

**ОСОБЕННОСТИ ВАРИАНТОВ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ МАТЕРИАЛЬНЫХ ПОТОКОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА**

Е.А. Гребенюк, Э.Л. Ицкович (ИПУ РАН)

Рассматриваются качественные показатели материальных потоков технологического производства и современные варианты их контроля. Сопоставляются достоинства и недостатки существующих способов контроля качественных показателей: дискретными лабораторными анализами, поточными анализаторами, косвенными оценками (виртуальными анализаторами). Указываются пути совершенствования рассматриваемых способов контроля.

Ключевые слова: качественные показатели, материальные потоки, технологическое производство, лабораторные анализы, поточные анализаторы, косвенные оценки, виртуальные анализаторы.

Введение

Важнейшим классом измеряемых величин для производства в целом и для каждого технологического агрегата в отдельности являются качественные показатели всех поступающих, промежуточных и выпускаемых материальных потоков: сырьевых компонентов, производимых агрегатами полуфабрикатов, потоков смешения (компаундирования) ряда полуфабрикатов, разных видов готовой продукции. Знание точных текущих значений качественных показателей материальных потоков производства позволяет точнее стабилизировать режимы работы технологических агрегатов, снизить неоплачиваемое покупателем повышение качества выпускаемого продукта, уменьшить брак продукции, сэкономить энергетические затраты производства. Кроме того, любое предприятие заинтересовано в поддержании нормального состояния окружающей среды, к которой относятся воздух, вода и почва на самом предприятии и в его окрестности, что вызывает необходимость их текущего качественного анализа.

Определение текущих значений многих качественных показателей материальных потоков является достаточно сложным и далеко не полностью обеспеченным автоматическими, производственными измерителями. Повсеместно используемым способом оценки значений основных качественных показателей являются дискретные во времени анализы отбираемых проб материальных потоков, проведенные на лабораторных анализаторах. Существенно реже основные качественные показатели измеряются непосредственно включаемыми в материальный поток поточными анализаторами. В последние годы распространяется способ косвенных оценок значений качественных показателей (виртуальных анализаторов качественных показателей), большей частью базирующийся на измерении физических величин, определяющих режим работы агрегата и статистически взаимосвязанных с качественными показателями выпускаемых им продуктов.

Рассмотрим особенности существующих методов контроля качественных показателей материальных потоков технологического производства, сопоставим достоинства и недостатки различных методов, определим перспективные способы развития текущего контроля качественных показателей.

Состав качественных показателей материальных потоков

Предварительно следует уточнить основные используемые ниже термины:

— под *материальными потоками* технологического производства понимаются потоки поступающих на производство сырьевых компонентов, различных полуфабрикатов на входах/выходах технологических агрегатов и хранилищ, компонентов и результатов смешения полуфабрикатов, отгружаемых заказчиком готовых продуктов;

— под *качественными показателями* материальных потоков понимаются их количественные характеристики различных свойств и имеющийся состав.

Типовыми, широко распространенными в различных технологических производствах *свойствами материальных потоков* являются, например, следующие показатели:

— *плотность* — отношение единицы массы материального потока к занимаемому им объему;

— *вязкость* — внутреннее трение, свойство текучих потоков (жидкостей и газов) оказывать сопротивление перемещению одной их части относительно другой;

— *кислотность* — водородный показатель pH, характеризующий концентрацию ионов водорода в материальном потоке;

— *влажность* — показатель содержания воды в материальном потоке.

— *электропроводность* — свойство материального потока под воздействием электрического поля вырабатывать электрический ток, значение которого определяет концентрацию определенного вещества в потоке.

Кроме отмеченных свойств материальных потоков, широко распространенных в различных технологиче-

ских производствах, в каждой отдельной отрасли промышленности существуют специфические качественные показатели материальных потоков. Так, например, для нефтеперерабатывающих предприятий важными свойствами материальных потоков являются:

— *октановое число* — показатель, характеризующий детонационную стойкость материального потока (его способность противостоять самовоспламенению при сжатии);

— *давление насыщенных паров* материального потока;

— *температура вспышки летучего конденсированного материального потока* (наименьшая температура, при которой пары над поверхностью этого потока способны вспыхивать в воздухе под воздействием источника зажигания).

