



ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ СПЕКТРОАНАЛИЗАТОРОВ СТАТИЧЕСКОГО КОГЕРЕНТНОГО СВЕТОРАССЕНИЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ДИСПЕРСНЫХ СТРУКТУР ЖИДКИХ СРЕД

А.В. Воробьева, Т.В. Ефимова, М.В. Жиров, А.Е. Краснов (МГУТУ)

Приведен расчет помех для типовой оптической схемы спектроанализатора статического когерентного светорассечения. Предложена оптимальная по габаритам и помехам схема спектроанализатора, которая может составить основу специализированных датчиков дисперсной структуры технологической воды, электролитов, питьевой воды, спирта, спиртосодержащих жидкостей, ликероводочной и винодельческой продукции.

Преимущества использования статического и динамического когерентного светорассечения по сравнению с некогерентным при исследовании светорассеивающих характеристик жидких сред известны [1-3]. В настоящей работе проводится расчет оптимальной по габаритам и помехам оптической схемы спектроанализатора, используемого для контроля дисперсных структур жидких сред, содержащих микроскопические включения. При расчетах использовалась типовая схема когерентного оптического спектроанализатора (рис. 1).

Рассмотрим бесконечно тонкую кювету K с исследуемой жидкой средой ($d_K \rightarrow \lambda$, где λ – длина волны когерентного света), формирующую во входной плоскости \vec{x} спектроанализатора (передней фокальной плоскости объектива O_3) оптический сигнал $S(\vec{x})$, определяемый малоугловым (в пределах апертуры зрачка объектива) светорассеянием на кювете.

Известно, что для выполнения точного (в параболическом приближении) преобразования Фурье параметры оптической схемы спектроанализатора должны удовлетворять соотношениям [1]:

$$\begin{aligned} \delta_1 = d_0 - F_1 - F_2 = 0; \quad \delta_2 = d_2 - F_3 = 0; \\ \delta_3 = d_3 - F_3 = 0; \quad d_1 = 0 \dots F_2; \quad W > X, \end{aligned} \quad (1)$$

где $2X$ – поперечные размеры оптического пучка на кювете.

Однако в реальной оптической системе ошибки δ_1 , δ_2 и δ_3 не равны 0, хотя и являются малыми величинами по сравнению с фокусными расстояниями F_2 и F_3 . Введем вектор безразмерных параметров $\vec{p} = (p_1, p_2, p_3, p_4)$, характеризующий относительные ошибки настройки системы, и, используя формализм расчета оптической цепи [1], получим выражение для сигнала в выходной плоскости $\vec{\omega}$ спектроанализатора:

$$\begin{aligned} S_{\vec{p}}(\vec{\omega}) = \left(\frac{i}{d_3 \lambda} \right) \exp \left[i \frac{\pi p_2 \vec{\omega}^2}{\lambda F_3} \right] \int_{\vec{x}} S(\vec{x}) \exp \left[- \frac{\vec{x}^2}{2W^2} \right] \times \\ \times \left[1 + i \left(\frac{\pi}{\lambda} \right) \left(\frac{p_1}{F_2} + \frac{p_3}{F_3} \right) \vec{x}^2 \right] \exp \left[i \frac{2\pi \vec{\omega} \vec{x}}{\lambda d_3} \right] d\vec{x}, \end{aligned} \quad (2)$$

где: i – мнимая единица; параметр p_4 входит в пределы интегрирования.

Таким образом, из-за ошибки юстировки системы выходной сигнал спектроанализатора отличается от сигнала, задаваемого Фурье-преобразованием.

Наряду с рассмотренными искажениями введем мелкоструктурные амплитудные и фазовые помехи выходного сигнала $B(\vec{x})$ и $\Psi(\vec{x})$ с конечными дисперсиями, обусловленные неоднородностями оптических элементов (объективов, кюветы, частичным нарушением пространственной когерентности гауссова пучка), а также оператор $\theta_{\vec{p}}(\vec{x})$ дисторсии и перепишем преобразование (2), выполняемое спектроанализатором над сигналом $S(\vec{x})$, в виде:

$$S_{\vec{p}}(\vec{\omega}) = \left(\frac{i}{\lambda d_3} \right) \exp \left[i \frac{\pi p_2 \vec{\omega}^2}{\lambda F_3} \right] \int_{\vec{x}} \theta_{\vec{p}}(\vec{x}) S(\vec{x}) \exp \left[i 2\pi \frac{\vec{\omega} \vec{x}}{\lambda d_3} \right] d\vec{x}. \quad (3)$$

