



The lightguide ways and means of operative control of nonuniform mediums and oils are considered.

А. П. МАРКОВ, ГУ ВПО БРУ, Е. И. МАНУКОВИЧ, ИТМ НАН Беларуси

УДК 681.7.06:66.063.62

СВЕТОВОДНЫЕ СПОСОБЫ И СРЕДСТВА ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЯ НЕОДНОРОДНЫХ СРЕД И МАСЕЛ

Комплексное решение задач гарантированного обеспечения качества продукции требует системного учета всех факторов различной физико-технологической природы. И здесь важно своевременно выявить различные причинно-следственные связи в едином производственном процессе. При этом существенное влияние на конечную продукцию оказывает как непосредственно технологическая среда осуществления тех или иных операций, так и окружающая среда обитания [1, 2].

Для литейного производства, металлургии, а также машиностроительного комплекса, нефтехимической, бумажной и других отраслей важное значение имеет оперативный контроль состояния технических сред и масел, сопутствующих некоторым технологическим операциям. В большом разнообразии гидравлических, редукторных и циркуляционных масел широко представлены закалочные масляные смазочно-охлаждающие и водосмешиваемые смазочно-охлаждающие жидкости [3].

Экспресс-контроль непосредственно в производственном процессе позволяет получать необходимую информацию о работоспособности оборудования и характере выполнения технологических операций и оперативно корректировать и управлять (регулировать) параметрами используемых технических сред и масел. По их параметрам можно также проанализировать работоспособность отдельных блоков и узлов, технологического оборудования, производственный брак, отказы и потери. Состояния и свойства технических сред и масел (ТСМ) позволяют также выявить причины и механизмы появления и развития различных отклонений, ограничивающих нормированный ресурс безотказной работы оборудования.

Современная элементная база технологического контроля создает предпосылки для оперативного контроля состояния технических сред и масел неразрушающими методами. Оперативный

контроль в реальном времени (без нарушения хода технологического процесса) позволяет расширить диапазон применения контрольно-измерительных средств для задач непосредственного регулирования и управления процессами литейного производства [1].

В общем случае параметры ТСМ, с одной стороны, определяются технологией, а с другой — текущим характером работы технического средства (или операции). Технологией литейного производства задаются химико-технические требования к конкретным ТСМ с учетом особенностей их функционального предназначения. ТСМ с соответствующими нормативными параметрами рассматривается как однородная среда. Изменения неоднородности ТСМ определяются качественными показателями эксплуатационного состояния отдельного блока, модуля или всей технической системы.

Неоднородности в однородных ТСМ как источники первичной информации определяются видом, размерами, числом и формой, интенсивностью нарастания в рабочем объеме, скоростью и характером циркуляции, температурой и другими свойствами. Формирование первичной информации о ТСМ основывается на информационном (физическом) контрасте, определяемом различиями в физической природе однородной и неоднородной фаз, т.е. в соотношении сплошной (однородной) и дисперсной (твердой) фаз проявляется информативность ТСМ. Наиболее информативными параметрами ТСМ являются плотность, проводимость, интенсивность пропускания, поглощения или рассеяния энергии излучения, воздействующего на ТСМ.

При большом различии плотностей однородной и дисперсной фаз (в несколько раз) они подвержены влиянию многих других факторов, что усложняет моделирование источника информации и структурно-алгоритмическую реализа-

цию информационно-преобразовательного процесса от неоднородности до ее абстрактного информационно-физического отображения у потребителя. Аналогичные особенности имеют место и при использовании в качестве информативного параметра электро- и теплопроводности, диэлектрической и магнитной проницаемости.

Даже при большом разнообразии применяемых ТСМ реакция их на оптическое воздействие отображается ограниченным числом моделей взаимодействия неоднородностей с воздействующим излучением, а дифференцированное взаимодействие дисперсной среды с различными спектрально-энергетическими излучениями (ультразвуковые, радиационные, оптические) позволяет эффективно идентифицировать количественные и качественные показатели дисперсных сред.