Под *составом материального потока* независимо от характера технологического производства понимается полный или частичный анализ его составляющих:

— *компонентный состав* — содержание и доля в материальном потоке всех имеющихся в нем химических элементов;

— *фракционный состав* — подразделение состава материального потока на определенные фракции, имеющие близкие свойства (например, группы углеводородов в нефти, выкипающие в определенном узком интервале температур) и доля отдельных фракций в потоке;

— *доля отдельных веществ* — наличие и количество в материальном потоке определенных веществ или элементов (например, влаги в нефти, серы в железной руде).

Анализаторы качественных показателей материальных потоков

Существующие анализаторы качественных показателей материальных потоков (см., например, [1, 2]) можно подразделить на два класса:

1) различные варианты анализаторов отдельных свойств материального потока;

2) различные варианты анализаторов состава материального потока и содержания в нем отдельных компонентов.

Анализаторы отдельных свойств материального потока

Из множества видов широко распространенных анализаторов свойств газов, жидкостей, твердых (кусковых и сыпучих) материалов ниже выделен в качестве примера ряд распространенных наименований анализаторов.

Плотномеры, измеряющие плотность анализируемого жидкого потока. Распространены плотномеры: буйковые (помещающие буюк в жидкость и замеряющие выталкивающее его усилие); весовые (взвешивающие постоянный объем жидкости); гидростатические (измеряющие давление столба жидкости постоянной высоты); не контактирующие с измеряемой средой радиоизотопные (фиксирующие ослабление радиоактивного излучения с повышением плотности жидкости).

Вискозиметры, измеряющие вязкость анализируемой жидкой среды. Распространены вискозиметры: вибрационные (измеряющие изменения параметров

вынужденных колебаний зонда при его погружении в жидкость), ротационные (замеряющие момент вращения тел, разделенных жидкостью, одно из которых вращается с постоянной скоростью, а другое неподвижно).

Измерители кислотности (РН), то есть активности ионов водорода в жидкой среде (ее кислотности) и подразделяющие анализируемые среды на щелочную ($\text{РН} > 7$), нейтральную ($\text{РН} = 7$), кислотную ($\text{РН} < 7$). Они измеряют величину ЭДС электродной системы, которая пропорциональна активности ионов водорода в растворе — РН.

Влагомеры, измеряющие содержание воды в твердых и газовых средах. Распространены влагомеры: весовые (измеряющие вес образца до и после его сушки), оптические (замеряющие зависящую от степени насыщения образца водой оптическую плотность).

Кондуктометры, измеряющие разными методами с применением постоянного или переменного тока (низкой и высокой частоты) электропроводность различных потоков вида растворов электролитов, что определяет концентрации анализируемых растворов.

Существуют специальные датчики свойств материальных потоков, имеющихся в каждой отдельной отрасли промышленности, и измеряющие специфические качественные показатели материальных потоков. Так, например, для нефтеперерабатывающих предприятий ниже отмечены некоторые специальные датчики.

Октанометры (анализаторы качества топлива), определяющие октановое число — критерий сопротивления топлива детонации. Они измеряют диэлектрическую проницаемость образца топлива и по имеющейся калибровочной зависимости на базе аттестованных образцов данного типа топлива переводят ее в октановое число.

Анализаторы давления насыщенных паров, измеряющие давление паров пробы материального потока, которая всасывается поршнем в герметичную, термостатированную камеру. В зависимости от положения поршня в камере может создаваться различное соотношение объемов паровой и жидкой фаз. В измерительной камере создается и поддерживается с помощью термостата заданная температура, значение которой регулируется с помощью термоэлектрического модуля и контролируется по показаниям датчика температуры. Давление измеряется встроенным в поршень пьезорезистивным датчиком. После установления равновесия температуры и давления производится измерение давления насыщенных паров исследуемого потока;

Измерители температуры вспышки, которые работают путем измерения минимальной температуры стенки реакционного сосуда, в котором образуется вспышка.

