

4. Тикадзуми С. Физика ферромагнетизма : пер. с японск. / С. Тикадзуми. – М. : Мир, 1997. – Т. 1: Магнитные свойства вещества; Т. 2: Магнитные характеристики и практическое применение.
5. Ураксеев М. А. Математическая модель магнитооптического преобразователя для автоматизированных технологических процессов / М. А. Ураксеев, Н. А. Авдонина // Вестник УГАТУ. – 2009. – Т. 13, № 1 (31). – С. 36–38.
6. Ураксеев М. А. Проектирование магнитооптической измерительной системы / М. А. Ураксеев, Н. А. Авдонина // Приборы и системы: управление, контроль, диагностика. – 2010. – № 6. – С. 34–42.

References

1. Noskov M. M. Opticheskie i magnitnoopticheskie svojstva metallov / M. M. Noskov. – Sverdlovsk : Izd-vo UNC AN SSSR, 1983.
2. Randoshkin V. V. Prikladnaja magnitnooptika / V. V. Randoshkin, A. Ja. Chervonenkis. – М. : Jenergoatomizdat, 1990.
3. Sokolov A. V. Opticheskie svojstva metallov / A. V. Sokolov. – М. : Fizmatgiz, 1961.
4. Tikadzumi S. Fizika ferromagnetizma : per. s japonsk. / S. Tikadzumi. – М. : Mir, 1997. – Т. 1: Magnitnye svojstva vevestva; Т. 2: Magnitnye harakteristiki i prakticheskoe primenenie.
5. Urakseev M. A. Matematicheskaja model' magnitnoopticheskogo preobrazovatelja dlja avtomatizirovannyh tehnologicheskikh processov / M. A. Urakseev, N. A. Avdonina // Vestnik UGATU. – 2009. – Т. 13, № 1 (31). – С. 36–38.
6. Urakseev M. A. Proektirovanie magnitnoopticheskoy izmeritel'noj sistemy / M. A. Urakseev, N. A. Avdonina // Pribory i sistemy: upravlenie, kontrol', diagnostika. – 2010. – № 6. – С. 34–42.

УДК 681.51.011

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АКУСТООПТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЛИНЕЙНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

Ураксеев Марат Абдуллович, доктор технических наук, профессор, Уфимский государственный авиационный технический университет, 453000, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12, e-mail: uma1941@mail.ru.

Пахомов Александр Николаевич, аспирант, Уфимская государственная академия экономики и сервиса, 450078, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Чернышевского, 145, e-mail: Allexx2010@mail.ru.

Приведена математическая модель, учитывающая модуляцию по фазе одночастотного когерентного излучения на выходе модулятора. При ее построении учитывалось, что наиболее используемыми модами на выходе модулятора являются моды порядка $0; \pm 1$. Установлены зависимости интенсивности светового потока этих мод $0; \pm 1$ порядка от интенсивности источника оптического излучения в виде лазера или лазерного диода, длины ультразвуковой волны, создаваемой пьезоизлучателем, питаемым генератором радиочастоты.

Приведен анализ акустооптического преобразователя перемещений, действие которого основано на акустооптической дифракции Рамана-Ната. Приведено описание дифракционного спектра $0; \pm 1$ -го порядков акустооптического преобразователя частоты излучения. Описано математически преобразование одночастотного лазерного излучения с помощью акустооптического преобразователя, основанное на явлении дифракции света на ультразвуковых волнах. Дифракция когерентного излучения на ультразвуке обеспечивает получение на выходе акустооптического модулятора когерентных составляющих излучения со сдвигом частоты. Приведена формула отклонения углов между интенсивностями светового потока $0; \pm 1$ порядка и горизонтальной осью.

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Сделан вывод, что достоинством АО модуляторов является то, что апертура входного когерентного излучения практически ничем не ограничена. Величина управляющих напряжений и мощностей у АО модуляторов ниже, чем у электрооптических.

Ключевые слова: математическая модель, акустооптика, преобразователь, дифракция света, ультразвуковая волна, когерентное излучение, модулятор, частотный сдвиг, дифракционный спектр, дифракционная решетка, пьезоизлучатель, коэффициент преломления, апертура.

