



АЛГОРИТМЫ АНАЛИЗА СЛУЧАЙНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЙ ПОТОКОВОГО ГАЗОВОГО ХРОМАТОГРАФА

В.Л. Сельченков (ЗАО "Объединение БИНАР")

Перечислены основные функции, выполняемые экспертно-аналитическими системами метрологического назначения в составе САУ ГИС. Рассматривается алгоритмическое обеспечение экспертно-аналитической системы, разработанное ЗАО "Объединение БИНАР", отвечающее за анализ случайных погрешностей измерений потокового газового хроматографа.

Ключевые слова: экспертно-аналитическая система, система автоматического управления, газоизмерительные станции, потоковый газовый хроматограф.

Введение

До настоящего времени разработка АСУТП и САУ газоизмерительных станций (ГИС) проводится без применения единой методологии и технической политики. В частности, не нашли широкого распространения аналитические (экспертные) системы метрологического назначения в составе САУ ГИС дочерних обществ ОАО "Газпром".

Основные функции, которые выполняются экспертно-аналитическими системами метрологического назначения в составе САУ ГИС:

- выявление превышения величины оцениваемой погрешности измерений расхода и количества природного газа, и оценка нестационарности процесса измерений расхода;

- оценивание статистического и динамического характера процесса измерения расхода газа на ГИС: определение моментов изменения статистических свойств газа; нарастание систематической составляющей погрешности датчиков;

- оценивание величины неопределенности измерений расхода и количества природного газа и/или ее составляющих (систематических и случайных погрешностей) автоматическими вычислителями расхода газа (АВРГ);

- оценивание величины неопределенности измерений физико-химических параметров (ФХП) природного газа и/или ее составляющих (систематических и случайных погрешностей).

Экспертно-аналитическая система, поставляемая ЗАО "Объединение БИНАР" в составе САУ ГИС, имеет модульную структуру и включает *программные модули:*

- *оперативного анализа случайных погрешностей АВРГ:* на основе анализа информационных блоков, содержащих минутные усреднения АВРГ, выявляется возникновение дисбаланса между основным и дублирующим каналами измерений расхода газа. Выявляется измерительный канал с повышенной погрешностью и производится анализ причин, вызвавших отклонение. Анализ оперативный, проводится с дискретностью в 1 мин.;

- *анализа нарастания систематических погрешностей АВРГ:* на основе анализа месячной выборки ин-

формационных блоков, содержащих часовые параметры АВРГ, выявляется нарастание систематической составляющей погрешности датчиков. Анализ периодический с дискретностью 1...30 сут.;

- *анализа случайных погрешностей измерений потокового газового хроматографа:* на основе анализа информационных блоков разовых измерений хроматографа выявляются случайные погрешности измерений: сбой калибровки и выбросы (анализ оперативный, проводится после каждого измерения); конденсация тяжелых углеводородов в пробоотборных линиях (анализ периодический, проводится раз в неделю);

- *анализа случайных погрешностей измерений потокового гигрометра:* на основе анализа информационных блоков "часовые усреднения" гигрометра выявляются случайные погрешности измерений: сбой измерений или связи, выбросы. Анализ периодический, проводится раз в неделю.

Рассмотрим подробнее алгоритмы работы программного модуля, отвечающего за анализ случайных погрешностей измерений потокового газового хроматографа. Исходные данные для разработки алгоритмов получены на основе анализа реальной БД САУ ГИС, работающей в сложных условиях с возможностью существенных изменений состава газа.

Выявление погрешностей калибровки хроматографа

Контроль градуировочных характеристик потокового хроматографа может дать информацию о том, сохраняются ли в допустимых пределах метрологические характеристики измерительной системы, и правильно ли проводится анализ. Подробно контроль градуировочных характеристик описан в ГОСТ 31371.1-7-2008 "Определение состава методом газовой хроматографии с оценкой неопределенности".