Анализаторы состава материального потока

Ниже отмечены основные, используемые в технологических производствах методы анализа состава материального потока и базирующиеся на них виды анализаторов.

Спектральный или спектрометрический анализ — совокупность методов качественного и количественного определения состава потока, которые позволяют опре-

делять элементарный и молекулярный состав вещества. Он основан на изучении спектров взаимодействия материи с излучением, включая спектры электромагнитного излучения, акустических волн, распределения по массам и энергиям элементарных частиц и др. В зависимости от типов спектров выделяют ряд методов спектрального анализа: *атомный, молекулярный, эмиссионный и абсорбционный* методы.

Распространены, работающие на этих методах:

— ИК (инфракрасные) жидкостные спектрометры на основе преобразования Фурье, определяющие концентрации отдельных составляющих компонентов и качественных показателей в анализируемом, жидкостном образце потока;

— NIR спектрометры (ближнего инфракрасного диапазона), подразделяющиеся на приборы, использующие Фурье-преобразование (FT-NIR) и на дисперсионные приборы, анализирующие состав и химико-физические параметры пробы материального потока.

Масс-спектрометрический анализ — метод измерения отношения массы заряженных частиц к их заряду. Он сортирует частицы по их массам, позволяет определять изотопный состав потока и дает необходимую информацию для определения молекулярной массы, элементного состава и структуры молекул пробы материального потока. Этот метод используют масс-спектрометры, производящие химический анализ анализируемых проб материального потока, определяющие их элементный и изотопный состав.

Хроматографический анализ — метод разделения и анализа газовых и жидкостных потоков и изучения их физико-химических свойств. Он основан на различиях в скоростях перемещения в потоке несмешивающихся и движущихся относительно друг друга фаз и используется для анализа смесей и изучения их физико-химических свойств. На данном методе основаны хроматографы, применяемые для определения концентрации отдельных компонентов, полного химического состава и физических свойств анализируемой пробы, которая вводится в него из производственного, материального потока. Они делятся на две большие группы — газовые и жидкостные.

Фотометрический анализ — совокупность методов химического количественного анализа, основанных на зависимости между концентрацией вещества в жидком или газовом потоке и поглощением излучения. Метод дает возможность определить концентрацию вещества в потоке в тех случаях, когда вещество имеет собственную окраску либо приобретает окраску путем воздействия на него соответствующего химического реагента. Такой анализ проводят инфракрасные (ИК) и ультрафиолетовые (УФ) фотометры, определяющие спектр анализируемых образцов, что позволяет установить их химический состав и концентрацию анализируемого вещества.

Спектрофотометрический анализ — физико-химический метод исследования потоков, основанный на изучении спектров поглощения в ультрафиолетовой

(200...400 нм), видимой (400...760 нм) и инфракрасной (>760 нм) областях спектра. Основная зависимость, изучаемая в спектрофотометрии, — зависимость интенсивности поглощения падающего света от длины волны. Спектрофотометрия широко применяется при изучении строения и состава различных соединений для качественного и количественного определения веществ.

Виды спектрофотометров:

— ИК (эмиссионные, абсорбционные и флуоресцентные) спектрофотометры, обеспечивающие точное определение качественного и количественного состава газообразных, жидких и твердых веществ, позволяющие изучать поверхностные слои материалов, проводить локальный и послойный анализ;

— БИК спектрофотометры, работающие в ближней инфракрасной области (БИК) и определяющие химический состав растворов и концентрации различных элементов в анализируемых пробах материального потока.

Ядерный магнитный резонанс (ЯМР) — резонансное поглощение или излучение электромагнитной энергии веществом, обусловленное переориентацией магнитных моментов ядер. Анализаторы ядерного магнитного резонанса определяют молекулярный состав пробы материального потока.

