



## ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНКИ ОСНОВНЫХ КЛЮЧЕВЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ПРОИЗВОДСТВА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ТИПА Часть 2. Особенности оценок количественных показателей производственной продукции.

Е.А. Гребенюк, Э.Л. Ицкович (ИПУ РАН)

*Рассматриваются способы учета расходов перемещаемых по производству продуктовых и энергетических потоков. Приводятся алгоритмы суммарных расходов потоков за заданные интервалы времени, формулы расчета погрешностей их оценок<sup>1</sup>.*

*Ключевые слова: показатели эффективности работы производства, учет расхода продуктового/энергетического потока за заданное время, погрешности учетных количественных показателей работы производства.*

### Введение

Учет за заданные интервалы времени потоков различных производственных компонентов (сырья, полуфабрикатов, готовой продукции), перемещаемых по производству между технологическими агрегатами и хранилищами, а также потоков различных энергетических компонентов (топлива, пара, горячей и оборотной воды, сжатого воздуха, азота), охватывающих большинство подразделений предприятия, необходим для формирования большинства ключевых показателей эффективности (КПЭ) работы производства. К этим показателям относятся:

- производительности отдельных агрегатов;
- поступление и расход сырьевых компонентов;
- наработка и отгрузка готовых видов продукции;
- перемещения материальных потоков между хранилищами;
- потребление различных энергоресурсов отдельными агрегатами и другими переделами производства и т. д.

При определении учетных значений расхода перемещаемых по путепроводам отдельных материальных потоков важным является формирование оценок точности полученных учетных значений и выдача их пользователям для правильной ориентации последних в полученной информации.

Ниже рассматриваются и анализируются особенности определения учетных значений производственных потоков и расчета погрешностей этих значений.

### Варианты учета (суммарного расхода за заданное время) производственных потоков

Учет отдельного материального потока по определенному путепроводу (трубопроводу или транспортеру) может автоматически определяться различными путями:

— непосредственным измерением учетного значения расхода материального потока прибором (например, расходомером или весами), в котором имеется интегратор (счетчик) измеренных мгновенных значений расхода, производящий непрерывное суммирование текущего расхода и по разности показаний счетчика в моменты начала и конца заданного интервала времени определяется искомое учетное значение;

— непосредственным измерением мгновенного расхода и передачей с определенной частотой измеряемых значений серверу системы контроля и учета работы производства, который вычисляет учетное значение расхода за заданное время путем интегрирования полученных значений мгновенного расхода со ступенчатой экстраполяцией расхода между соседними значениями мгновенного расхода;

— дублированием оценки учетного значения расхода материального потока различными независимыми способами;

— вычислением учетного значения расхода одного из продуктовых потоков технологического агрегата по балансному уравнению учетных значений расходов всех потоков данного агрегата;

— вычислением учетного значения расхода материального потока, заполняющего/опорожняющего

<sup>1</sup> Данная статья продолжает рассмотрение особенностей оценок основных КПЭ работы производства технологического типа. В предыдущем номере журнала "Автоматизация в промышленности" были описаны особенности оценок качественных показателей производственной продукции. В этом номере приводятся особенности оценок количественных показателей производственной продукции.

хранилище, по изменению массы принятого/отпущенного материала за заданный интервал времени или за время перемещения материала;

— вычислением учетного значения расхода одного из потоков участка производственной транспортной сети алгебраическим суммированием измеряемых учетных значений расходов остальных потоков данного участка сети.

При рассмотрении всех приведенных вариантов предполагается, что не учитываемые производственные расходы (потери) отсутствуют, а измеряемые значения мгновенных и суммарных расходов потоков получаются от исправных приборов, погрешность измерения которых известна и соответствует их паспортному классу точности.

