность, усреднить частоту модуляции, расширить диапазон измерения плотности пространственного распределения источников, доступной для регистрации.

Как свидетельствуют результаты станционных испытаний датчика, использующего волоконно-оптический жгут для передачи изображений, кратность изменения фотосопrotivления резко увеличивается при переходе от “слабого” уровня искрения ( $R_s = 3$ ) к “сильному” ( $R_s = 9$ ).

В отличие от радиотехнического датчика американской фирмы General Electric, показания волоконно-оптического датчика не зависят от наличия электромагнитных помех.

II. При утечке охлаждающего водорода из корпуса турбогенератора через масляный уплотняющий подшипник, расположенный на валу ротора (диаметр ротора 1 – 1,2 м), возможно возгорание водорода с образованием мощного факела, поскольку водород находится под давлением примерно 0,5 МПа. С целью ранней диагностики момента зарождения факела были проведены исследования распределенного волоконно-оптического датчика с боковым освещением оптоволоконна. Датчик сможет зарегистрировать пламя малого размера в любой точке периметра уплотняющего подшипника.

Фотоприемники, установленные на обоих торцах световода, регистрируют излучение, рас-

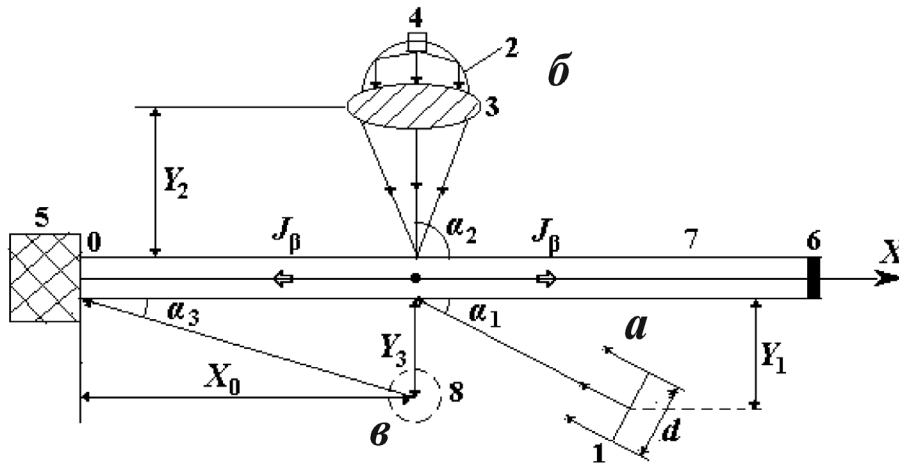


Рис. 1. Схемы освещения датчика: а – лазерным диодом 1 (5 – приемник, 6 – черный лак, 7 – световод  $\varnothing 1$  мм,  $\alpha_1, 2, 3$  – углы падения лучей,  $Y_1 = 40$  мм,  $X_0$  – координата центра освещенной зоны световода; б – сфокусированным пучком электролампы 4 (2 – концентратор  $\varnothing 40$  мм, 3 – линза  $\varnothing 100$  мм,  $Y_2 = 85$  мм); в – газовым пламенем 8 ( $Y_3 = 200$  мм, пламя:  $\varnothing 4 \times 40$  мм).

сеянное на микродефектах стекла. Упав на микродефект, луч рассеивается в пределах полусферы, если дефект лежит на поверхности жилы, и в пределах полной сферы, если дефект находится внутри жилы [1]. При этом лишь лучи, заключенные в номинальном апертурном угле, распространяются по сердцевине в обе стороны по световоду. Косые лучи проходят по световоду за счет краевого эффекта. Незначительная часть внеапертурных лучей проходит по оболочке световода к его торцам. Если имеет место Релеевское рассеяние на флуктуациях плотности и состава материала световода, то при  $\lambda \leq 1,2$  мкм величина  $\beta \sim \lambda^{-4}$ , а при  $\lambda > 2$  мкм Релеевским рассеиванием можно пренебречь [2]. Если диаметр микродефектов соизмерим с длиной волны падающего излучения, то в целом зависимость  $\beta$  от  $\lambda$  весьма невелика по сравнению с законом  $\lambda^{-4}$  для малых частиц.