Рефрактометрический анализ — измерение показателя преломления жидкого анализируемого потока. Он применяется для идентификации химических соединений, количественного и структурного анализа, определения физико-химических параметров веществ. Используемые рефрактометры измеряют показатель преломления света в пробе материального потока и пересчитывают его в концентрацию растворителя в растворах, в состав химических соединений анализируемой пробы, в ее количественный и структурный анализ, в отдельные физико-химические параметры пробы.

Особенности лабораторных анализов качественных показателей

В настоящее время анализ необходимых качественных свойств и состава материальных потоков, а также содержания в них отдельных компонентов проводится в лабораториях предприятия на лабораторных анализаторах, основные виды которых отмечены выше. Дискретные во времени лабораторные анализы качества производственных материальных потоков на большинстве предприятий являются единственным источником оценки текущих (мгновенных) значений показателей качества сырьевых компонентов, полуфабрикатов и конечных продуктов, хотя выполняются лабораторные анализы через достаточно значительные интервалы времени. Периодичность лабораторных анализов материальных потоков обычно варьируется от 4 часов (качества наиболее важных материальных потоков) до 16...24 часов (качества рядовых материальных потоков). Технологи цехов и операторы технологических агрегатов, которые должны корректировать технологический режим агрегатов по текущим значениям соответствующих качественных показателей, считают, что

значение каждого показателя в любой момент времени между соседними его лабораторными анализами примерно равно последнему по времени результату анализа, выданного лабораторией.

В последние годы большинство предприятий технологических отраслей оснастили свои лаборатории автоматизированными системами — ЛИМС.

Основные цели, достигаемые внедрением ЛИМС на предприятиях:

- снижение неточностей измерений, обусловленных задержкой проведения анализов, несоблюдением нормативов и методик проведения анализов, погрешностями расчетов результатов анализов в результате их ручного выполнения;

- ускорение времени обработки и анализа получаемых проб за счет автоматизации;

- увеличение пропускной способности лаборатории за счет автоматизированного составления рационального графика загрузки лабораторных анализаторов;

- сокращение функций лабораторного персонала за счет передачи части рутинной работы по проведению анализов системе автоматизации.

Сами анализы качественных показателей сырьевых компонентов, полуфабрикатов, готовой продукции, проводимые на современных лабораторных анализаторах и результаты которых обрабатываются ЛИМС, имеют обычно достаточно высокую точность. Несомненными достоинствами лабораторных анализов являются:

- годами отлаженное проведение лабораторных анализов на всех предприятиях технологических отраслей;

- высокая точность лабораторных анализаторов и их валидация (проверка) с помощью контрольных карт (карт Шухарта) (ГОСТ Р 50779.42-99. Статистические методы. Контрольные карты Шухарта. Переиздан 2004 г.).

Однако рассматривая всю процедуру последовательных этапов выполнения лабораторных анализов: от взятия проб материальных потоков до доведения результатов анализа этих проб до управляющего производственного персонала (технологов и операторов технологических агрегатов), следует отметить, что их точности и достоверности, к сожалению, не всегда можно доверять, а их временная дискретность и значительное запаздывание существенно сказываются на рациональности необходимого, непрерывного управления качественными показателями производства. Ниже рассмотрены основные причины этих положений.

Этап взятия проб материального потока. При определении значений качественных показателей входных/выходных материальных потоков технологических агрегатов особое значение имеет точная фиксация момента времени взятия (отбора из материального потока) пробы для анализа и привязка получаемого результата анализа именно к этому моменту времени. Только тогда можно правильно сопоставить результаты анализа пробы имеющемуся в момент взятия пробы технологическому режиму работы агрегата. В действительности в лабораториях многих предприятий фиксируется момент приезда лабораторного транспорта за пробой к месту ее

отбора из транспортной линии, но далеко не всегда этот момент совпадает с моментом реального взятия пробы из проходящего материального потока. Зачастую необходимое взятие пробы проводят сами операторы технологических агрегатов из-за значительного запаздывания лабораторного транспорта, собирающего образцы по всему производству (хотя формально это может быть незаконно). При этом, если они видят по режимным показателям работы технологического агрегата, что качество выпускаемой им продукции может не соответствовать нормативу, они произвольно сдвигают момент времени взятия пробы, естественно, не фиксируя это нарушение и, тем самым, нарушая достоверность получаемого анализа.