A MATHEMATICAL MODEL OF ACOUSTO-OPTIC LINEAR DISPLACEMENT TRANSDUCER

Urakseev Marat A., Sc.D. (Technics), Professor, Ufa State Aviation Technical University, 453000, Bashkortostan, Ufa, 12, K. Marx st., e-mail: uma1941@mail.ru.

Pakhomov Alexander N., postgraduate student, Ufa State Academy of Economy and Service, 450078, Bashkortostan, Ufa, 145, Chernyshevsky st., e-mail: Allexx2010@mail.ru.

The mathematical model considering modulation of phase of the single-frequency coherent radiation at the output of the modulator is given. When it was built it was considered that the most used modes at the output of the modulator are the modes of $0; \pm 1$ orders. The dependences of intensity of the light of these modes ($0; \pm 1$ orders) from intensity of the light source in form of a laser or a laser diode, and the length of the ultrasonic wave generated by piezo-emitter powered by radio frequency generator are identified.

The analysis of the acousto-optic displacement transducer which action is based on Raman-Nata's acousto-optic diffraction is provided. The description of the diffraction spectrum of $0; \pm 1$ orders of acousto-optic frequency transducer of the radiation is given. Conversion of the single-frequency laser radiation by means of the acousto-optic transducer, based on the phenomenon of diffraction of light on ultrasonic waves is described mathematically. Diffraction of the coherent radiation on ultrasound provides receiving the coherent components of radiation with frequency displacement on an output of the acousto-optic modulator. The formula of a deviation of angles between the intensities of the light flux $0; \pm 1$ orders and the horizontal axis is given.

It is concluded that the advantage of AO modulators is that the aperture of the input coherent radiation is practically unlimited. The values of control voltages and powers of the AO modulators are lower than those of the electro optical modulators.

Key words: mathematical model, acousto-optics, transducer, light diffraction, ultrasonic wave, coherent radiation, modulator, frequency shift, diffraction spectrum, diffraction grating, piezo-emitter, refraction index, aperture.

Акустооптические преобразователи (АОП) линейных перемещений обладают высокой точностью, разрешающей способностью, надежностью и быстродействием (до 10^{-7} – 10^{-9} сек). Действие АОП основано на акустооптической (АО) дифракции Рамана-Ната (рис. 1).

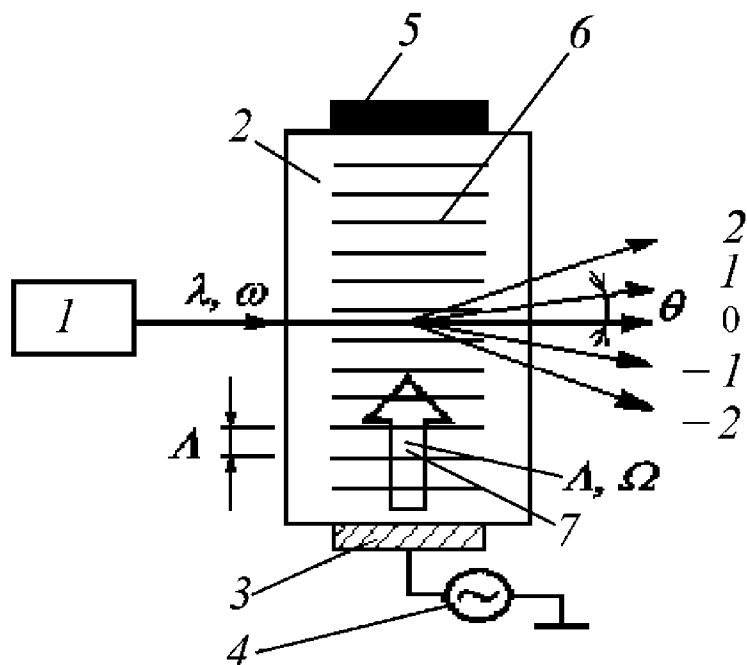


Рис. 1. Дифракция Рамана-Ната при АО эффекте:

- 1 – источник оптического излучения в виде лазера или лазерного диода;
- 2 – АО ячейка Рамана-Ната; 3 – пьезоизлучатель; 4 – генератор радиочастоты;
- 5 – демпфер ультразвуковых колебаний (УЗ-колебаний); 6 – периодические неоднородности среды, создаваемые ультразвуковой волной (УЗ-волной);
- 7 – УЗ-волна, создаваемая пьезоизлучателем в акустооптическом материале ячейки