### Обоснование использования “эффективного” коэффициента пропускания световода.

Рассмотрим схему передачи излучения, рассеянного микродефектами при боковом освещении оптоволокон (а<sub>1</sub> = 90°) лазерным диодом – рис. 1, а [3, 4]. Подводимый световой поток разделяется на рассеянный поток, поток выходящий

наружу через оболочку световода, и отраженный от оболочки поток (рис. 2, а, б):  $J_w = J_\rho + J_B + J_\rho$ . Здесь:

$$J_y = J_\rho + J_B, \quad J_\beta = J_u \exp(-\beta L_\beta),$$

$$J_u = J_w \int_{\varphi=0^0}^{\varphi=90^0} [1 - \rho(\varphi)] d\varphi.$$

$L_\beta$  – это условная длина пути, которую необходимо пройти потоку  $J_u$ , чтобы  $J_\beta$  стал равным суммарному рассеянию всех лучей, вошедших в поперечное сечение световода (каждый под своим углом  $\varphi$ ). Если  $J_\beta(X) \sim \text{const}$ , то при угле  $\alpha_1 = 90^\circ$  и диффузном рассеянии излучения на микродефектах, поток на фотоприемник равен

$$J_{\text{фп}}(X_0) = 0,5 J_\beta \int_{X=X_L}^{X=X_\Pi} \tau_d(X) dX.$$

Световод  $\varnothing 1 \times 260$  мм выполнен из стекол БФ 25 (сердцевина) – К17 (оболочка),  $A_0 = 0,54$ ,  $\omega = 10^{-3}$  Вт,  $\lambda = 0,630 \dots 0,680$  мкм;  $d = 4$  мм. Поскольку величина  $d/2 \ll L_0$  приближенно можно считать, что

$$\int_{X=X_L}^{X=X_\Pi} \tau_d(X) dX = \tau_d(X_0), \quad J_\beta = \frac{2J_{\text{фп}}(X_0)}{\tau_d(X_0)}.$$