Неоднородная среда под действием светового потока проявляет свои специфические для определенного спектрально-энергетического воздействия особенности. В параметрах информативного оптического излучения в большей мере проявляется динамика процесса взаимодействия излучения с ТСМ, что позволяет более эффективно строить информационно-физические преобразования технологического контроля.

Специфика литейного производства и ТСМ порождает соответствующее многообразие методов и средств и технологического контроля. Современная оптоэлектроника, импульсная и лазерная техника, волоконная оптика и микропроцессорная техника позволяют создавать узкоспециализированные мобильные информационно-измерительные средства, адаптированные к отдельным операциям, технологическим процессам и ТСМ. Посредством элементов волоконной оптики создается оптический канал для сосредоточенного и целенаправленного преобразовательного процесса уже на первичном уровне. Дальнейшие оптико-электронные преобразования и обработка первичной информации могут производиться уже дистанционно от объекта. Но если на уровне первичных преобразований предъявляются повышенные требования по чувствительности, оперативности и однозначности, то для оптико-электронных преобразований — соответствующие оптике быстроедействие и помехозащищенность.

ТСМ являются пассивными объектами контроля и всякая неоднородность проявляется в физических эффектах взаимодействия некоторого внешнего излучения с неоднородностями среды. Для дисперсной среды в виде ТСМ инородные включения как потенциальные возбудители (генераторы) первичной информации отличаются структурой, материалом, формой и размерами частиц, концентрацией и скоростью движения (выпадения в осадок), топологией распределения в контролируемом объеме и другими физико-техническими свойствами (параметрами).

Информационная сторона неоднородностей ТСМ определяется цветом, рельефом и габаритами, распределением и характером взаимодействия с излучением. При небольших концентрациях, когда неоднородности удалены на расстояния, превышающие их размеры, ТСМ моделируются как объекты с независимыми источниками информации. Однако относительное распределение информативного излучения и информативность неоднородностей зависят как от спектрально-энергетических параметров воздействующего излучения, так и от направления приема информативного излучения. На информативность элементарного объема ТСМ влияют не только свойства самих неоднородностей, но и их расположение, сосредоточение в объеме однородной среды, мощность и спектр излучения и т.д.

Спектрально-энергетические особенности информативного излучения с учетом физико-технической специфики неоднородностей позволяют более рационально строить информационно-преобразовательный процесс на зависимости оптического контраста формируемого источника информации при селективном воздействии излучениями различной длины волны. Отраженное и рассеянное излучение при взаимодействии с неоднородностями моделируется информативным излучением в виде совокупности разносветящихся точек, а их изображения — суммой изображений всех составляющих компонентов.

Информативное излучение в оптических методах контроля ТСМ формируется по соотношению потоков поглощенного неоднородностями и рассеянного ими в прямом и обратном направлении излучения и излучения источника. Долевое распределение составляющих информативного излучения зависит от соотношения спектральных составляющих (длин волн в стимулирующем излучении) рассеянного излучения, размеров неоднородностей и их концентрации в элементарном объеме. Рассеяние излучения неоднородностями, соизмеримыми с длиной волны излучения, незначительно превосходящими и превосходящими на несколько порядков, описывается существенно различными законами, что учитывается при моделировании информационно-преобразовательных процессов и исследовании технологических особенностей ТСМ.

Информативное излучение, формируемое при взаимодействии излучения длиной волны λ , рассеянное под углом β к первоначальному направлению распространения частицами, сечение которых значительно меньше длины волны, определяется с достаточной для инженерных расчетов точностью по закону Рэлея:

$$\Phi_u = \Phi_0 \left(\frac{n_1^2 - n_2^2}{n_1^2 + n_2^2} \right) \frac{NV^2}{\lambda^4 l^2} (1 + \cos^2 \beta),$$

где Φ_0 — поток стимулирующего излучения; n_1, n_2 — соответственно коэффициенты преломления неоднородной и однородной фаз среды; N — количество неоднородностей в единичном объеме; V — объем отдельной неоднородности; l — расстояние до приемника; β — угол между падающим и рассеянным излучениями.