Ввиду этого необходимо, хотя бы на наиболее важных транспортных линиях материальных потоков (например, тех линиях, чьи показатели качества входят в комплекс ключевых показателей эффективности работы производства), установить автоматические пробоотборники, запрограммированные на требуемые моменты времени отбора проб или дистанционно управляемые. Тогда будет обеспечено соответствие выдаваемых лабораторией анализов качества материальных потоков точному времени их отбора.

Различные предприятия выпускают автоматические пробоотборники как для отбора проб суспензий и жидкостей из трубопроводов, емкостей, смесителей, реакторов; так и для отбора проб сыпучих и не сыпучих твердых материалов из самотечных (гравитационных) систем, таких как бункеры, аэрожелоба, шнеки, ленточные и скребковые конвейеры, вертикальные и наклонные материалопроводы. Возможно как общепромышленное, так и их взрывозащищенное исполнение. При необходимости пробоотборники комплектуются шкафом управления, обогреваемыми шкафами, кожухами для охлаждения.

При определении качественных показателей материала, находящегося в хранилище (складе, силосе, резервуаре), достоверность лабораторного анализа материала, заполняющего определенный объем хранилища определяется тем, насколько анализируемая проба отражает качество всей массы материала. Естественно, перед отбором пробы материал обычно подвергается перемешиванию, однако далеко не всегда его результатом является идентичность качества материала во всем объеме хранилища. А это не всегда и не полностью учитывается при заключении о качественных показателях материала в хранилище. Для подтверждения достоверности полученного результата анализа пробы истинному качеству материала во всем хранилище целесообразно отбирать несколько проб материала в разных точках хранилища и при совпадении результатов анализов этих проб (в пределах класса точности проведения анализов) судить о достоверности полученной оценки качественных показателей хранимого материала. При различии результатов анализа проб (при разнице результатов анализов отдельных проб, превышающих погрешность проведения этих анализов) считать

необходимым продолжить процедуру перемешивания материала в хранилище.

Этап доставки и хранения проб в лаборатории. Важным фактором для ряда проб материальных потоков является сохранение их качественного состава в интервале времени от момента взятия проб до их установки в лабораторные анализаторы (время доставки проб и их хранения до анализа). Например, наличие летучих компонентов (испарения легких фракций) в анализируемом материальном потоке, растворенных газов в жидких пробах, паров жидкостей в газовых пробах может изменить качественный состав пробы от искомого качественного состава материального потока. Также качественный состав пробы может изменяться из-за расслоения пробы во время ее транспортировки, из-за деградации пробы вследствие различных световых или погодных воздействий. Для подобных проб требуется организация специальных средств доставки и хранения пробы в лаборатории.

Этап проведения анализов проб. Результаты анализов качественных показателей, проводимых лабораторией, большей частью становятся известными технологам и операторам технологических агрегатов примерно через 1...2 часа после взятия пробы из материального потока. Это запаздывание складывается из времени доставки пробы в лабораторию, ожидания очереди на проведение анализа, времени проведения анализа и оформления его результата. Кроме того, существенная дискретность проведения лабораторных анализов приводит к достаточно большой вероятности существенных отклонений истинного значения показателя в любой момент времени в интервале между соседними измерениями от его измеренного, последнего по времени лабораторного измерения. Если результат последнего по времени анализа показывает, что качество не соответствует заданным нормативам, то необходимые управляющие реакции, компенсирующие этот результат, запаздывают на указанное выше время, то есть на 1...2 часа, что сказывается на их эффективности.

Особенности поточных анализаторов и их применения

Все рассмотренные в предыдущем разделе положения, определяющие недостатки использования существующих лабораторных анализов для эффективного управления качественными показателями материальных потоков, указывают на рациональность перехода к анализу качественных показателей поточными анализаторами. Однако использование поточных анализаторов далеко не всегда оказывается экономически оправданным.