### Непосредственное измерение учетного значения расхода производственного потока

Погрешность прибора, выдающего суммарное значение расхода нарастающим итогом во времени, задается в паспорте его классом точности, который для большинства рассматриваемых типов приборов определяет диапазон максимально допустимой относительной погрешности прибора, выраженной в процентах от измеренного значения. Поскольку наиболее распространенной характеристикой точности полученного значения  $\tilde{X}$  является его среднеквадратичная погрешность измерения —  $\sigma_x$ , то далее она используется в статье как показатель точности измерения. Ввиду этого необходим перевод паспортного класса точности прибора в его среднеквадратичную погрешность измерения.

Приближенно класс точности прибора  $A$  определяет случайную составляющую погрешности, поскольку систематическая составляющая погрешности при нормальной работе прибора, реализуемой его необходимой метрологической поверкой и периодической калибровкой, близка к нулю. Перевод значения класса точности прибора  $A$  в максимально возможную при имеющемся классе точности прибора, абсолютную погрешность измерения —  $\Delta$  может быть проведен по следующей формуле:

$$\Delta = 10^{-2} A \tilde{X},$$

где  $\tilde{X}$  — значение измеряемой прибором величины (в нашем случае это суммарное значение расхода за заданный интервал времени).

Это значит, что истинное значение величины  $X$  лежит в диапазоне:

$$\tilde{X} - \Delta \leq X \leq \tilde{X} + \Delta.$$

Среднеквадратичная погрешность измерения величины  $X - \sigma_x$ , при принимаемом обычно условии нормального распределения погрешности измерения, оценивается известным выражением:

$$\sigma_x = \Delta / 3 = \left(\frac{10^{-2}}{3} A\right) \tilde{X}.$$

### Оценка учетного значения расхода потока путем ступенчатой экстраполяции значений дискретных мгновенных расходов

Во многих производственных подразделениях используются расходомеры без интеграторов, и в этих случаях применяется обычно следующий способ расчета: измеряемые мгновенные значения расхода передаются по сети на сервер системы контроля и учета работы производства, и там путем интегрирования полученных значений мгновенного расхода со ступенчатой экстраполяцией расхода между соседними значениями мгновенного расхода рассчитываются искомые суммарные расходы за заданные интервалы времени. При этом, если для расчета учетного значения на сервер передается каждое мгновенное значение расхода, вырабатываемое расходомером, а он выдает его достаточно часто (с секундным интервалом), что ориентировано на операторов технологических процессов, то при наличии на производстве многих сотен таких расходомеров сеть передачи их значений на сервер и сам сервер перегружаются совершенно не эффективной работой; а если на сервер через сеть выдается каждое тысячное или десятитысячное значение измеренного мгновенного расхода (проводится передача не всех мгновенных значений измерений, а выданных расходомером через равные интервалы времени порядка 5...20 мин.), то сеть передачи их значений на сервер и сам сервер разгружаются от лишней работы, но погрешность расчета искомого суммарного расхода за заданный интервал времени возрастает и может превысить необходимую точность учетного значения расхода. Это определяет необходимость выбора такого наибольшего интервала передачи мгновенных значений расхода по сети на сервер, который еще обеспечивает требуемую погрешность расчета искомого суммарного расхода за заданный интервал времени. Иначе следует найти такую минимально возможную частоту используемых замеров мгновенных значений расходов, которая, удовлетворяя требуемой точности

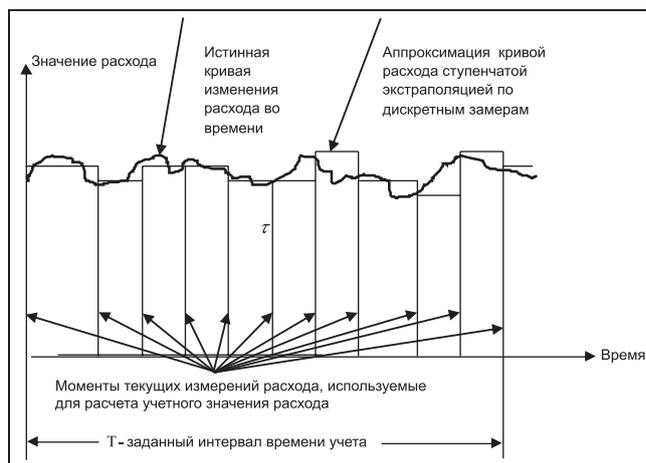


Рис. 1 Определение учетного значения расхода материала за заданное время по дискретным замерам мгновенных расходов

расчета учетного значения расхода, минимизирует загрузку соответствующих средств: сети и сервера. Общая точность суммарного значения расхода зависит от выбранной частоты используемых для расчета мгновенных расходов и от точности расходомера. На рис. 1 пояснена указанная процедура вычисления учетного значения расхода.