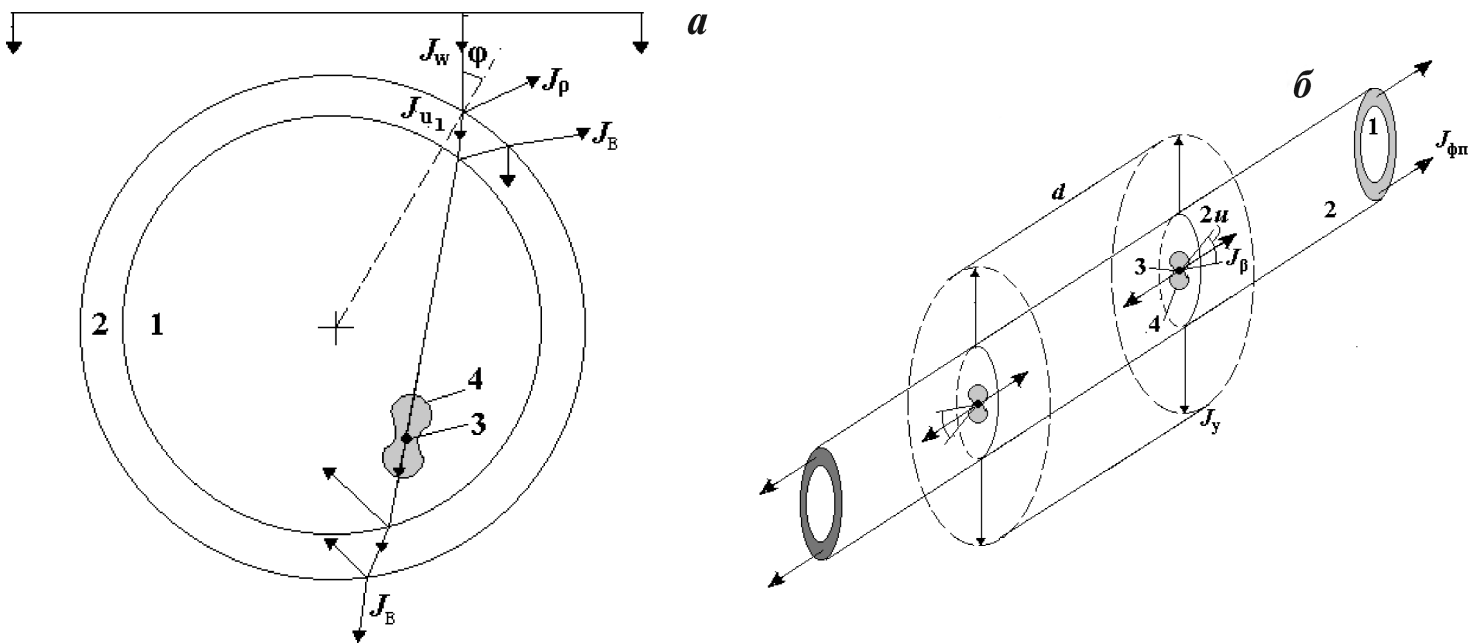


Рис. 2. Схемы распространения излучения при боковом освещении световода: а – в поперечном направлении (1, 2, – жила и оболочка световода; 3 – микродефект; 4 – индикатрисса рассеяния); б – в поперечно-продольной плоскости (1, 2, 3, 4,  $J_w$ ,  $d$  – то же, что и на рис. 2, а).

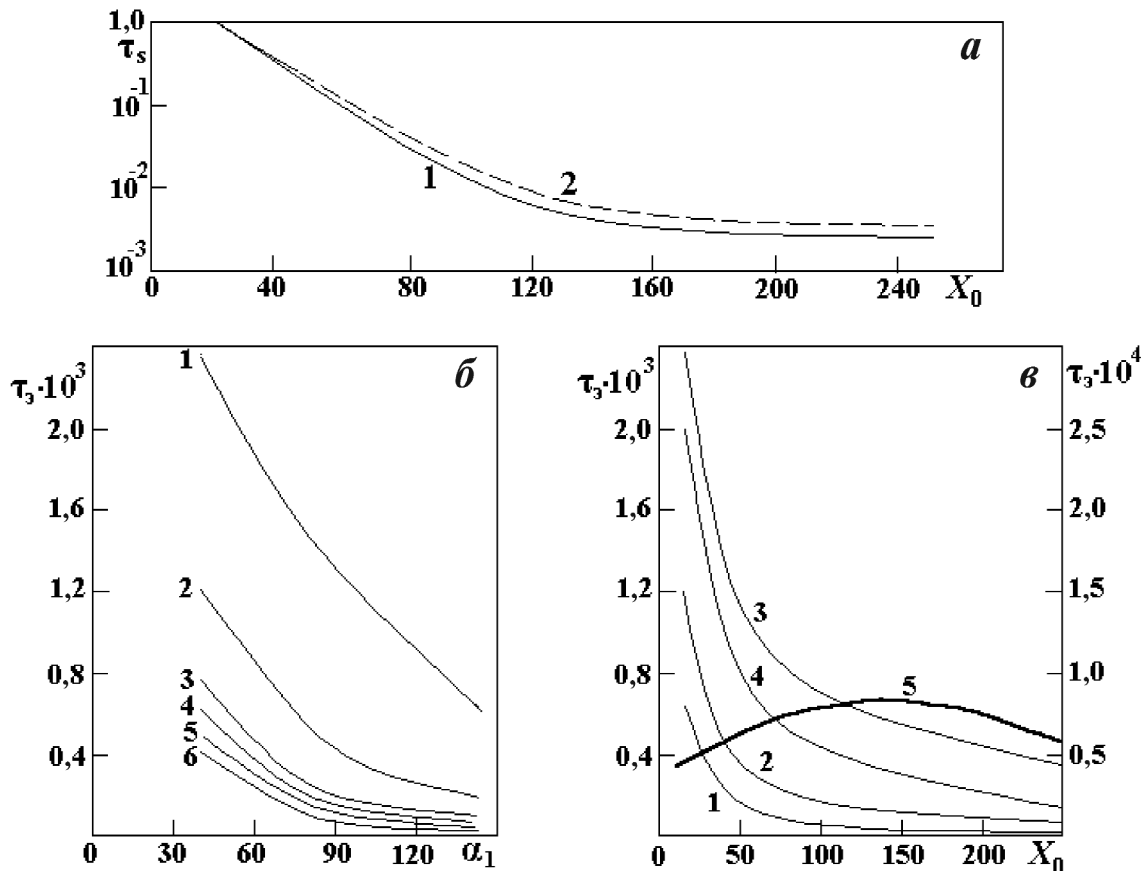
Таблица. Результаты измерений характеристик распределенного датчика лучистого потока по длине  $X_0$  световода при боковом освещении лазерным диодом ( $Y_1 = 40\text{ мм}$ ;  $\alpha_1 = 90^\circ$ ) – 1 и электролампой ( $Y_2 = 85\text{ мм}$ ;  $\alpha_2 = 90^\circ$ ) – 2.