Оценим полную мощность сигнала, регистрируемого в выходной плоскости

$$\begin{aligned} P_{\vec{p}} = \int_{\vec{\omega}} |S_{\vec{p}}(\vec{\omega})|^2 d\vec{\omega} \cong \\ \cong \frac{1}{\lambda d_3} \left(\int_{\vec{x}} |S(\vec{x})|^2 d\vec{x} \right) [1 + Var_B + Var_{\Psi} + Var_C + Var_A], \end{aligned} \quad (4)$$

где Var_C и Var_A – дисперсии помех настройки и аподизации системы соответственно.

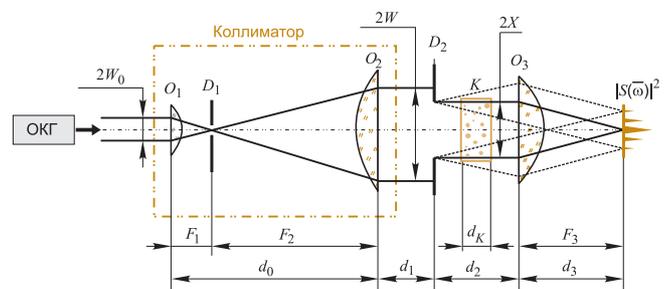


Рис. 1. Схема когерентного оптического спектроанализатора, где: ОКГ – оптический квантовый генератор; коллиматор – объективы O_1, O_2 с фокусными расстояниями F_1, F_2 соответственно; D_1, D_2 – диафрагмы; K – кювета (толщиной d_K) с исследуемой жидкой средой; O_3 – объектив с фокусным расстоянием F_3 ; $|S(\vec{\omega})|^2$ – Винеровский спектр мощности выходного сигнала спектроанализатора; $2W_0, 2W, 2X$ – апертуры; d_0, d_1, d_2, d_3 – расстояния между элементами оптической системы

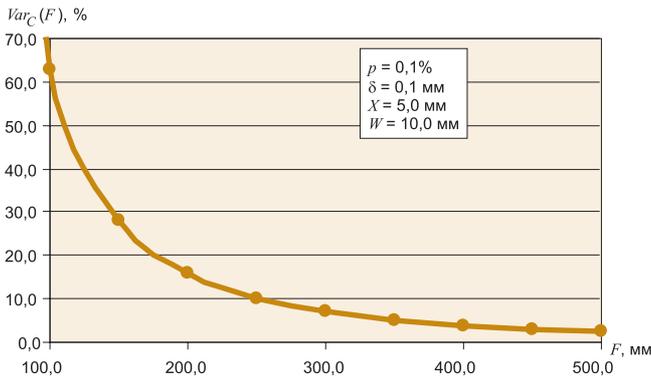


Рис. 2. Зависимость дисперсии Var_C помех настройки системы от фокусного расстояния F Фурье-объектива (при заданной точности юстировки δ)

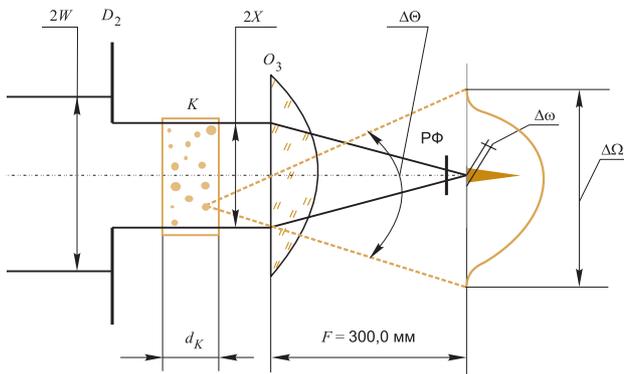


Рис. 3. Оптимальная (по габаритам и точности) схема когерентного оптического спектроанализатора, где: РФ – режекторный фильтр; $\Delta\theta$ – угловая апертура; $\Delta\omega$, $\Delta\Omega$ – ширина спектральных распределений

Таким образом, интегральная дисперсия помех спектроанализатора $Var_{CA} = Var_B + Var_{\psi} + Var_C + Var_A$ определяется как его амплитудными и фазовыми шумами, так и настройкой.