Будем считать, что изменения расхода во времени представляют собой случайные колебания расхода относительно его среднего значения. Это соответствует постоянному режиму работы ТП и неизменным заданиям системам регулирования. Тогда изменения измеряемого расхода во времени приближенно представляют собой случайный стационарный процесс и могут быть описаны уравнением:

$$y(t) = y_s + \xi(t),$$

где  $y_s$  — среднее значение расхода,  $\xi(t)$  — колебания расхода относительно его среднего значения, близкие к случайному стационарному процессу с нулевым математическим ожиданием и с корреляционной функцией, приближенно аппроксимируемой экспонентой:

$$K_\xi(\tau) = \lambda^2 e^{-\alpha|\tau|},$$

где  $\alpha$  — параметр, определяющий время спада корреляционной функции,  $K_\xi(0) = \lambda^2$  — дисперсия случайных колебаний процесса,  $\lambda$  — среднеквадратичное значение случайных колебаний расхода во времени относительно его среднего значения.

Учетное значение расхода за заданный интервал времени  $T$  является интегралом текущих значений процесса  $y(t)$ :

$$V(T) = \int_0^T y(u) du = Ty_s + \int_0^T \xi(u) du.$$

Аппроксимация учетного значения по дискретным замерам за этот интервал времени  $T$  вычисляется по следующей формуле:

$$\tilde{V}_k(T) = p \sum_{i=0}^{k-1} y(t_i) = Ty_s + p \sum_{i=0}^{k-1} (\xi(t_i) + v(t_i)),$$

где  $p = \frac{T}{k}$  — интервал между соседними измерениями,  $y(t_i)$  — измеренное значение процесса в момент  $t_i$ ,  $k$  — число используемых для расчета измерений в интервале  $T$ ,  $v(t_i)$  — погрешность измерителя текущего расхода.

Разность между фактическим (истинным) и оцененным учетным значением, в который введена и ошибка измерений мгновенного расхода, определяется выражением:

$$\Delta V(T) = \int_0^T \xi(u) du - p \sum_{i=0}^{k-1} (\xi(t_i) + v(t_i)) = \sum_{i=0}^{k-1} \int_{t_i}^{t_i+p} [\xi(u) - \xi(t_i)] du - p \sum_{i=0}^{k-1} v(t_i).$$

Математическое ожидание этой разности равно нулю при любом числе измерений, а ее дисперсию вычислим отдельно для первого и второго членов правой части предыдущего выражения, поскольку они представляют собой некоррелированные случайные процессы.

Дисперсия первого члена:

$$K_{\Delta V_1}(T, T) = E \left\{ \sum_{i=0}^{k-1} \int_{t_i}^{t_i+p} (\xi(u) - \xi(t_i)) du \sum_{j=0}^{k-1} \int_{t_j}^{t_j+p} (\xi(v) - \xi(t_j)) dv \right\} = \frac{2T\lambda^2}{\alpha} - \frac{2T\lambda^2}{p\alpha^2} (1 - e^{-\alpha p}).$$

Отсюда среднеквадратичная погрешность оценки учетного значения расхода из-за его ступенчатой аппроксимации:

$$\sigma_{app} = \sqrt{\frac{2T\lambda^2}{\alpha} - \frac{2T\lambda^2}{p\alpha^2} (1 - e^{-\alpha p})}.$$

Дисперсия второго члена зависит от класса точности прибора измерения и числа измерений на искомом интервале  $T$ :

$$K_{\Delta V_2}(T, T) = E \left[ p \sum_{i=0}^{p-1} v(t_i) \right]^2 = p^2 \times k \times \sigma_i^2 = Tp\sigma_i^2,$$

где  $\sigma_i^2$  дисперсия погрешности прибора.