Экспертно-аналитическая система выявляет взаимосвязи процессов калибровки и процессов измерений и их рассогласованность.

На рис. 1 приведена диаграмма изменения плотности газа на основе результатов измерений, занесенных в информационный блок хроматографа "текущие измерения" за 1 сут. Анализ массива данных плотностей до и

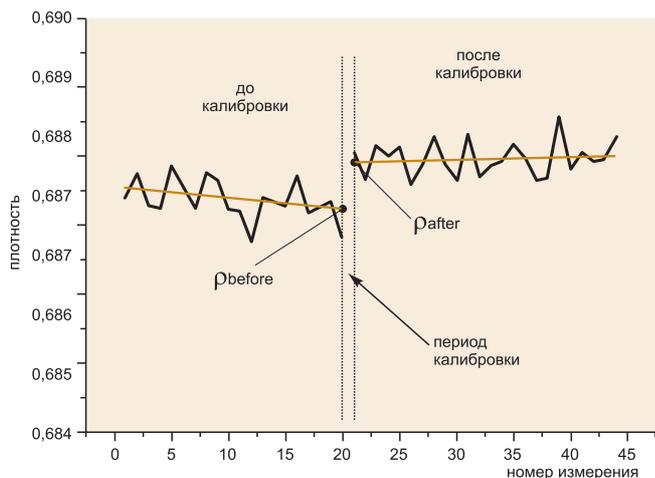


Рис. 1. Изменение плотности газа за сутки и аппроксимационные прямые

после периода калибровки выявляет существенный скачок плотности после проведения калибровки. Подобная разность двух результатов измерений может свидетельствовать о некорректной работе хроматографа.

Вклад в неопределенность вычислений плотности вносит множество трудно учитываемых факторов, поэтому непосредственное сравнение значения плотности до и после калибровки некорректно.

Проведем аппроксимацию полиномом первой степени массива плотностей до калибровки и отдельного массива плотностей после калибровки (рис. 1).

В алгоритме анализа нарастания систематических погрешностей АВРГ также важны расстояние между аппроксимационными прямыми и значение угла между ними. В данном случае наклон аппроксимационных прямых не является информативным, поскольку зависит от изменения плотности газа в течение суток.

Обозначим конечную точку аппроксимационной прямой до калибровки через ρ_{before} , а первую точку аппроксимационной прямой после калибровки через ρ_{after} . Тогда:

$$\Delta_{калибр} = (\rho_{after} - \rho_{before}) / \rho_{before} \times 100 \%$$

Оценив величину среднеквадратичного отклонения (СКО) за сутки σ , предшествующие рассматриваемым, рассчитаем коэффициент:

$$Kf = (\rho_{after} - \rho_{before}) / \sigma.$$

В таблице приведены результаты расчетов Kf и $\Delta_{калибр}$ по выборкам из реальной БД за несколько суток. Судя по данным таблицы можно предположить, что в течение вторых суток произошел какой-то сбой, поскольку отклонение превысило 2σ .

Использование критерия Kf является более логичным, чем $\Delta_{калибр}$, и если значение Kf по абсолютной величине превышает 2,0, можно говорить о проблемах с калибровкой. Но расчет СКО требует массива данных за достаточно длительный период и сопряжен с появлением неопределенности, поэтому речь в нашем случае можно вести только об оценке значения СКО. Значение $\Delta_{калибр}$ рассчитывается существенно проще и об-