При $X = 5$ мм и $W = 10$ мм получим $p_4 = 0,5$. Поэтому дисперсия помех, обусловленная гауссовым размытием пучка, составляет $Var_A = 6,25\%$. Однако гауссово размытие пучка является полезным, так как эффективно подавляет боковые лепестки, возникающие из-за апертурных ограничений.

На рис. 2 изображен график зависимости дисперсии Var_C помех настройки оптической системы спектроанализатора от фокусного расстояния F Фурье-объектива ($F_2 = F_3 = F$) при $X = 5$ мм, $\lambda = 0,63$ мкм. Из графика видно, что дисперсия помех спектроанализатора, обусловленная неточностью его настройки ($\delta = \delta_1 = \delta_3 = 0,10$ мм), не превысит 8%, если фокусное расстояние F Фурье-объектива выбрать 300 мм.

Дисперсии помех спектроанализатора, определяемые его амплитудными и фазовыми шумами, обычно составляют величины $Var_B \cong 2\%$, $Var_{\psi} \cong 5\%$.

Следует заметить, что величины параметров d_1 и d_2 не влияют на точность работы спектроанализатора. Поэтому его можно применять и для конечных размеров кювет K ($d_K \neq 0$). В этом случае координата \vec{x} является трехмерной, а входной сигнал $S(\vec{x})$ спектроанализатора

описывает функцию пропускания трехмерной жидкой среды и соответствует ее микроскопической структуре.

В реальной жидкой среде ее светорассеивающие свойства меняются во времени t и определяются переменной частью диэлектрической проницаемости $\Delta\epsilon(\vec{x}, t)$, распределение которой по объему кюветы K и обуславливает пространственную структуру жидкой среды. При этом входной сигнал спектроанализатора описывается выражением $S(\vec{x}) = S_0 [1 + \Delta\epsilon(\vec{x}, t)]$, а выходной сигнал описывается с точностью до оцененных выше помех трехмерным Фурье-преобразованием [2]:

$$S(\vec{\omega}, t) \cong \frac{\pi}{\lambda^2 F} S_0 \iiint_V [1 + \Delta\epsilon(\vec{x}, t)] \exp(i\vec{\omega} \cdot \vec{x}) d^3 \vec{x}, \quad (5)$$

где S_0 – электрическая напряженность падающего на кювету пучка когерентного света.

Проведенные расчеты позволяют рекомендовать следующие оптимальные параметры спектроанализатора микроструктуры жидких сред при $\lambda = 0,63$ мкм и точности $\delta = 0,10$ мм настройки его коллиматора и фокальной плоскости: $F = 300$ мм; $X = 5$ мм; $W = 10$ мм. При этом интегральная дисперсия помех спектроанализатора $Var_{CA} = 20\%$. Оптическая схема спектроанализатора микроструктуры с рекомендованными параметрами (без учета ОКГ и коллиматора) приведена на рис. 3. Таким образом, в оптимальной по размерам и помехам схеме спектроанализатора, кювета K должна располагаться вплотную с Фурье-объективом O_3 .

Исходя из экспериментальных исследований, толщина кюветы d_K не должна превышать 10 мм. Угловая апертура $\Delta\theta$ детектирования выходного сигнала спектроанализатора не должна превышать 16° , что соответствует используемому параболическому приближению.

Будем считать, что в рассеивающем объеме V исследуемой жидкой среды находится N рассеивающих центров различных типов (размеров), а мгновенное положение в пространстве каждого n -го рассеивающего центра определяется вектором $\vec{x}_n(t)$, получим выходной сигнал спектроанализатора:

$$S(\vec{\omega}, t) = S_0 \left\{ \Phi_0(\vec{\omega}) + \sum_m \sum_n \Phi_m(\vec{\omega}) \exp[-i\vec{\omega} \cdot \vec{x}_{mn}(t)] \right\}, \quad (6)$$

где форм-фактор $\Phi_0(\vec{\omega})$ описывает зависимость степени рассеяния на входной апертуре $2X$ спектроанализатора от угла рассеяния и формы апертуры, а форм-фактор $\Phi_m(\vec{\omega})$ описывает зависимость степени рассеяния на частице с радиусом r_m от угла рассеяния и формы частицы; M – число типов центров рассеяния; N_m – число центров рассеяния m -го типа; $\vec{x}_{mn}(t)$ – различные пространственные положения рассеивающих частиц.