Свет от источника оптического излучения 1 в виде электромагнитной волны с длиной λ и частотой ω подается на акустооптическую ячейку 2, в которой при прохождении УЗ-волны 7 с длиной волны Λ и частотой Ω , создаваемой пьезоизлучателем 3, образуются периодические неоднородности среды. При попадании луча света на эти неоднородности имеет место дифракция Рамана-Ната – луч распадается на ряд мод порядка $m=0, \pm 1, \pm 2$.

$$\sin \theta = \pm m\lambda/\Lambda, \quad (1)$$

где m – порядок дифракции (целое число); Λ – длина волны ультразвука; λ – длина волны света. В основном в выражении (1) используются моды ± 1 порядка дифракции [3].

Подвижная часть АОП – оптическая система, включающая источник оптического излучения в виде лазера, фотодиод, на который поступает световой поток (обычно используются моды ± 1 порядка), усилитель, аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и жидкокристаллический индикатор (ЖКИ) (см. рис. 1).

Для проектирования АОП необходима разработка их математической модели, учитывающей модуляцию по фазе одночастотного когерентного излучения лазерного диода при прохождении через плоскую УЗ-волну.

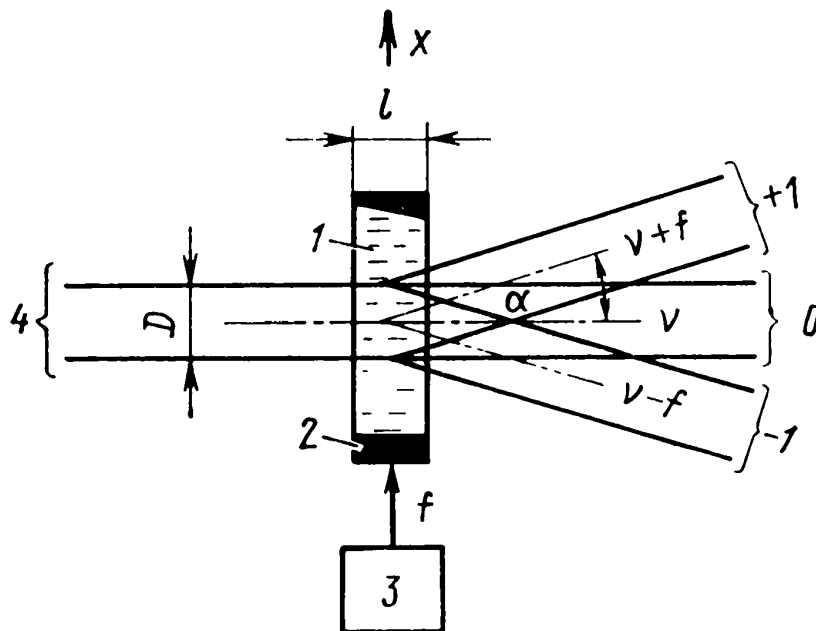


Рис. 2. АОП частоты излучения

Преобразование одночастотного лазерного излучения с помощью АОП [2, 4, 5] основано на явлении дифракции света на УЗ-волнах и заключается в том, что акустические волны, распространяющиеся в оптически прозрачной среде, действуют на проходящее одночастотное когерентное излучение, подобно фазовой дифракционной решетке. В прозрачной среде модулятора (рис. 2) с помощью пьезоизлучателя 2, возбуждаемого от генератора 3, на частоте f возбуждается бегущая УЗ-волна. Распределение показателя преломления среды, создаваемое волной, имеет вид

$$\Delta n_x = n_0 + \Delta n_0 \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda} x - \Omega t\right),$$

где n_0 – показатель преломления среды, не возмущенной звуком; Δn_0 – амплитуда изменения показателя преломления; $2\pi/\Lambda$ – волновое число звука; Λ – длина звуковой волны; $\Omega = 2\pi f$ – круговая частота звуковой волны.