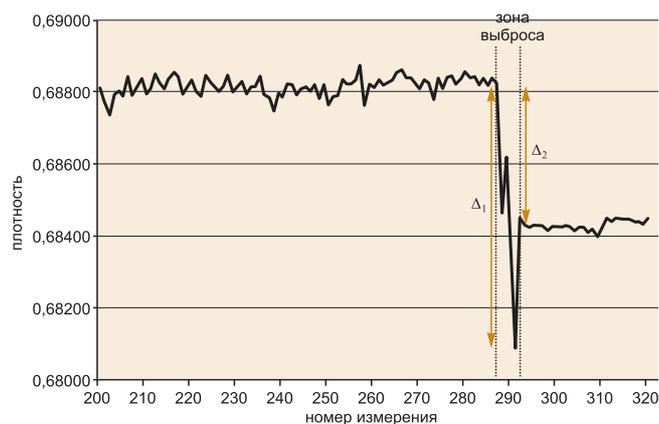


Рис. 2. Изменение плотности газа за неделю

ладает достаточной точностью. Экспертно-аналитическая система ограничивается расчетом только $\Delta_{калибр}$.

При выполнении условия $\Delta_{калибр} > 0,1$ экспертно-аналитическая система формирует предупреждение: "Большой перепад калибровки, $\Delta_{калибр} = *, ** *$ "

Выявление выбросов в измерениях хроматографа

Выбросы — это данные среди исходных результатов измерений (или данные, занесенные в таблицу и полученные из результатов измерений), которые настолько отклоняются от сопоставимых данных, внесенных в ту же самую таблицу, что признаются несовместимыми. Опыт показал, что невозможно во всех случаях избежать выбросов, и с ними нужно поступать таким же образом, как с недостающими данными, согласно ГОСТ Р ИСО 5725-1-6-2002 "Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений".

Рассмотрим диаграмму изменений плотности газа, приведенную на рис. 2. Оценка СКО за временной период до "зоны выброса" показывает, что для плотности газа разность двух соседних измерений выходит за пределы 3σ при $\Delta > 0,15\%$. В случае, представленном на рис. 2, перепад плотности $\Delta_1 = 1,1\%$, то есть почти на порядок выходит за пределы 3σ , что позволяет отмеченную область измерений отнести к области выброса.

При разности двух соседних измерений плотности $\Delta > 0,15\%$ экспертно-аналитическая система формирует сообщение об ошибке: "Выброс по плотности: $\Delta = *, ** *$ "

Последняя достоверная точка перед выбросом запоминается как ρ_{before} , и после каждого последующего измерения производится вычисление параметров:

1. $\Delta = \text{abs}((\rho_i - \rho_{before}) / \rho_{before}) \times 100\%$.
2. $\Delta_i = \text{abs}((\rho_i - \rho_{i-1}) / \rho_i) \times 100\%$,

где i — номер измерения.

Область зоны выброса кончается, если:

- a) $\Delta < 0,15\%$;
- b) $\Delta_{i-2} < 0,15\%$, и $\Delta_{i-1} < 0,15\%$, и $\Delta_i < 0,15\%$.

Таблица. Результаты расчетов K и $\Delta_{калибр}$ за несколько суток

сутки	1	2	3	4	5	6
$\Delta_{калибр} \%$	0,0074	0,1005	-0,0419	-0,0099	0,0567	0,0034
Kf	0,16	2,16	-0,90	-0,21	1,22	0,07

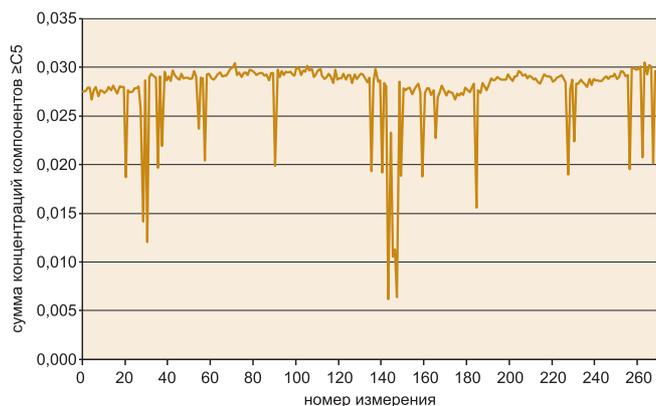


Рис. 3. Изменение концентраций тяжелых компонентов газа за неделю

В варианте б) область выброса кончается в точке $i - 2$, и с этой точки считается, что через газоизмерительную станцию пошел поток газа другого качества. Подобное явление наблюдается на рис. 2 в области после зоны выброса. И хотя $\Delta_2 = 0,57\%$, подобное явление ошибкой не считается.