При малых апертурных углах рассеяния ($\Delta\theta \leq 16^\circ$) для рассеивателей сферической формы получим [2]:

$$\begin{aligned} \Phi_0(\omega) &\cong \frac{\pi}{\lambda^2 F} X^3 \delta \epsilon \left(1 - \frac{4\pi}{3} \frac{\omega^2 X^2}{(\lambda F)^2} \right), \\ \Phi_m(\omega) &\cong \frac{\pi}{\lambda^2 F} r_m^3 \delta \epsilon \left(1 - \frac{4\pi}{3} \frac{\omega^2 r_m^2}{(\lambda F)^2} \right), \end{aligned} \quad (7)$$

где: r_m – радиус инерции m -й частицы; $\delta\epsilon$ – действительное возмущение диэлектрической проницаемости, не зависящее от размеров микрочастицы и определяемое поляризуемостью среды, окружающей микрочастицу.

Спектральное распределение форм-фактора $\Phi_m(\omega)$ в выходной плоскости $\vec{\omega}$ спектроанализатора в зависимости от радиальной координаты ω показано на рис. 4.

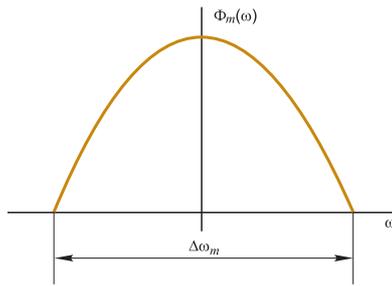


Рис. 4. Спектральное распределение форм-фактора $\Phi_m(\omega)$ частицы с радиусом r_m

Разрешение спектроанализатора (минимальный диаметр сфокусированного пучка света) в выходной плоскости можно оценить из (7) как $\delta\omega \cong \lambda(F/X)$. Так, для $\lambda = 0,63$ мкм, $F = 500$ мм и $X = 5$ мм получим разрешение $\delta\omega \cong 63$ мкм; для $F = 300$ мм и $X = 5$ мм – $\delta\omega \cong 37,8$ мкм.

Из (5) следует, что диаметр $\Delta\omega_m$ спектрального распределения, обусловленного рассеянием сферической частицы с радиусом r_m , определяется как $\Delta\omega_m \cong \lambda(F/r_m)$. На рис. 5 приведена зависимость $\Delta\omega_m$ для выбранной схемы спектроанализатора при $\lambda = 0,63$ мкм и $F = 300$ мкм. Из рис. 5 видно, что сферической частице с радиусом $r_m = 2,5$ мкм соответствует ширина спектрального распределения $\Delta\omega_m = 75,6$ мм. Соответствующий данной частице апертурный угол рассеяния составляет величину $\Delta\Theta = 14^\circ$, что соответствует малоугловому рассеянию. При этом максимальная выходная апертура спектроанализатора $\Delta\Omega = 40$ мм.

Если бы на входе спектроанализатора находился лишь один центр рассеяния, то легко вычислить его размеры, измеряя ширину Винеровского спектра $|S(\vec{\omega}, t)|^2$. В исследуемой жидкости присутствуют частицы различных размеров ($r_{min} \leq r_m \leq r_{max}$), случайно распределенные по анализируемому объему $V = \pi X^2 d_K$ кюветы K . Поэтому на выходе спектроанализатора будет наблюдаться колебание амплитуды Винеровского спектра мощности $I(\vec{\omega}, t) = |S(\vec{\omega}, t)|^2$ в силу когерентной суперпозиции спектров рассеяния, соответствующих частицам, находящимся в разных пространственных положениях $\vec{x}_{mn}(t)$.

Чтобы учесть степень этой когерентности и получить монотонную зависимость амплитуды Винеровского спектра мощности $|S(\vec{\omega}, t)|^2$ от радиальной координаты ω , производим его угловое усреднение и в результате получаем уравнения, связывающие интенсивность $I(\omega)$ радиальной компоненты рассеянного света с числом рассеивающих частиц [4]:

$$\begin{cases} I(\omega) = I_0 \sum_m^M \Phi_m^2(\omega) n_m^H, \\ I^{1/2}(\omega) = I_0^{1/2} \sum_m^M \Phi_m(\omega) n_m^K, \end{cases} \quad (8)$$

где I_0 – интенсивность света, падающего на кювету; n_m^H и n_m^K – число рассеивающих частиц, обуславливающих некогерентное и когерентное светорассеяние.