Одночастотное когерентное излучение 4 при прохождении через ультразвуковую волну модулируется по фазе. Для этого АО преобразователя, функция пропускания модулятора 1 имеет вид

$$F(x) = \exp\left\{-j \frac{2\pi}{\Lambda} n_0 l\right\} \exp\left\{-j \frac{2\pi}{\Lambda} \Delta n_0 l \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda} x - \Omega t\right)\right\}.$$

Если пренебречь постоянным фазовым сдвигом, будем иметь

$$F(x) = \exp\left\{-j \delta_\phi \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda} x - \Omega t\right)\right\},$$

здесь $\delta_\phi = (2\pi/\Lambda) \Delta n_0 l$ – амплитуда фазовой модуляции излучения; l – глубина звукового поля.

При прохождении когерентного излучения через модулятор

$$e_0 = E_0 \exp(-j\omega t)$$

на выходе модулятора получаем

$$e_{\text{вых}} = e_0 F(x),$$

где E_0 – амплитуда электрического вектора излучения; ω – круговая частота колебаний излучения ($\omega = 2\pi\nu$).

Угловой спектр поля $e_{вых}$ определяется как преобразование Фурье функции пропускания $F(x)$:

$$S(u) = E_0 \exp(-j\omega t) \int_{-\infty}^{\infty} F(x) \exp(-j2\pi ux) dx \quad (2),$$

где u – пространственная частота ($u = \sin \alpha / \Lambda$); α – угловая координата.

При бесконечной апертуре выражение для спектра принимает вид

$$\begin{aligned} S_0(u) &= E_0 \exp\{-j(\omega + m\Omega)t\} \sum_{m=-\infty}^{\infty} j_m(\delta_\phi)(-j)^m * \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left\{-j2\pi\left(u - m\frac{1}{\Lambda}\right)x\right\} dx = \\ &= \sum_{m=-\infty}^{\infty} E_0 \exp\{-j(\omega + m\Omega)t\} * j_m(\delta_\phi)(-j)^m \delta\left(u - m\frac{1}{\Lambda}\right) = \\ &= E_0 \sum_{m=-\infty}^{\infty} \exp\{-j(\omega + m\Omega)t\} * j_m(\delta_\phi)(-j)^m \delta\left(\frac{1}{\lambda}\left(\sin \alpha - m\frac{\lambda}{\Lambda}\right)\right) \end{aligned} \quad (3),$$

где $j_m(\delta_\phi)$ – бесселева функция 1-го рода m -го порядка, $\delta(u - m/\Lambda)$ – дельта-функция, $m = 0, \pm 1, 2, 3, \dots$ – номер дифракционного порядка.

Если величина D ограничивает апертуру входного излучения, т. е.

$$e_0 = E_0 \exp(-j\omega t) \operatorname{rect}\left(\frac{x}{D}\right),$$

$$\operatorname{rect}\left(\frac{x}{D}\right) = \begin{cases} 1 & \text{при } |x| \leq \frac{D}{2} \\ 0 & \text{при } |x| > \frac{D}{2} \end{cases},$$

то угловой спектр будет описываться сверткой спектра $S_0(u)$ с Фурье преобразованием функции $\operatorname{rect}\left(\frac{x}{D}\right)$:

$$S(u) = A_0(u) \otimes \left\{ \operatorname{rect}\left(\frac{x}{D}\right) \right\} = E_0 D \sum_{m=-\infty}^{\infty} j_m(\delta_\phi)(-j)^m * \exp\{-j(\omega + m\Omega)t\} \operatorname{sinc}\left(D\left(u - m\frac{1}{\Lambda}\right)\right) \quad (4),$$

где

$$\operatorname{sinc}\left(D\left(u - m\frac{1}{\Lambda}\right)\right) = F\left(\operatorname{rect}\left(\frac{x}{D}\right)\right) = \frac{\sin\left(\frac{\pi D}{\lambda}\left(\sin \alpha - m\frac{\lambda}{\Lambda}\right)\right)}{\frac{\pi D}{\lambda}\left(\sin \alpha - m\frac{\lambda}{\Lambda}\right)},$$

а знак \otimes – операция свертки.