№	$X_0$ , мм	2,2	5,2	13,0	20,2	25,0
1	$\tau_d(X_0)$	0,35	0,088	0,038	0,029	0,018
	$J_{\text{фп}}(X_0)10^{10}$ , Вт	7,0	1,74	0,8	0,6	0,35
	$(J_{\text{фп}}(X_0)/\tau_d(X_0)) \cdot 10^{10}$ , Вт	20	19,8	21	20,7	19,7
	$J_w 10^7$ , Вт	6,2	6,2	6,2	6,2	6,2
	$(\tau_p \tau_\beta) 10^3$	3,22	3,19	3,38	3,34	3,12
2	$J_w 10^6$ , Вт	8,95	8,95	8,95	8,95	8,95
	$J_{\text{фп}} 10^9$ , Вт	2,15	0,59	0,39	0,19	0,12

По литературным данным [1] при  $X_0 = 22\text{ мм}$  величина  $\tau_d(22) = 0,35$ . Для определения  $\tau_d$  при других значениях  $X_0$  сначала были измерены величины  $\tau_s(X_0) = \tau_d(X_0)/\tau_d(22)$  – (рис. 3, а), затем вычислены значения  $\tau_d(X_0)$ . Результаты вычислений (табл. 1) свидетельствуют, что отношение  $J_{\text{фп}}(X_0)/\tau_d(X_0)$  с точностью  $\sim 4\%$  остается постоян-

ным по длине световода. Следовательно, целесообразно измерить “эффективный” коэффициент пропускания по длине световода, который показывает во сколько раз поток, дошедший до фотоприемника, меньше потока, упавшего на световод:

$$\tau_\varepsilon(X_0) = J_{\text{фп}}(X_0)/J_w(X_0) . \tag{1}$$



**Рис. 3.** Коэффициенты пропускания световода в зависимости от линейной ( $X_0$ ) и угловой ( $\alpha_1$ ) координат светового пучка: *а* – относительный коэффициент пропускания  $\tau_s$  ( $\alpha_1 = \alpha_2 = 90^\circ$ ,  $Y_1 = 40$  мм,  $Y_2 = 85$  мм): 1 – лазерный диод; 2 – электролампа; *б* и *в* – “эффективный” коэффициент пропускания  $\tau_3$ ; *б* – лазерный диод ( $\alpha_1 = 90^\circ$ ,  $Y_1 = 40$  мм) при  $X_0 = 22(1)$ ,  $52(2)$ ,  $130(3)$ ,  $142(4)$ ,  $202(5)$ ,  $250(6)$  мм; *в* (1-3) – лазерный диод (1 –  $\alpha_1 = 135^\circ$ , 2 –  $\alpha_1 = 90^\circ$ , 3 –  $\alpha_1 = 45^\circ$ ,  $Y_1 = 40$  мм,  $\tau_s \cdot 10^3$ ); *в* (4) – электролампа ( $\alpha_2 = 90^\circ$ ;  $Y_2 = 85$  мм,  $\tau_s \cdot 10^4$ ); *в* (5) – пламя ( $Y_3 = 200$  мм,  $\tau_s \cdot 10^3$ ).  $X_0$ , мм;  $\alpha_1$ , град.