В подобной ситуации экспертно-аналитическая система формирует предупреждение: "Смена потока с перепадом плотности: $\Delta_2 = *, **$ ".

При расчете плотности учитываются концентрации всех компонентов газа, поэтому анализ выбросов каждого компонента программа не проводит. Анализ выбросов концентраций избранных компонентов будет дан ниже.

Возможен анализ на выбросы по другим расчетным параметрам, например, по числу Воббе. Но зависимость изменения других расчетных параметров природного газа повторяет вид изменения плотности, а диапазон изменения этих параметров (и соответственно чувствительность) меньше, чем у плотности.

Конденсация тяжелых углеводородов в пробоотборных линиях

Система пробоотбора для хроматографа задерживает грязи и крупные капли. По длинной тонкой обогреваемой пробоотборной трубке с небольшой скоростью (~1 л/мин) идет непрерывный ток газа. Время прохождения газа по пробоотборной линии может достигать для длинных линий десятков минут, соответственно на пробу начинают оказывать влияние различные физические процессы.

При температурах газа ниже 30 °С в пробоотборных трубках возможна конденсация тяжелых углеводородов C5 и более. На неровностях и изгибах трубки, на наиболее холодных участках трубки, на участках со следами масла начинает оседать пленка тяжелых углеводородов. Пленка работает как хроматографическая колонка, избирательно растворяя тяжелые углеводороды, что приводит к значительному снижению концентрации тяжелых углеводородов в пробе (рис. 3).

Измерения, представленные на рис. 3, проводились поздней осенью на ГИС в средней полосе Европейской части России. Основные пики конденсации

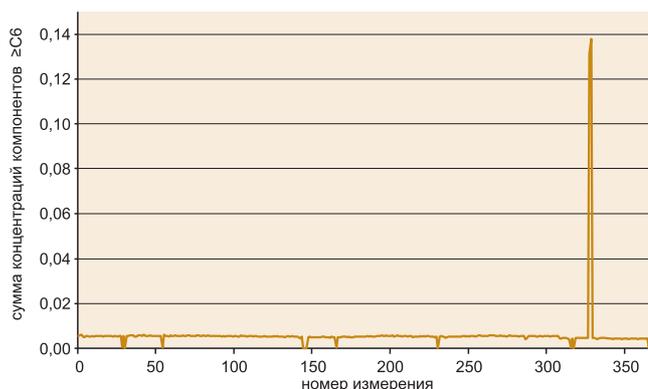


Рис. 4. Отрыв капли тяжелых углеводородов

приходятся на ночное время. Днем температура поднималась, и начинался процесс постепенного испарения пленок конденсации.

Толщина пленки постепенно растет, пока не отрывается капля. Капля летит по пробоотборной трубке с током газа, постепенно испаряя легкокипящие пентаны. При попадании в обогреваемый редуктор капля испаряется полностью, создавая локальное изменение состава газа. Если в этот момент хроматограф производит отбор пробы, то данное измерение окажется выпадающим из общего ряда измерений (рис. 4).

Влияние тяжелых компонентов на плотность отслеживается экспертно-аналитической системой оперативно в алгоритмах, описанных выше.

Конденсацию тяжелых углеводородов в пробоотборных трубках экспертно-аналитическая система отслеживает с применением методов статистического анализа по выборкам за 7...10 сут.

Алгоритм анализа конденсации тяжелых углеводородов в пробоотборных трубках.

1. Из БД запросом из таблицы текущих (разовых) измерений создается массив суммарной концентрации тяжелых компонентов:

$$Y_i = nC5_i + iC5_i + neoC5_i + C6pl_i,$$

где i меняется от 1 до n , $n \geq 100$.