Выбор типа поточного анализатора, его конкретного наименования и фирмы его производителя является достаточно ответственной задачей по ряду причин:

- стоимость подавляющего большинства поточных анализаторов на много порядков превышает стоимость датчиков измеряемых режимных величин технологических агрегатов (датчиков давления, температуры, расхода);
- эксплуатация поточных анализаторов достаточно сложна и финансово затратна;

Качество - это когда все делается правильно, даже если никто не смотрит.
Генри Форд

— установка поточных анализаторов и удобство его обслуживания в необходимом месте производства требует особого внимания и отдельного проекта.

Ввиду этого важно сопоставлять варианты существующих свойств и характеристик предлагаемых разными производителями поточных анализаторов, которые должны изучаться и анализироваться при их выборе для конкретного применения.

Варианты мест выполнения анализа. В поточных анализаторах используются два варианта измерительных ячеек для анализируемых проб материального потока — погружные и проточные:

— погружные ячейки располагают внутри материального потока (трубопровода), и анализ проводится без извлечения из него специальной пробы и без какой-либо пробоподготовки;

— проточные ячейки устанавливаются в систему байпас, обеспечивающую подачу пробы к ячейке, и позволяют анализировать продукт при соответствующей системе подготовки пробы. Возврат пробы в трубопровод производится специальным насосом.

Следует отметить, что измерительные ячейки у ряда поточных анализаторов могут быть отнесены от анализаторов на расстояния от нескольких сот метров до нескольких километров и соединены с анализаторами оптоволоконным кабелем.

Варианты реактивности получения результатов анализа. Поточные анализаторы существенно различаются временем проведения анализа загруженной в измерительную ячейку пробы. Есть анализаторы, выдающие непрерывно без запаздывания текущий результат анализа пробы, но у большинства анализаторов время анализа пробы занимает от нескольких секунд до 40...50 мин. В последнем случае результирующие данные таких анализаторов затруднительно непосредственно использовать в качестве регулируемых величин в контурах ПИД-регулирования анализируемых качественных показателей.

Варианты подготовки проб для их анализа. Есть поточные анализаторы, не требующие специальной подготовки анализируемой пробы, но большинство анализаторов требуют ее предварительную подготовку, которая может состоять из разного сочетания работ по обработке пробы:

- стабилизации на определенном уровне ее физических параметров: давления, температуры, расхода;
- извлечения посторонних примесей в пробе: механических включений, агрессивных компонентов, влаги и других;
- вывода растворенных газов из жидких проб и вывода паров жидкостей из газовых проб.

Варианты числа анализируемых потоков одним поточным анализатором. Не всегда для анализа качества

на каждый материальный поток надо ставить отдельный поточный анализатор. Есть поточные анализаторы, которые могут последовательно автоматически переключаться и анализировать несколько (до шести) различных материальных потоков. Они имеют несколько измерительных ячеек и, когда в одной из них проходит анализ пробы одного материального потока, другая измерительная ячейка промывается другим, следующим по очереди материальным потоком. Все эти манипуляции с переключением потоков и промывкой измерительных ячеек автоматизированы.

Варианты методов калибровки поточных анализаторов. Калибровка различных видов поточных анализаторов реализуется либо специальными эталонными компонентами и градуировочными смесями, либо построением калибровочной модели для каждого конкретного применения анализатора путем создания специальных калибровочных образцов, охватывающих весь возможный диапазон состава анализируемого потока (число таких образцов порядка 50...100 ед.), их анализ в лабораторном анализаторе. Далее по результатам анализов строится регрессионная калибровочная модель поточного анализатора, которая будет правильной для его работы с проверенными вариантами состава анализируемого потока. Любые изменения во время функционирования анализатора принятых при калибровке вариантов состава материального потока требуют корректировки калибровочной модели путем создания и анализа новых калибровочных образцов.