Коэффициент  $\tau_3(X_0)$  можно представить в виде произведения трех коэффициентов, обусловленных отражением, рассеянием и поглощением излучения:

$$\tau_3(X_0) = \tau_p \tau_\beta \tau_d(X_0), \quad \tau_d(X_0) = \frac{J_{\text{фп}}}{J_\beta(X_0)},$$

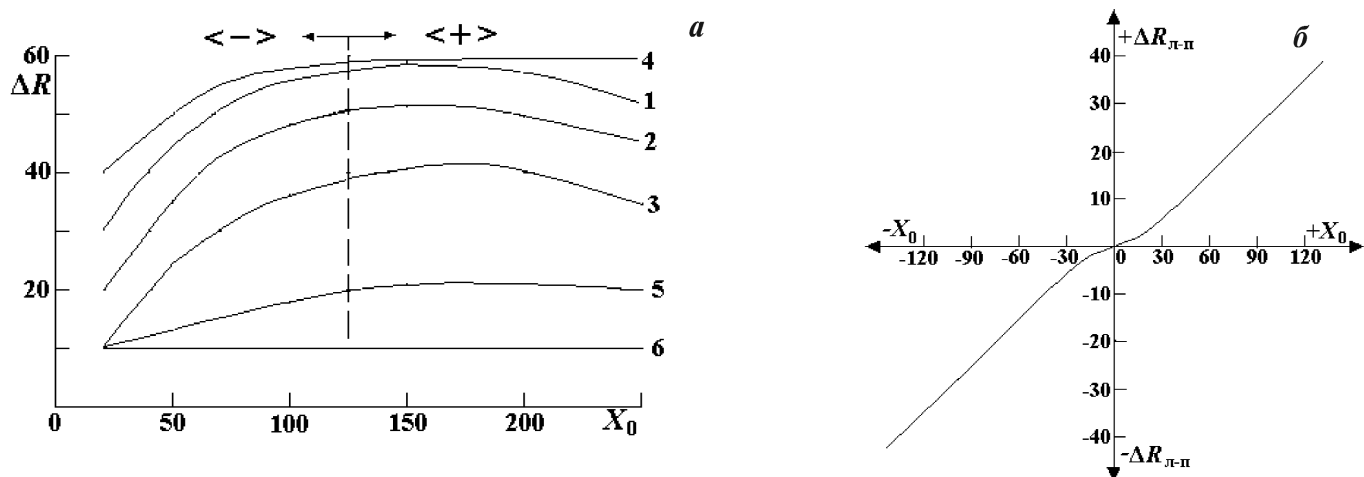
$$\tau_\beta = \frac{J_\beta}{J_\alpha}, \quad \tau_p = \frac{J_\alpha}{J_w}.$$

Расчетные значения  $(\tau_p \tau_\beta) = J_{\text{фп}}(X_0)/J_w \tau_d(X_0)$  приведены в таблице и свидетельствуют о примерном постоянстве произведения  $(\tau_p \tau_\beta)$  по длине световода. Рассмотрим усложненный случай, когда угол  $\alpha_1 \neq 90^\circ$  ( $R_T = 4010$  кОм,  $R_{\text{фо}} = 3440$  кОм,  $R_\alpha = 3390$  кОм):

$$\tau_3(X_0, \alpha_1) = \frac{J_{\text{фп}}(X_0, \alpha_1)}{J_w(X_0, \alpha_1)},$$

$$J_{\text{фп}}(X_0, \alpha_1) = J_{\text{фп}}(R_C) - J_{\text{фп}}(R_{\text{фо}}).$$

По результатам измерения были рассчитаны значения  $\tau_3(X_0, \alpha_1)$ . Установлено (рис. 3, б) существенное влияние угла  $\alpha_1$  на величину  $\tau_3$  как в положительном ( $\alpha_1 < 90^\circ$ ), так и в отрицательном ( $\alpha_1 > 90^\circ$ ) плане. Рост величины  $\tau_3(X_0, \alpha_1)$  при углах  $\alpha_1 < 90^\circ$  вызван участием в светопередаче по оптоволокну тех падающих лучей (рассеянных и нерассеянных), которые отразились от границы “жила – оболочка” в направлении к фотоприемнику под углами, близкими к угловой апертуре  $u$  оптоволокну. При падении внешнего луча под углом к оси оптоволокну индикатриса Рэлеевского рас-



**Рис. 4.** Изменение фотосопротивления датчика при перемещении пламени вдоль световода: а – изменение фотосопротивления приемника  $\Delta R$ , расположенного на левом торце световода (1, 2, 3 –  $Y_3 = 200$  мм: 1 –  $L_3 = 40$  мм, 2 –  $L_3 = 30$  мм, 3 –  $L_3 = 20$  мм; 4, 5 –  $Y_3 = 500$  мм: 4 –  $L_3 = 110$  мм, 5 –  $L_3 = 80$  мм; 6 –  $Y_3 = 1000$  мм:  $L_3 = 110$  мм); б – разность фотосопротивлений  $\Delta R_{л-п}$  приемников на левом и правом торцах световода при перемещении оси пламени относительно середины длины световода.  $\Delta R$ ,  $\Delta R_{л-п}$ , кОм;  $X_0$ , мм.