В действительности наблюдается промежуточный случай. Поэтому при отыскании действительного

числа n_m частиц получаются соответственно завышенные и заниженные значения, т.е. $n_m^K \leq n_m \leq n_m^H$.

Заметим, что исходным статистическим параметром анализируемой микроструктуры жидкой среды является функция распределения ее включений (частиц) по размерам. Эта функция определяется отношением числа n_m частиц m -го размера к полному числу N частиц в рассеивающем объеме кюветы.

Оценим некогерентную и когерентную функции распределения [4]:

$$f_m^H = \frac{n_m^H}{N^H} = \frac{m^4 \Delta I_m}{\sum_{m_{min}}^{m_{max}} m^4 \Delta I_m}; \quad f_m^K = \frac{n_m^K}{N^K} = \frac{m^2 \Delta I_m^{1/2}}{\sum_{m_{min}}^{m_{max}} m^2 \Delta I_m^{1/2}}, \quad (9)$$

где: $\Delta I_m = I_m - I_{m+1}$; $\Delta I_m^{1/2} = I_m^{1/2} - I_{m+1}^{1/2}$; I_m – отсчеты спектральной интенсивности в точках радиальных координат $\omega_m \cong \lambda(F/2X)m$, ($m = m_{min} \dots m_{max}$) с шагом $\Delta\omega_m \cong \lambda(F/2X) \cong 40,00$ мкм.

При этом каждому отсчету m соответствует поперечный диаметр частицы исследуемой микроструктуры d_m .

Минимальный и максимальный отсчеты в спектральной плоскости можно оценить через максимальный и минимальный диаметры ($d_{min} = 5$ мкм и $d_{max} = 50$ мкм) светорассеивающих частиц как $m_{min} = 2X/d_{max} = 200$, $m_{max} = 2X/d_{min} = 2000$. Однако при увеличении размеров рассеивающих частиц пространственная частота ω_m начинает изменяться незначительно. Поэтому наиболее реально контролировать размеры частиц с диаметрами 5...20 мкм с шагом 1 мкм, используя всего 16 отсчетов пространственных частот спектроанализатора.

Истинную функцию распределения частиц по размерам аппроксимируем выражением [4]:

$$\langle f_m \rangle = \frac{(f_m^H + f_m^K)}{2}, \quad \sum_{m=2}^{\infty} \langle f_m \rangle = 1 \quad (10)$$

с соответствующей ошибкой аппроксимации

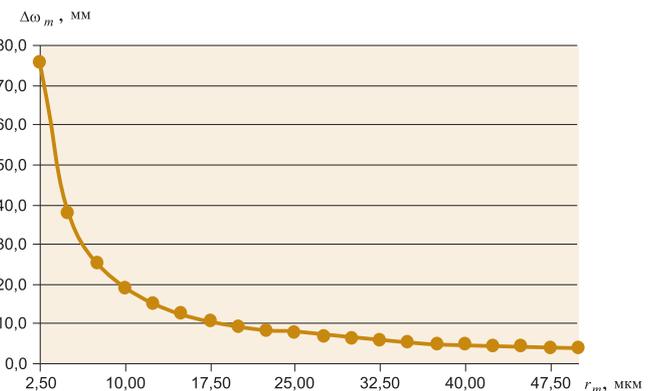


Рис. 5. Зависимость ширины спектрального распределения $\Delta\omega_m$ рассеивающей сферической частицы от ее радиуса инерции r_m

$$\Delta(f_m) = \frac{|f_m^H - f_m^K|}{2}. \quad (11)$$

На основании выражений (10, 11) возможно строить различные оценки средних значений физических величин, характеризующих дисперсную структуру исследуемых жидких сред, например, оценки средних величин: диаметров рассеивающих частиц, квадратов их диаметров (площадей), обратных диаметров; степень компактности группирования микрочастиц [4].

Метод статического когерентного светорассеяния является неразрушающим и может применяться в потоке жидких сред. Поэтому он перспективен для различных задач автоматизации контроля дисперсной структуры жидких технологических и пищевых сред [5]. Рассмотренная оптимальная схема спекроанализатора может составить основу специализированных датчиков дисперсной структуры технологи-

ческой воды, электролитов, питьевой воды, спирта, спиртосодержащих жидкостей, ликероводочной и винодельческой продукции.