Важно отметить, что ряд поточных анализаторов, независимо от заданного метода их калибровки, требует периодического тестирования и проверки точности работы анализатора; причем требуемый интервал времени между соседними проверками может быть в диапазоне от суток до месяца и более. В частности, всегда требуется пересмотр калибровки при изменении параметров и состава анализируемого потока.

Обобщая изложенные особенности применения поточных анализаторов, следует констатировать, что на практике их применение остается пока достаточно ограниченным.

Особенности косвенных оценок качественных показателей (виртуальных анализаторов)

Косвенные оценки (часто обозначаемые в литературе термином «Виртуальные анализаторы») текущих значений качественных показателей в дополнение к их дискретным лабораторным анализам приобретают все более важную роль при автоматическом управлении качественными показателями производственных объектов. Причинами этого являются требования систем управления к более точному определению не разделенных во времени, достаточно редких, точечных значений показателей, что делают лабораторные анализаторы, а непрерывных во времени, текущих значений качественных показателей входных и выходных материальных потоков производственных объектов, которые недостижимы применением лабораторных анализаторов; а так-

Я нанес оскорбление Богу и человечеству, потому что не довел работу до нужного качества.

Леонардо да Винчи

же которые не выполняются поточными анализаторами или из-за их отсутствия или из-за экономических и технических факторов, препятствующих их внедрению.

Реализация косвенных оценок текущих и прогнозируемых значений качественных показателей, базирующихся на:

- уже имеющихся измеряемых значениях других величин, коррелированных с искомыми показателями;
- прошлых значениях лабораторных анализов показателей, статистически взаимосвязанных с их текущими значениями;
- на ассоциативном сопоставлении с историческими данными — позволяет с минимальными затратами значительно повысить точность оценки текущих значений качественных показателей в любой момент времени по сравнению с предполагаемой точностью текущих значений показателей в любой момент времени в интервале между соседними лабораторными анализами.

В то же время, повсеместное внедрение промышленного Internet вещей, как необходимого шага к созданию цифрового предприятия, значительно повышает вычислительные возможности систем контроля и управления производственными объектами, что позволяет использовать в них с необходимым быстродействием достаточно сложные и объемные расчеты косвенных оценок качественных показателей, а также облегчает и удешевляет их внедрение и функционирование.

Рациональный вариант косвенной оценки текущего и прогнозного значения качественного показателя материального потока, независимо от технологического агрегата его использующего или создающего, может быть определен изучением и классификацией статистических взаимосвязей самого показателя и дискретных значений его лабораторных анализов с непрерывно измеряемыми на данном агрегате режимными величинами и другими качественными показателями. Наиболее распространенные варианты косвенных оценок приведены ниже.

Вариант 1. Качественный показатель статистически взаимосвязан с рядом автоматически непрерывно измеряемых величин, а периодически измеряемое лабораторией значение качественного показателя не коррелировано с соседними измеряемыми лабораторией значениями этого же качественного показателя. Косвенную оценку целесообразно строить по значениям ряда непрерывно измеряемых величин, статистически взаимосвязанных с искомым качественным показателем. Если указанные статистические связи линейны, то оценка показателя производится линейным уравнением регрессии. Если указанные статистические связи нелинейны, то оценка показателя производится либо нелинейным уравнением регрессии, либо нейросетью.

Вариант 2. Качественный показатель не имеет достаточно значимых статистических взаимосвязей с ав-

томатически измеряемыми непрерывно величинами, но каждое периодически измеряемое лабораторией значение качественного показателя коррелировано с соседними измеряемыми лабораторией значениями этого же качественного показателя. Косвенную оценку целесообразно строить методом статистической экстраполяции прошлых лабораторных анализов. Прогноз оценки показателя до его ближайшего анализа формируется как разность двух линейных комбинаций: прошлых значений анализов (авторегрессии) и прошлых значений ошибок прогноза (скользящего среднего).