2. Если Y_i не попадает в диапазон: $0 < Y_i < C5pl_{max}$, то данное значение из массива удаляется как выброс. При обнаружении более одного выброса должно быть сгенерировано предупреждение: "Выбросы по тяжелым углеводородам". По умолчанию $C5pl_{max} = 1,0$.

3. По полученному массиву определяется среднее значение:

$$Sr = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i}{n}. \tag{1}$$

4. Определяется среднееквадратичное отклонение:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - Sr)^2}{n - 1}}. \tag{2}$$

5. Для каждого значения Y_i находим:

$$K_i = (Y_i - Sr)/\sigma.$$

Массив K_i для выборки, представленной на рис. 3, приведен на диаграмме рис. 5.

6. Если в массиве K_i значения более трех точек опускаются ниже -2 , экспертно-аналитическая система формирует предупреждение: "Возможна конденсация тяжелых углеводородов".

7. Если в массиве K_i значения более одной точки превышают $+2$, экспертно-аналитическая система формирует предупреждение: "Нарушено определение тяжелых углеводородов".

Формирование информационного блока "Периодические усреднения" хроматографа

Поскольку вероятность выброса при измерениях расхода газа достаточно велика, то записывать в вычислители расхода газа результаты каждого измерения хроматографа не корректно. Необходимо проводить усреднения по нескольким измерениям и записывать усредненные значения в информационный блок хроматографа "Периодические усреднения". Далее целесообразно проводить дополнительную проверку на достоверность полученных усредненных значений и для этого формировать информационный блок хроматографа "Рабочие значения".

Учитывая методы проверки приемлемости результатов измерений, полученных в условиях повторяемости, для формирования информационного блока "Периодического усреднения" требуются четыре последовательных измерения. Начало периода усреднения должно совпадать с началом часа, окончание периода усреднения – с концом часа. Переход цикла измерения хроматографа из одного часа в другой не допускается.

Общая длительность проведения четырех измерений влияет на прецизионность метода измерений. Первое разовое измерение должно начинаться с началом периода усреднения. Последующие разовые измерения должны проводиться с минимальными интервалами между окончанием одного измерения и началом следующего измерения.

Если с момента окончания четвертого измерения до момента окончания периода усреднения остается время, достаточное для проведения дополнительных измерений, то дополнительные измерения допускаются не проводить.

До проведения усреднений должна быть выполнена проверка приемлемости результатов измерений. Критерий приемлемости опирается на среднеквадратичное отклонение, которое рассчитывается по формуле, аналогичной (2). Расчет ведется по выборке за предыдущие контрактные сутки по параметру "плотность" из информационных блоков "Периодические усреднения".

Проводить проверку по всем измеряемым и вычисляемым параметрам не имеет смысла. Поскольку при расчете плотности учитывается измеренная концентрация всех компонентов, то достаточным и корректным будет проводить проверку приемлемости только по плотности.

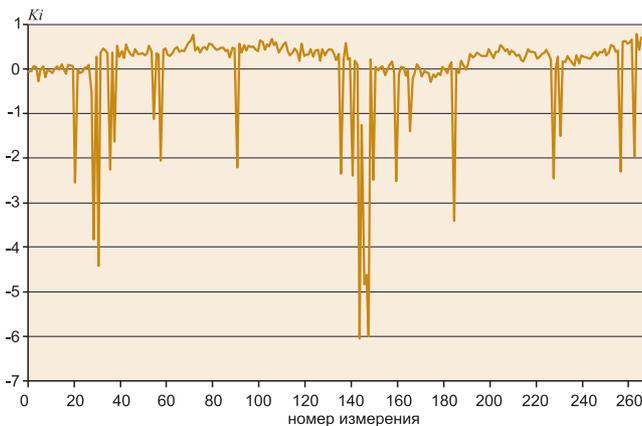


Рис. 5. Массив K_i для выборки данных с рис. 3

В соответствии с ГОСТ Р ИСО 5725-1-6-2002 проведенные четыре измерения располагаются в порядке возрастания вычисленных значений плотности газа, то есть:

$$\rho_{\min}, \rho_{(2)}, \rho_{(3)}, \rho_{\max}$$

Вычисляется $\Delta_{\text{плотн}} = (\rho_{\max} - \rho_{\min})$.