Для ТСМ со стабильными величинами n_1, n_2, l и β упрощенно информативное излучение Φ_u описывается выражением:

$$\Phi_u = \Phi_0 K N V^2 / \lambda^4,$$

где K — коэффициент пропорциональности.

Следует отметить, что для неоднородностей малых размеров информативное излучение, учитывающее характер ослабления (поглощения) ТСМ, пропорционально объему неоднородностей, а не квадрату объема. В этом случае ослабление излучения неоднородностями (иными веществами) малых размеров значительно превышает рассеяние.

Информативное излучение ТСМ, неоднородности которых соизмеримы с длиной волны рассеянного излучения, определяется некоторым коэффициентом рассеяния σ излучения неоднородностями радиуса r в виде выражения [4]:

$$\sigma(\lambda, r) = K \pi r^2,$$

где K — коэффициент, комплексно учитывающий соотношение радиуса неоднородностей, длины волны излучения и диэлектрической проницаемости материала неоднородностей.

В этом случае

$$\Phi_u = \Phi_0 [1 - \exp(-3Cl\sigma/4r)],$$

где C — объемная концентрация неоднородностей; l — длина пути потока излучения в ТСМ.

Для ТСМ с разнообразными неоднородностями поток информативного излучения описывается выражением

$$\Phi_u = \Phi_0 \left[1 - \exp \left(- \frac{3}{4} \sum_{i=1}^m \frac{C_i}{r_i} l \sigma(\lambda, r_i) \right) \right],$$

где m — индекс различных типов неоднородностей; C_i — объемная концентрация неоднородностей i -го типоразмера; r_i — радиус неоднородностей i -го типоразмера; $\sigma(\lambda, r_i)$ — коэффициент рассеяния излучения λ , неоднородностями радиуса r_i .

Характерно, что для ТСМ с размерами неоднородностей, превышающих λ , рассеяние излучения в направлении прохождения светового потока становится преобладающим над рассеянием излучений по другим направлениям. Однако интенсивность излучения, рассеиваемого неоднородностями крупных размеров в прямом направлении, на 2–3 порядка выше интенсивности излучения, рассеиваемого в боковом направлении.

Тактико-технические преимущества оптических методов и средств создают реальную перспективу практического применения в промышленности и научных исследованиях оптико-электронных концентраторов [5]. Методические отличия таких концентраторов определяются принципами формирования информативного излучения. Если в турбидиметрах первичная информация формируется прошедшим через неоднородную среду световым потоком, то в нефелометрах — рассеянным неоднородностями световым потоком.

Практически установить физико-техническую границу применимости турбидиметрического и нефелометрического методов оптического контроля неоднородных сред в виду многофакторных зависимостей информативных излучений весьма сложно, хотя современная оптико-электронная элементная база со световодным преобразователем и микропроцессорной обработкой позволяет эффективно реализовывать комбинированные концентраторы. В таких структурно-алгоритмических реализациях более рационально используются принципиальные преимущества и системно учитываются ограничения нефелометрического и турбидиметрического методов измерения.

В классификационных признаках оптико-электронных турбидиметров и нефелометров преобладающими являются наличие каналов (одно- и многоканальные), измерительных цепей (одно- и многоплечие), виды модуляции и защиты, способы коррекции и компенсации и др. Сложности создания унифицированных концентраторов неоднородных сред побуждают к разработке специализированных и узкодиапазонных средств применительно к конкретным условиям и задачам технологического контроля отдельных видов объектов и отраслей.