Проанализировав выражения (3) и (4), можно сделать вывод, что угловой спектр представляет собой набор составляющих когерентного излучения, распространяющихся под различными углами. Эти составляющие являются порядками дифракционного спектра, максимумы которых направлены под углами α_m , соответствующими известному условию для дифракционных решений $\sin \alpha_m = m\lambda/\Lambda$. Частота в каждом дифракционном порядке имеет сдвиг относительно частоты входного когерентного излучения на величину, кратную ультразвуковой частоте, $\omega_m = \omega + m\Omega$. Частотные сдвиги в порядках кратны частоте ультразвукового генератора.

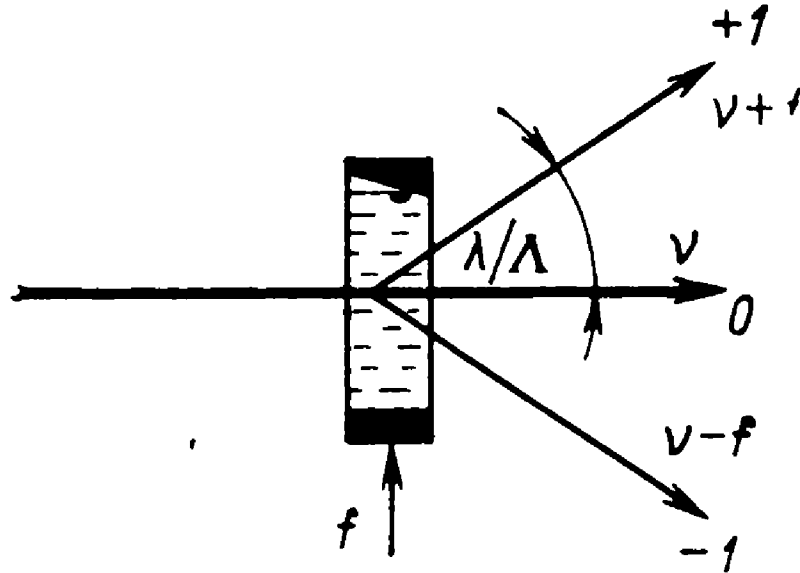


Рис. 3. Дифракционный спектр 0 ± 1 -го порядков

Выражение (3) для спектра содержит несколько дифракционных порядков, интенсивность которых убывает пропорционально $I_m^2(\delta_\phi)$. Так как интенсивность звука в модуляторе мала ($\delta_\phi < 0,1$), дифракционными порядками выше 1-го можно пренебречь. Тогда дифракционный спектр с достаточным приближением представляется тремя составляющими когерентного излучения 0 и ± 1 -го порядков (рис. 3):

$$\left. \begin{aligned} e_{(0)} &= E_0 J_0(\delta_\phi) \exp(-j\omega t) \\ e_{(1)} &= -jE_0 J_1(\delta_\phi) \exp(-j(\omega + \Omega)t) \\ e_{(-1)} &= -jE_0 J_1(\delta_\phi) \exp(-j(\omega - \Omega)t) \end{aligned} \right\} \quad (4).$$

Спектр (4) симметричен и соответствует рамановской дифракции света на ультразвуке, для которой удовлетворяется условие $l < \Lambda^2 \lambda$. С повышением ультразвуковой частоты это условие нарушается, и спектр становится асимметричным, приближаясь к картине брэгговской дифракции. В этом случае входное когерентное излучение 1 составляет угол $\varphi_B = \lambda/2\Lambda$ с фронтом акустической волны в модуляторе, и в зависимости от знака угла φ_B дифрагирует в $+1$ (рис. 4).