Вариант 3. Качественный показатель статистически взаимосвязан с автоматически измеряемыми непрерывно величинами и каждое периодически измеряемое лабораторией значение качественного показателя коррелировано с соседними измеряемыми лабораторией значениями этого качественного показателя. Косвенную оценку целесообразно строить по статистической экстраполяции прошлых лабораторных анализов и по текущим значениям ряда непрерывно измеряемых величин, статистически взаимосвязанных с искомым качественным показателем. Прогноз оценки показателя представляет собой регрессионное уравнение, в котором в качестве регрессоров используются:

- прошлые значения лабораторных анализов показателя;
- ошибки прогноза этих значений;
- значения непрерывно измеряемых величин, статистически взаимосвязанных с качественным показателем, каждое из которых имеет свое фиксированное опережение по времени относительно момента прогноза.

Вариант 4. Качественный показатель не имеет взаимных статистических связей с автоматически измеряемыми величинами и периодически измеряемое лабораторией значение качественного показателя не коррелировано с соседними измеряемыми лабораторией значениями этого качественного показателя. В этом (достаточно редком) случае целесообразно проанализировать другие возможности разработки косвенных оценок, например, путем ассоциативного сопоставления текущего состояния производственного объекта, отвечающего за рассматриваемый качественный показатель, с близкими по историческим данным его состояниям в прошлые интервалы времени.

Достоинство внедрения косвенных оценок текущих и прогнозных значений качественных показателей заключается в повышении их точности определения без всяких капитальных затрат и при имеющейся частоте лабораторных анализов или даже при увеличении интервала между ними.

Недостатком косвенных оценок текущих и прогнозных значений качественных показателей можно считать увеличивающуюся во время их функционирования погрешность оценки, причинами которой являются

изменения параметров статистических взаимосвязей. Последние следуют изменениям режимов работы производственных объектов, изменениям свойств используемых сырьевых компонентов, изменениям характеристик возмущений. Ввиду этого параметры косвенной оценки (независимо от ее алгоритма) должны адаптироваться под текущее состояние производства при обнаружении значительных расхождений между прогнозом косвенной оценки на момент следующего лабораторного анализа и его реальным результатом.

Заключение

Важнейший класс контроля показателей работы производства на предприятиях технологических отраслей — контроля текущих значений качественных показателей материальных производственных потоков — в настоящее время наименее охвачен автоматическими измерителями и анализаторами и значительно отстает от современных требований точного анализа текущего качества сырьевых компонентов, полуфабрикатов, готовой продукции, что существенно сказывается на конечных экономических показателях и конкурентоспособности предприятий. Эти обстоятельства делают особенно актуальными научно-прикладные разработки в области создания косвенных оценок (виртуальных анализаторов) текущих и прогнозных значений качественных показателей, поскольку они не требуют значительного финансирования, легко и достаточно быстро внедряются, просты в обслуживании. В то же время они значительно повышают возможности эффективного управления производством.

Следует подчеркнуть существующие перспективы разработки на базе различных теоретических подходов (статистического, ассоциативного и предикативного анализов, корреляционных зависимостей измеряемых величин, различных вариантов регрессионных уравнений и нейронных сетей) таких новых, достаточно общих методов и алгоритмов косвенной оценки текущих и прогнозируемых значений различных видов качественных показателей материальных потоков (сырьевых компонентов, полуфабрикатов, готовых продуктов), которые позволят значительно повысить точность стабилизации заданных значений качественных показателей выпускаемой продукции; исключить возникновение брака продукции по вине систем автоматического контроля; упростить разработку, внедрение и эксплуатацию предлагаемых косвенных оценок.

Список литературы

1. *Клим О.В.* Промышленные анализаторные комплексы. С.-Петербург. 2015.
2. *Ефитов Г.Л., Аносов А.А.* Опыт использования ИК-спектromетрии для измерения свойств бензинов на НПЗ // Автоматизация в промышленности. 2012. №7.

*Гребенюк Елена Алексеевна — д-р техн. наук, главный научный сотрудник,
Ицкович Эммануил Львович — д-р техн. наук, проф., главный научный сотрудник
ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН.
Контактный телефон (495) 334-90-21.*