Значение $\Delta_{\text{плотн}}$ сравнивают с критическим диапазоном для уровня вероятности 95% для $n = 4$. В соответствии с ГОСТ Р ИСО 5725-1-6-2002: $CR_{0,95}(4) = 3,6\sigma$.

Начальное значение критического диапазона с учетом ГОСТ 31369-2008 "Вычисление теплоты сгорания, плотности, относительной плотности и числа Воббе на основе компонентного состава" принимается $CR_{0,95}(4) = 0,001$.

Если $\Delta_{\text{плотн}} \leq CR_{0,95}(4)$, то в качестве среднего для каждого параметра информационного блока "Периодические усреднения" берется среднее арифметическое четырех измерений:

$$\frac{x_{\min} + x_{(2)} + x_{(3)} + x_{\max}}{4}$$

Если $\Delta_{\text{плотн}} > CR_{0,95}(4)$, то в качестве среднего для каждого параметра информационного блока "Периодические усреднения" берется медиана:

$$\frac{x_{(2)} + x_{(3)}}{2}$$

В этом случае экспертно-аналитическая система формирует сообщение об ошибке: "Выброс при усреднении; $\Delta_{\text{плотн}} = *, ****$ ".

Формирование информационного блока "Рабочие значения" хроматографа

Информационный блок "Рабочие значения" формируется на основе параметров из информационного блока "Периодические усреднения" после проверки приемлемости результатов усреднения. Основное назначение данного информационного блока – хранение проверенных данных для автоматической записи в качестве статических параметров в АВРГ.

После формирования информационного блока "Периодические усреднения" и появления сигнала готовности данных проводится первый этап проверки.

Должны быть выполнены все условия сравнения с уставками:

$$\begin{aligned} C2_{\min} < C2 < C2_{\max}; \\ C3_{\min} < C3 < C3_{\max}; \\ N2_{\min} < N2 < N2_{\max}; \\ CO2_{\min} < CO2 < CO2_{\max}; \\ Ro_{\min} < Ro < Ro_{\max}; \end{aligned}$$

Если все значения попали в коридор между уставками, проводится второй этап проверки.

Если любое из условий не выполняется, параметры информационного блока "Рабочие значения" не меняются и экспертно-аналитическая система формирует сообщение об ошибке: "Выход за предел в блоке "Периодические усреднения"".

Уставки могут быть зафиксированы в виде констант и меняться оператором вручную или корректироваться системой автоматически:

- в контрактный час формируются выборки из информационных блоков текущих измерений за предыдущие контрактные сутки по каждому из проверяемых параметров;

- по массивам выборок для каждого из параметров рассчитываются среднее Sr и среднеквадратичное отклонение σ по формулам, аналогичным (1) и (2);

- рассчитываются уставки: $Ro_{\min} = Sr_{Ro} - 2 \times \sigma_{Ro}$ и $Ro_{\max} = Sr_{Ro} + 2 \times \sigma_{Ro}$; аналогично рассчитываются уставки $C2_{\min}$ и $C2_{\max}$;

- рассчитываются уставки: $C3_{\min} = Sr_{C3} - 3 \times \sigma_{C3}$ и $C3_{\max} = Sr_{C3} + 3 \times \sigma_{C3}$; аналогично рассчитываются уставки $N2_{\min}$ и $N2_{\max}$; $CO2_{\min}$ и $CO2_{\max}$;

Вероятностное распределение концентраций в анализируемой пробе приводит к тому, что алгоритм контроля достоверности переменных по пороговому признаку является недостаточным. Необходима статистическая оценка данных.