Более совершенными являются оптико-электронные концентраторы со световодным каналированием и направлением светового потока источника (света) и информативного излучения неоднородной среды. В общем случае информативное излучение Φ_u зависит как от информативных параметров (концентрации C и геометрии S (форма, сечение)), так и от различного рода возмущений типа: ξ_1 — нестабильность светового потока и источника электропитания; ξ_2 — загрязнения оптических поверхностей технической средой; ξ_3 — колебания температуры контролируемой и окружающей сред; ξ_4 — непостоянство коэффициента ослабления из-за изменяющейся концентрации дисперсной фазы и толщины просвечиваемого слоя; ξ_5 — изменения коэффициента преломления однородной фазы; ξ_6 — различного рода засветки и электромагнитные поля силовых цепей, т.е. информативное излучение в обобщенном виде представляет собой функцию технологических переменных (C, S) и разнородных дестабилизирующих воздействий $\Sigma \xi_j$. Тогда в

общем виде выражение для Φ_u можно представить в виде:

$$\Phi_u = F(C, S, \zeta_1, \zeta_2, \zeta_3, \dots, \zeta_n),$$

где F – оператор.

С учетом такой многофакторной зависимости формирование, локализация и дистанцирование информативного излучения представляют большие информационно-метрологические сложности.

Способами стабилизации, модуляции и введением обратных отрицательных связей добиваются значительного улучшения качества информационно-преобразовательных операций технологического контроля. Значительное улучшение качественных характеристик обеспечивает комбинированная схмотехника световодных и оптико-электронных преобразований. Путем кусочно-линейной аппроксимации (функциональной линеаризации) и программно-логарифмических преобразований градуировочная функция представляется однозначной зависимостью между концентрацией неоднородностей C в технической среде и информативным излучением Φ_u , т. е. $\Phi_u \in C$. В таком случае за счет более сложной схмотехники физико-оптических и оптико-электронных преобразований добиваются значительного улучшения эксплуатационных характеристик комбинированных концентраторов при некотором снижении массогабаритных параметров. Такое конструктивно-функциональное преимущество особенно привлекательно при создании мобильных средств оперативного технологического контроля ТСМ [5].

Более простыми в схемной реализации и конструктивном исполнении являются способы, построенные на одноканальных схемах, когда излучение одного источника с выбранными спектрально-энергетическими параметрами просвечивает неоднородную среду, а информативное излучение воспринимается непосредственно фотоприемником. Результаты обработки его выходного сигнала отображаются на индикаторе или определяются по градуировочным кривым в принятых единицах концентрации неоднородностей. В таких структурах на результатах технологического контроля сказываются колебания источника питания и осветителя, направленность и яркость излучателя, дрейф нуля и погрешности от внешних засветок и другие факторы.

Схемная реализация способа компенсации влияния неконтролируемых воздействий (в том числе помех) строится на двухканальном первичном преобразовании информативного излучения. Излучение источника (преимущественно импульсного) по жгуту светопроводящих волокон (в дальнейшем осветительному световоду) ориентированно воздействует на неоднородную среду в некотором элементарном объеме между выходным торцом осветительного и входными торцами приемных световодов. Схмотехнически приемные

световоды сформированы из оптических моноволокон в жгут информационный и жгут опорный. В таком исполнении светоприемник представлен информационным и опорным световодами, воспринимающими и каналирующими информативное излучение и излучение от разнородных взаимодействий светового потока с неоднородностями как помехами. За счет оптических избыточных и электронных компенсирующих обратных связей создаются более совершенные методы и высокостабильные средства контроля неоднородных сред и масел непосредственно в технологическом процессе [5].

В мобильных средствах оперативного контроля на основе двухканальных схем создаются многодиапазонные концентраторы с отдельными световодными каналами (рис. 1), по которым информативное излучение $\Phi_{u1} - \Phi_{uk}$ одновременно воспринимается модулем 1 фотоэлектрических преобразователей. Наряду с быстродействием параллельный съем первичной информации обеспечивает возможности спектрального разделения информативных излучений, а блочно-модульное исполнение позволяет создавать легко перестраиваемые структуры технических средств, в том числе и с многодиапазонными световодными зондами. Посредством коммутатора 2 модуль 1 функционально связан с модулем 3 оптико-электронной обработки (анализа, документирования, хранения). В типовой схмотехнике модули 1 и 3 дополняются модулятором, что позволяет комбинировать способы параллельных и последовательных преобразований, обеспечивающих необходимые динамические, информационные и/или метрологические характеристики с учетом