сеяния на микродефектах вытягивается в прямом и обратном направлении падающего луча. В результате доля лучей, рассеянных в пределах апертурного угла световода, увеличивается. Это приводит к увеличению коэффициента  $\tau_d$ , а следовательно, и  $\tau_s$ .

Экспериментальная зависимость (рис. 3, в) свидетельствует об отсутствии резких флуктуаций  $\tau_s$ . Имея экспериментальные зависимости  $\tau_s(X_0, \alpha_1)$ , можно при известном угле падения пучка определить координату  $X_0$ , либо при известном значении  $X_0$  определить угол падения (при данном  $Y_1$ ). Из формулы (1) получаем величину падающего потока. Зависимости  $\tau_s(X_0)$  и  $\tau_s(\alpha_1)$  можно сделать более плавными и симметричными относительно середины длины световода, если установить приемники на обоих торцах световода и измерять разницу фотосопротивлений  $\Delta R_{л-п}$ .

### Излучатель с непрерывным спектром

Для сравнения были проведены аналогичные исследования при боковом освещении световода излучателем с непрерывным спектром (рис. 1, б). Источником излучения служила электрическая лампочка мощностью  $\sim 0,5$  Вт с полусферичес-

ким концентратором  $\varnothing 40$  мм и линзой  $\varnothing 100$  мм;  $D_F = 8$  мм,  $A = 0,23$ ,  $Y_2 = 85$  мм. Полученный характер зависимости величины  $\tau_s$  от координаты  $X_0$  (рис. 3, в, кривая 4) сохранился таким же, как и при лазерном излучателе. Значения  $\tau_s(X_0)$  для лампы очень незначительно (рис. 3, а) отличаются ( $\sim 10\%$ ) от величин  $\tau_s(X_0)$ , полученных для лазерного излучателя при  $\alpha_1 = 90^\circ$ .

### Излучатель – газовое пламя (горелка на природном газе)

При расстоянии оси пламени от оси световода 200 мм (рис. 1, в) зависимость  $\Delta R(X_0)$  имеет максимум посередине длины световода. Здесь параметр  $\tau_s > 1$ , рис. 4, а, 1, 2, 3 [5].

Ход зависимости объясняется тем, что хотя при увеличении  $X_0$  пропускание  $\tau_d(X_0)$  уменьшается, световой поток на фотоприемник сначала возрастает – вследствие уменьшения угла  $\alpha_3$ . При дальнейшем росте координаты  $X_0$  абсорбционные потери по длине световода становятся определяющими, что приводит к уменьшению потока на фотоприемник (появляется второй минимум  $\Delta R$ ). При увеличении  $Y_3$  до 500 мм второй минимум исчезает (рис. 4, а, 4, 5). При  $Y_3 \geq 1000$  мм:  $\Delta R(X_0) = \text{const}$  (рис. 4, а, 6) вследст-

вие того, что освещенность по длине световода становится более равномерной (угол  $\alpha_3$  увеличивается). В этом случае появляется возможность оценки с помощью одного фотоприемника величины  $Y_3$  ( $L_3 = \text{const}$ ), либо величины  $L_3$  ( $Y_3 = \text{const}$ ) инвариантно к  $X_0$ .

В ближней зоне ( $Y_3 \leq 200$  мм) зависимости  $\Delta R(X_0)$  при различной длине пламени  $L_3$  – примерно эквидистантны, поэтому с помощью двух приемников (установленных на обоих торцах световода) можно получить линейную зависимость  $\Delta R_{л-п}(X_0)$ , инвариантную в конечном интервале к величине  $L_3$  – рис. 4, б. В ближней зоне чувствительность к изменению длины  $L_3$  равна 1 кОм/мм (рис. 4, а, 1, 2, 3) и слабо зависит от величины  $X_0$ . Таким образом, имея  $\Delta R_{л-п}$  и  $\psi$ , можно определить местоположение и длину пламени в ближней зоне. Величина  $\tau_э(X_0)$ , получена с учетом площади освещенной поверхности световода (рис. 3, в, 5):  $\tau_э(X_0) = J_w(X_0)/J_w(X_0)S$ . Измерив  $\Delta R_{л-п}$ , находим  $X_0$ , и зная  $\tau_э(X_0)$ , можно определить величину  $J_w(X_0)S$ .