Все переменные, полученные в цикле измерения хроматографа, как отражающие концентрацию ком-

понентов, так и расчетные являются взаимосвязанными. Максимально отражает изменения концентраций всех компонентов, плотности и теплоты сгорания число Воббе, соответственно статистическую проверку достаточно провести по числу Воббе.

Для проведения статистической проверки должно быть рассчитано среднее значение $Sr_{\text{Воббе}}$ и среднеквадратичное отклонение $\sigma_{\text{Воббе}}$. Расчет ведется по выборке за предыдущие контрактные сутки по параметру Wobbe из информационных блоков "Периодические усреднения".

Вычисляется параметр:

$$K_{\text{Воббе}} = \text{ABS}(Wobbe - Sr_{\text{Воббе}}) / \sigma_{\text{Воббе}}$$

Если $K_{\text{Воббе}} \leq 1$, то параметры из информационного блока "Периодические усреднения" переписываются в информационный блок "Рабочие значения". Параметры информационного блока "Рабочие значения" могут записываться в вычислители расхода газа в автоматическом режиме.

Если $K_{\text{Воббе}} \leq 2$, то параметры из информационного блока "Периодические усреднения" переписываются в информационный блок "Рабочие значения" и выставляется флаг предупреждения. Параметры информационного блока "Рабочие значения" могут записываться в вычислители расхода газа только в ручном режиме после проверки значений оператором. Экспертно-аналитическая система в своей БД событие не регистрирует.

Если $K_{\text{Воббе}} > 2$, то параметры из информационного блока "Периодические усреднения" признаются недостоверными. Выставляется флаг ошибки. Параметры информационного блока "Рабочие значения" не меняются, и экспертно-аналитическая система формирует сообщение об ошибке: "Выброс в блоке "Рабочие значения"".

В настоящее время экспертно-аналитическая система развернута на ГИС "Касимов" и работает в тестовом режиме.

Сельченков Валерий Леонидович – начальник бюро Автоматизированных систем измерения расхода газа КБ ИУС ЗАО "Объединение БИНАР".

Контактные телефоны: (83130) 3-89-77, 6-94-05, факс (83130) 3-89-07.

E-mail: Selchenkov@binar.ru Http://www.binar.ru

Динамические сервомоторы для пищевой промышленности

Гигиенические нормы в пищевой промышленности предъявляют высокие требования к сервоприводам и элементам системы управления, акцентируя внимание на поверхностях и материалах, которые должны быть способны выдерживать постоянное воздействие агрессивных чистящих средств. Благодаря тому, что покрытие обычных сервомоторов теперь подходит для использования в сфере продовольственных товаров, Beckhoff прокладывает новый путь: белое покрытие, привычное для пищевой промышленности, одобренное нормами FDA (Управлением по контролю за качеством пищевых продуктов и лекарственных препаратов) и гарантирующее, что продукты произведены без каких-либо химических примесей.



Сервомоторы, одобренные FDA, отличаются от стандартных моторов AM3000 только внешним видом и уплотнением вала из нержавеющей стали, все остальное идентично. Преимущество для пользователей заключается в том, что дополнительные типы моторов обязательно должны быть заранее предусмотрены в конструкции станка в случае совместного использования обычных моторов и моторов со специальным покрытием. Дополнительное преимущество – в цене: специальное покрытие добавляет всего лишь 30% к стоимости обычного сервомотора в зависимости от размера. Кроме того, дизайн со степенью защиты IP 67 позволяет использование в жестких промышленных условиях.

Размеры фланцев 2...7 для серии сервомоторов AM3000 с новым покрытием доступны опционально.

Контактный телефон (495) 981-64-54. E-mail: russia@beckhoff.com Http://www.beckhoff.ru