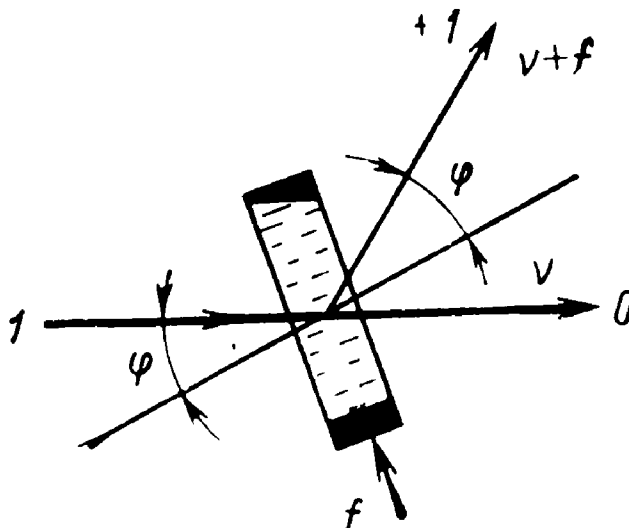


Рис. 4. Дифракционный спектр +1-го порядка

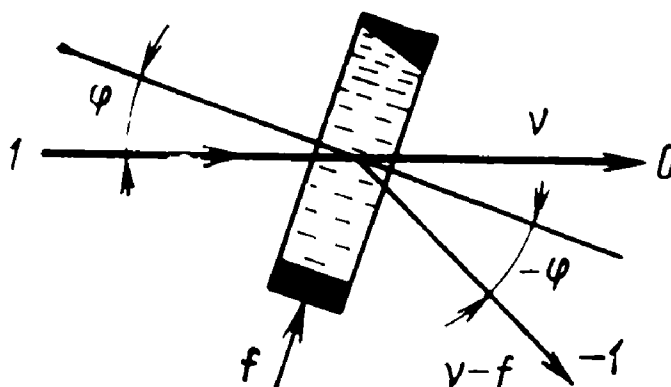


Рис. 5. Дифракционный спектр

и в -1 порядки (рис. 5). Дифрагированное излучение составляет угол $\theta\lambda/\Lambda$ с направлением входного излучения и имеет смещенную оптическую частоту $\omega_{\pm l} \pm l = \omega + \Omega$. Дифракция когерентного излучения на ультразвуке обеспечивает получение на выходе АО моделированных когерентных излучений со сдвигом частоты [1].

Достоинством АО модуляторов является то, что апертура входного когерентного излучения практически ничем не ограничена. Это позволяет при использовании коллиматоров уменьшить влияние расходимости излучения лазера. Величина управляющих напряжений и мощностей у АО модуляторов ниже, чем у электрооптических.

Список литературы

1. Застрогин Ю. Ф. Контроль параметров движения с использованием лазеров: методы и средства / Ю. Ф. Застрогин. – М. : Машиностроение, 1981. – 176 с.
2. Мустель Е. Р. Методы модуляции и сканирования света / Е. Р. Мустель, В. Н. Парыгин. – М. : Наука, 1970. – 295 с.
3. Окоси Т. Волоконно-оптические преобразователи / Т. Окоси, М. Оцу, Х. Нисихара, К. Хататэ ; под ред. Т. Окоси : пер. с япон. – Л. : Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1991. – 255 с.

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

4. Телишевский В. И. Гетерогенные методы лазерной интерферометрии на основе акустической модуляции света / В. И. Телишевский // Измерительная техника. – 1975. – № 1. – С. 42–45.

5. Телишевский В. И. Применение акустооптических модуляторов в фотоэлектрических системах измерения линейных и угловых величин / В. И. Телишевский // Измерительная техника. – 1973. – № 3. – С. 30–34.

References

1. Zastrogin Ju. F. Kontrol' parametrov dvizhenija s ispol'zovaniem lazerov: metody i sredstva / Ju. F. Zastrogin. – M. : Mashinostroenie, 1981. – 176 s.

2. Mustel' E. R. Metody moduljacji i skanirovanija sveta / E. R. Mustel', V. N. Parygin. – M. : Nauka, 1970. – 295 s.

3. Okosi T. Volokonno-opticheskie preobrazovateli / T. Okosi, M. Ocu, H. Nisihara, K. Hatatje ; pod red. T. Okosi : per. s japon. – L. : Jenegroatomizdat. Leningr. otd-nie, 1991. – 255 s.

4. Telishevskij V. I. Geterogennye metody lazernoj interferometrii na osnove akusticheskoj moduljacji sveta / V. I. Telishevskij // Izmeritel'naja tehnika. – 1975. – № 1. – S. 42–45.

5. Telishevskij V. I. Primenenie akustoopticheskikh moduljatorov v fotoelektricheskikh sistemah izmerenija linejnyh i uglovyh velichin / V. I. Telishevskij // Izmeritel'naja tehnika. – 1973. – № 3. – S. 30–34.