Как свидетельствуют результаты экспериментов, слой турбинного масла, нанесенный на горизонтально расположенный стеклянный световод диаметром 1,0 мм, собирается в капли. При наклоне оси световода под углом  $\geq 30^\circ$  к горизонту капли стекают по световоду, отрываясь от его нижнего торца. На боковой поверхности световода остается тонкая (0,1...0,2 мм) пленка масла. Для уменьшения смачиваемости на поверхность световода можно нанести поверхностно-активное вещество [6], которое используется для покрытия поверхностей линз. Значения коэффициента пропускания пленки масла при  $\lambda_m = 2,1$  мкм в зависимости от состава фонового излучения составили  $\tau_m = 0,72...0,82$ . При непосредственном воздействии газового пламени на световод происходит интенсивное образование дыма и воспламенение масла. После его быстрого выгорания на боковой поверхности световода образуется сажистый налет, который легко снимается при протирании.

Во время горения газового пламени горелки наблюдались спонтанные вспышки, при которых сигнал датчика резко увеличивался. Флуктуации фототока датчика, соответствующие изменениям яркости пламени, составили от 0,1 до 0,5 мкА.

Поскольку амплитудно-частотная характеристика пламени на натурном объекте не известна, при выборе на стенде порога срабатывания датчика целесообразно ориентироваться на постоянную составляющую излучения пламени фиксированной длины.

При необходимости снизить температуру фотоприемника, последний может быть вынесен из зоны контроля с помощью гибкого оптоволокну.

Для обеспечения эквидистантного расположения оси световода относительно по-верхности ротора турбогенератора был бы целесообразен изгиб световода. Для световода диаметром 1 мм (БФ25 – К17) расчет допустимого радиуса кривизны изгиба без виньетирования лучей дал значение 30 мм. В отсутствие виньетирования уменьшение апертуры зависит от относительного радиуса изгиба и для данной пары стекол составило величину  $\frac{n_{об}^2}{r_*} = 0,14A_0$ , где  $A_0$  – номи-

нальная числовая апертура световода. Светосила световода из стекол БФ25 – К17 при  $r_* = 30$  мм уменьшится до 0,3. Следовательно изгиб данного световода является нежелательным, вследствие чего надо использовать для датчика пламени прямые отрезки световодов, расположенные на уплотняющем подшипнике в виде 12 – гранника, симметричного к оси ротора диаметром 1,2 м.

Контроль пламени, инвариантный к условиям внешней освещенности, может быть реализован с помощью схемы, содержащей измерительный мост, опорный фотоприемник и дифференциальный усилитель. В этом случае можно записать:

Контроль пламени, инвариантный к условиям внешней освещенности, может быть реализован с помощью схемы, содержащей измерительный мост, опорный фотоприемник и дифференциальный усилитель. В этом случае можно записать:

$$J_w = (J_3 + J_{\text{фо}}) \tau_m \tau_{\text{ср}},$$

$$J_{\text{фп}} = (J_3 + J_{\text{фо}}) \tau_m \tau_{\text{ср}} \tau_э, \quad \tau_{\text{кф}} = \tau_э \tau_{\text{ср}}$$

$$J_{\text{фп}} / J_{\text{фпо}} = 1 + J_3 / J_{\text{фо}}.$$

Для определения координаты пламени необходимо программное обеспечение.

Практические рекомендации.

1. Пороговый уровень срабатывания дискриминатора сигнала датчика устанавливается на пламя заданной длины.

2. Диаметр световода должен быть  $\sim 1$  мм, поскольку его увеличение приводит к росту толщи-



ны масляной пленки. Слишком малый диаметр световода приводит к сокращению пути лучей через поперечное сечение, т. е. к снижению чувствительности датчика.

3. Для 12-ти гранника длина секции с учетом размеров оптических разъемов равна 260 мм. Секционный датчик удобен и тем, что в случае повреждения световода (во время монтажа датчика или во время техобслуживания турбогенератора) достаточно будет заменить секцию.