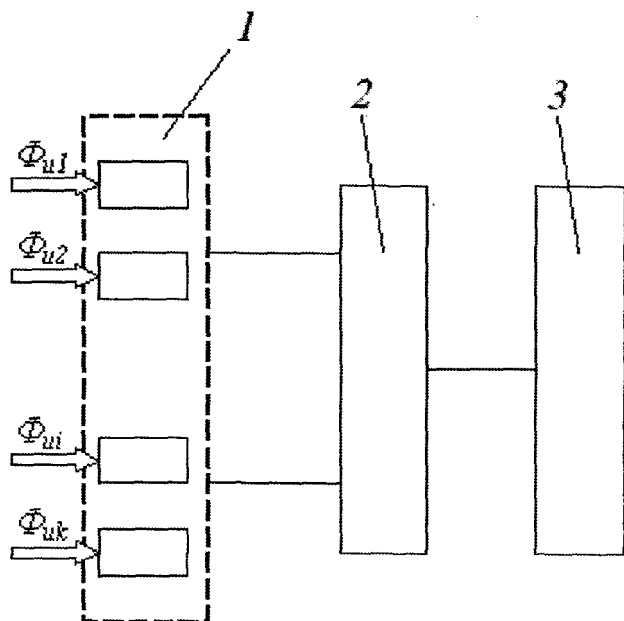


Рис. 1. Структура функционально-модульных реализаций технологического контроля: 1 – модуль фотоэлектрических преобразований; 2 – коммутатор; 3 – модуль оптико-электронной обработки

материально-технических и финансово-экономических ограничений.

В общем случае световодная фотометрия технологического контроля ТСМ, включая нефелометрический и турбидиметрический методы контроля прозрачности и концентрации неоднородностей, основывается на прямых и косвенных спектрально-энергетических преобразованиях оптических излучений различной длины волны. Канальность схем определяется совокупностью светопроводящих моноволокон, объединенных в гибкие или жесткие жгуты с пространственным разделением их как со стороны источника излучения, так и с приемной стороны. При этом каждое моноволокно образует оптически каналированный многоэлементный излучатель или пространственно разделенный многоэлементный светоприемник. Световод излучательный, объединяющий оптические моноволокна со стороны источника излучения, и световод информационный, использующий оптические моноволокна как физическую среду для преобразования и передачи оптического излучения, определенным образом встраиваются в параметрическую цепь информационных преобразований.

В оптической схеме прямого преобразования в параметрическую цепь между источником, ТСМ и приемником излучения встраиваются осветительный и информационные световоды. При этом за счет некоторых схемных и конструктивных манипуляций с моноволоконными формируются различные по исполнению осветители направленного воздействия на ТСМ. Такая особенность позволяет более рационально реализовывать спектрально-энергетические преимущества тех или иных излучений в информационно-преобразовательных процессах.

В отличие от одноканальной схемы прямых преобразований, когда излучение источника направленно передается по осветительному световоду для селективного воздействия на ТСМ с последующим приемом информативного излучения по световоду фотоприемником [5], в многоканальных схемах могут строиться преобразования по методу сравнения. И здесь схематические возможности большого многообразия элементарных световых потоков в расщепленном и разведенном излучении источника проявляются в комбинациях исполнения оптических систем в технологическом контроле ТСМ.

По существу каждый световод (информационный и осветительный) представляет собой многоэлементную оптическую систему из множества оптических моноволокон. Тогда, комбинируя их расположение в осветительном и информационном световодах, можно расщеплять излучение источника и строить пространственно-ориентированные осветители (излучатели), т.е. используя эффект симметризации лучей в элементарном

моноволокне и световоде, можно создавать пространственно разделенные излучатели с различной геометрической формой и со спектрально-энергетическим управлением (регулированием). Аналогичные манипуляции можно проводить и со световодами, воспринимающими информативное излучение.