Список литературы

1. Применение методов Фурье-оптики / Под ред. Г. Старка; Пер. с англ. под ред. И.Н. Компанца. М.: Радио и связь, 1988.
2. Спектроскопия оптического смешения и корреляция фотонов. / Под ред. Г. Камминса и Э.М. Пайка. М.: Мир, 1978.
3. *Маклаков В.В., Маклакова Н.Н., Камакин В.В., Краснов А.Е.* Устройство для контроля изменений фазовой структуры объекта RU 8472 U1. 1998.
4. *Краснов А.Е., Гугунишвили Г.Г.* Способ бесконтактного контроля поперечных размеров микрообъектов. Авторское свидетельство СССР № 823843. 1981.
5. *Рябчиков Б.Е.* Современные методы подготовки воды для промышленного и бытового использования. М.: ДеЛи принт, 2004.

Воробьева Алла Викторовна – канд. техн. наук, проф.,
Ефимова Татьяна Викторовна – ст. преподаватель,

Жиров Михаил Вениаминович – д-р техн. наук, проф. кафедры "Системы управления",
Краснов Андрей Евгеньевич – д-р физ.-мат. наук, проф., зав. кафедрой "Информационные технологии"
Московского государственного университета технологий и управления (МГУТУ).

Контактные телефоны: (495) 670-91-90, 670-66-00, 678-25-34. E-mail: kit2202@yandex.ru

24-26 октября 2006 г. состоится

6-я Международная конференция и выставка

"Системы проектирования, технологической подготовки производства
и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD/CAM/PDM-2006)"

Тематика конференции:

- Организация структур технических и программных средств проектирования и управления. Средства взаимодействия, структуры данных, международные стандарты.
- Компьютерная графика и CAD/CAM/PDM-системы в учебных процессах (программы обучения по дисциплинам, методические материалы, тестирование). Средства виртуальной реальности в промышленных системах.
- Интегрированные производственные системы и управление технологическими процессами. PDM-системы.
- Проектирование в машиностроении и строительстве.
- Проектирование в радиоэлектронике.

Место проведения: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН (Москва).

Адрес оргкомитета конференции CAD/CAM/PDM-2006:
117997, Россия, г. Москва, ул. Профсоюзная 65, ИПУ РАН.
Контактный телефон (495) 334-93-50, факс (495) 334-91-29.
E-mail: conf18@ipu.rssi.ru [Http://lab18.ipu.rssi.ru](http://lab18.ipu.rssi.ru)

IEI представила новый формат промышленных компьютеров

Серия MPC объединяет четыре модели мини-рабочих станций с диагоналями дисплея 10,4", 12,1", 15" и 17". Особенности серии – защищенная алюминиевая передняя панель, стальной корпус, функция управления экранными настройками с передней панели (OSD), поддержка аналогового VGA-интерфейса, возможность панельного и стоечного монтажа, усовершенствованный дизайн системы вентиляции и охлаждения. От стандартных промышленных рабочих станций устройства MPC отличает отсутствие клавиатуры и touch pad, а от панельных компьютеров – возможность установки дополнительных полноразмерных и полноформатных процессорных плат.

Новая серия имеет традиционно высокий для продукции IEI уровень защищенности от внешних воздействий. Все системы, предназначенные для применения в промышленности, требуют адаптации к жестким условиям производства. Степень защиты передней панели IP65 – это самый высокий уровень предохранения от пыли, влаги и масляных загрязнений в условиях наземного использования. Дополнительную

надежность системы обеспечивает корпус из стальной пластины толщиной 1 мм, уникальная конструкция которого разработана по принципу "минимум составных частей".

Разработчики IEI учли еще одну особенность промышленной эксплуатации техники – ее использование на открытом воздухе. В таких случаях часто недостаточно даже максимальной яркости стандартного монитора со значениями в 200 nits. Кроме того, отчетливость изображения на дисплее может снижаться за счет сенсорного экрана или защитных линз на передней панели. Чтобы потенциальные пользователи не испытывали подобных неудобств, мониторы серии имеют повышенную яркость 300 nits и время наработки на отказ более 50000 часов. Рабочие станции MPC опционально могут поставляться со встроенным стеклянным сенсорным экраном с интерфейсом RS-232.

Как и все продукты IEI, новые промышленные мини-рабочие станции соответствуют требованиям стандартов, в частности по ограничению содержания вредных веществ в электрическом и электронном оборудовании (RoHS).

Контактный телефон (812) 326-59-24. [Http://www.iei.ru](http://www.iei.ru)