4. Логическая структура датчика должна: отображать географические адреса (секция – приемники – светодиоды - контрольные входы и выходы), объединять элементы в логические группы (для реализации алгоритмов текстирования функционального состояния датчиков), обеспечивать оптимальную стыковку групп (секций) с измерителями сигналов для обнаружения пламени заданной длины в любой точке периметра подшипника.

5. Центральный пульт должен информировать персонал станции с помощью стандартных сообщений, индикаторов, тревожных сирен. Сообщения включают географические адреса контролируемых турбогенераторов, инструкции на случай тревоги или неисправности и т. п. Пульт должен иметь интерфейсы для подключения системы сброса водорода и сигнальных устройств. При проведении самотестирования необходимо проводить также периодическое функциональное испытание на пламя (с помощью светодиодов).

6. Экспериментальной базой данных, с которой должны сравниваться результаты измерений на натурном объекте, является набор данных, полученных при стендовых испытаниях одной секции датчика. Регистрируются параметры опорного и измерительного фотоприемников при различных значениях координаты и длины пламени.

Испытания проводятся при наличии масляной пленки на световоде и при различном фоновом освещении. Полученные зависимости аппроксимируются.

К достоинствам датчика можно отнести:

- ◆ высокий уровень электромагнитной совместимости благодаря экранированным сигнальным линиям и схемам, использованию фильтров подавления электрических помех;

- ◆ высокая стойкость световодов к воздействию температуры, влаги, коррозии;
- ◆ высокий уровень надежности работы благодаря распределенному волоконно-оптическому сенсору.

### Выводы

1. Проведены стационарные исследования эффективности использования различных оптических моноволокон для обнаружения уровней искрения ЩКА мощного турбогенератора. Установлено, что моноволокна 200, 400, 700 мкм непригодны для использования, поскольку мала вероятность попадания дуги в “поле зрения” световода. Датчик, включающий световодный жгут для передачи изображений, позволил зарегистрировать различные уровни искрения ЩКА турбогенератора на Киевской ТЭЦ-5.

2. Разработана аналитическая модель, описывающая схему прохождения пучка света, пересекающего ось световода при боковом освещении. Показано, что относительный коэффициент пропускания при боковом освещении световода монохроматическим излучателем и излучателем с непрерывным спектром совпадают с точностью ~ 10%. Предложен алгоритм измерения мощности подводимого потока, который использует “эффективный” коэффициент пропускания световода при боковом освещении. Величина  $\tau_3(X_0)$ , полученная для газового пламени, имеет максимум на середине длины световода, что обусловлено зависимостью  $\tau_3$  от  $\alpha_3$ .

3. В ближней зоне чувствительность датчика к изменению длины пламени составляет 1 кОм/мм, что позволяет с помощью двух фотоприемников (установленных на обоих торцах световода) определять координату  $X_0$  и длину пламени.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Вейнберг В.Б., Самтаров Д.К. Оптика световодов. – Л.: Машиностроение, 1977. – 318 с.
2. Ишанин Г.Г., Панков Э.Д., Андреев А.Л., Польщиков Г.В. Источники и приемники излучения. – С. Пб.: Политехника, 1991. – 240 с.
3. Горностаев Г.Ф., Бережецкая В.Я., Шевченко А.В. Разработка датчиков для диагностики

энергетического оборудования. В кн.: Оценка и обоснование продления ресурса элементов конструкции: Докл. междунар. конф. 6-9 сентября 2000 г., Киев, Украина. Киев, 2000. – Т. 2. – С. 587–592.

4. Горностаев Г.Ф., Фролов Г.А., Трикула М.В. Исследование механизма распространения излучения при боковом освещении световода. // ИФЖ. – 2004. – Т. 77. – №3. – С. 64–68.

5. Горностаев Г.Ф. Датчик пламени для системы сброса водорода из турбогенератора при

пожаре. В кн.: Водородное материаловедение и химия гидридов металлов: Тез. междунар. конф. 16–22 сентября 2001, Алушта, Крым, Украина. Киев, 2001. – С. 796–797.

6. Поскачей А.А., Чубаров Е.П. Оптико-электронные системы измерения температуры. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 248 с.

*Получено 20.09.2005 г.*