Прямое преобразование световодами, как более простое и употребительное, предполагает оптический перенос излучения с входных торцов элементарных моноволокон на соответствующие выходные торцы. При этом за счет гибких моноволокон как оптических линий связи транспортируется по защищенному каналу воспринятое спектрально-энергетическое излучение, а все преобразовательные операции в основном реализуются на входных и выходных торцах световодов и фотоприемников.

В схемах с пространственным преобразованием излучательные жгуты 3 моноволокон объединяются в единый осветительный световод в виде коллектора-распределителя 2, оптически связанного с источником излучения 1. Информативное излучение ТСМ 4 воспринимается жгутами информационными 5 с последующим объединением в коллектор-собиратель 6, состыкованный с модулем оптико-электронной обработки 7. В такой структуре световодные коллекторы представляются конструктивно и функционально обособленными оптическими модулями с соответствующим спектрально-энергетическим согласованием. Для регулировки (настройки, корректировки) положение выходных торцов осветителей 3 может изменяться относительно соответствующих входных торцов информационных жгутов 5, т.е. за счет гибких жгутов расстояние x_i по каждому каналу пространственного преобразования может изменяться (рис. 2).

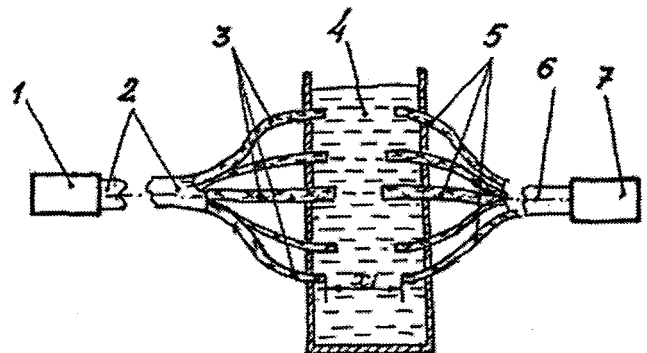


Рис. 2. Структура пространственно разделенных преобразований: 1 – источник излучения; 2 – коллектор-распределитель; 3 – жгуты излучательные; 4 – среда контролируемая; 5 – жгуты информационные; 6 – коллектор-собиратель; 7 – модуль оптико-электронной обработки

Структурно информационно-физическая модель параметрической цепи оптического канала (рис. 3) представляет собой системное объединение источника и приемника излучений с осветительным и информационным световодами, в раз-

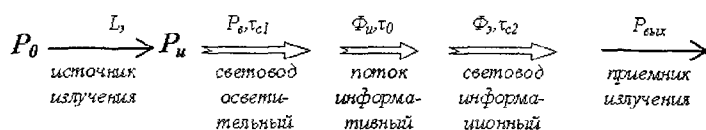


Рис. 3. Структура параметрической цепи оптического контроля

рыв которых встраивается контролируемая ТСМ. Мощность $P_{\text{вых}}$ на приемнике излучения определяется по выражению:

$$P_{\text{вых}} = P_{\text{в}} \tau_{\text{с1}} \tau_0 \tau_{\text{с2}} k,$$

где $P_{\text{в}} = P_{\text{и}} (1 - (\cos \varphi^2))$ — мощность излучения, вводимого в осветительный световод с потерями $\tau_{\text{с1}}$; τ_0 , $\tau_{\text{с2}}$ — коэффициенты светопропускания ТСМ и информационного световода; k — коэффициент чувствительности фотоприемника.

Полная мощность $P_{\text{в}}$ излучательного световода определяется следующим образом:

$$P_{\text{в}} = L_3 2\pi r_c^2$$

или

$$P_{\text{в}} = 2\pi S_3 L_3,$$

где L_3 — энергетическая яркость источника излучения; r_c — радиус световода осветительного; πr_c^2 — площадь входного торца осветительного световода.

В свою очередь эффективная площадь торцов световодов

$$S_3 = \pi r_m^2 n \gamma,$$

где r_m — радиус сердцевин моноволокон; n — число моноволокон в жгуте (световоде) по торцу; γ — коэффициент заполнения торца поперечными сечениями моноволокон; учитывает способ укладки моноволокон по торцам, качество полировки их поверхности, неплотности и сколы, коэффициент преломления среды на входе (для воздуха $n \approx 1$) и другие факторы.

В схемах сравнения более рационально используются схематехнические и конструктивные преимущества световодных каналов (рис. 4). Фактически измерение коэффициента ослабления неоднородной средой (ТСМ) сводится к двукратному измерению мощности излучения с калибровочным (эталонным) ослабителем $P_{\text{в2}}$ и неоднородной средой ТСМ $P_{\text{в1}}$. Значения выходной мощности в этих случаях находим из выражений

$$P_{\text{в1}} = P_{\text{в}} \tau_{1\text{в}} \tau_0 \tau_{2\text{в}} k, \quad P_{\text{в2}} = P_{\text{в}} \tau_{1\text{в}} \tau_3 \tau_{2\text{в}} k,$$

где k — коэффициент спектрально-энергетической чувствительности; τ_0 — коэффициент светопропускания контролируемого образца ТСМ; τ_3 — коэффициент светопропускания эталона.

В таких схемах информативность преобразовательного процесса в основном определяется соотношением $P_{\text{в1}}$ и $P_{\text{в2}}$ или приближенно соотношением τ_0 и τ_3 .

В двухканальных схемах компенсационных преобразований в качестве эталона используется регулируемый ослабитель и излучение источника взаимодействует как с ослабителем, так и с ТСМ (рис. 4). В двухлучевом преобразователе [6] из-за погрешностей образцового ослабителя не обеспечивается полная компенсация мощностей, что ограничивает метрологические возможности схем концентратометров и технологического контроля. При некотором повышении достоверности технология калибровки средств с погружением и извлечением образцового ослабителя сказывается на производительности контроля, особенно при использовании таких средств в оперативном режиме.

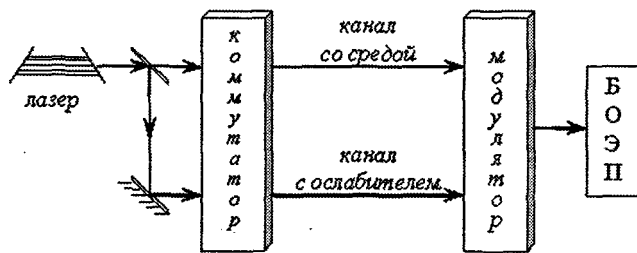


Рис. 4. Структура компенсационных преобразований в технологическом контроле ТСМ

Дальнейшее усовершенствование перспективных способов и схем компенсационных преобразований на элементной базе современной оптоэлектроники, волоконной оптики и микропроцессорной техники позволяет создавать мобильные и высокопроизводительные спектрофотометрические средства технологического контроля ТСМ, в том числе и в реальном времени.

Литература

1. Марукович Е.И. и др. Визуально-оптическая дефектоскопия и размерный контроль в литейном производстве. Мн.: Белорусская наука, 2007.
2. Белый О.А. Загрязнения окружающей среды и оценка экологической безопасности Беларуси // Литье и металлургия. 2004. №4. С. 121–123.
3. Масляные и водосмешиваемые смазочно-охлаждающие жидкости // Литье и металлургия 2007. №2(42). Рекламный лист "Волгохимнефть".
4. Ван де Хюлст Г. Рассеяние света малыми частицами. М.: ИЛ., 1961.
5. Марков А.П. Анализ оптико-электронных приборов технологического контроля жидких сред // Вестн. МГТУ. 2006. №2. С. 120–127.
6. А.с. 855446 СССР: Устройство для определения концентрации взвесей в жидкости / А.А. Афанасьев, В.Н. Усик, И.В. Мисник и др.