Среднеквадратичная погрешность учетного значения расхода из-за неточности измерений:

$$\sigma_{mes} = \sqrt{Tp\sigma_i^2}.$$

Полная среднеквадратичная погрешность оценки учетного значения расхода за время  $T$  по его дискретным замерам с временными интервалами  $p$ :

$$\sigma_{total} = \sqrt{\frac{2T\lambda^2}{\alpha} - \frac{2T\lambda^2}{p\alpha^2} (1 - e^{-\alpha p}) + Tp\sigma_i^2}. \quad (1)$$

Качественный анализ полученного выражения  $\sigma_{total}$  рассмотрен ниже на примерах расчета конкретных значений среднеквадратичных погрешностей оценок учетных значений при различных вариантах исходных данных:

- различные параметры случайных колебаний самого процесса изменения расхода во времени  $\lambda$  и  $\alpha$ ;
- различные варианты времени учета  $T$ ;
- различные классы точности приборов  $A$ , измеряющих текущий расход;
- различные интервалы времени между используемыми для расчета соседними замерами текущего расхода  $p$ .

Масштаб времени в примерах указан в единичных для всех параметров условных единицах времени

спада корреляционной функции случайных колебаний расхода относительно его постоянного среднего значения.

Будем считать временем спада корреляционной функции  $t_{снада}$  время, когда ее значение станет близким к нулю:

$$t_{снада} = -\ln 0,05 / \alpha$$

и зададимся тремя возможными значениями параметра  $\alpha$ :  $\alpha_1=0,08$ ;  $\alpha_2=0,04$ ;  $\alpha_3=0,02$ , что соответствует значениям времени спада корреляционной функции до уровня 0,05:  $t_{1снада} = 37,5$ ;  $t_{2снада} = 75,0$ ;  $t_{3снада} = 150,0$ .

Учетный интервал времени  $T$  для каждого значения  $t_{снада}$  выбираем таким образом, чтобы отношение  $T/t_{снада}$  было одинаковым при различных значениях  $t_{снада}$ ; конкретно считаем, что при  $t_{1снада} = 37,5$  -  $T=3750$ ; при  $t_{2снада} = 75,0$  -  $T=7500$ ; при  $t_{3снада} = 150,0$  -  $T=15000$ .

На рис. 2–5 показаны зависимости погрешностей оценки учетных значений расхода от частоты используемых замеров текущего расхода при различных значениях других параметров уравнения (1).

На всех графиках по оси абсцисс отложен относительный интервал времени между соседними измерениями:  $p/t_{снада}$ . Наименьший интервал между соседними измерениями на графиках  $p_{min} = 0,2t_{снада}$ ; при нем за время спада корреляционной функции используются пять замеров текущего расхода.

На всех графиках по оси ординат отложено отношение соответствующей погрешности  $\sigma_{total}$  к величине  $T\lambda$  в процентах:  $(\sigma_{total}/T\lambda) \times 100$ .

При интервале между соседними измерениями расхода, превосходящими  $t_{снада}$  (при  $p/t_{снада} > 1$ ),  $\sigma_{app}$  становится постоянной, поскольку корреляция между соседними замерами отсутствует. Наблюдаемое на рис. 2 некоторое повышение общей погрешности  $\sigma_{total}$  при  $p/t_{снада} > 1$  объясняется увеличением доли погрешности, определяемой точностью используемого расходомера: при увеличении времени между соседними измерениями число замеров расхода за время  $T$  снижается, и  $\sigma_{mes}$  увеличивается.

Как видно из кривых рис. 3, повышение точности замеров мгновенного расхода потока незначительно сказывается на снижении общей погрешности учетного значения расхода.

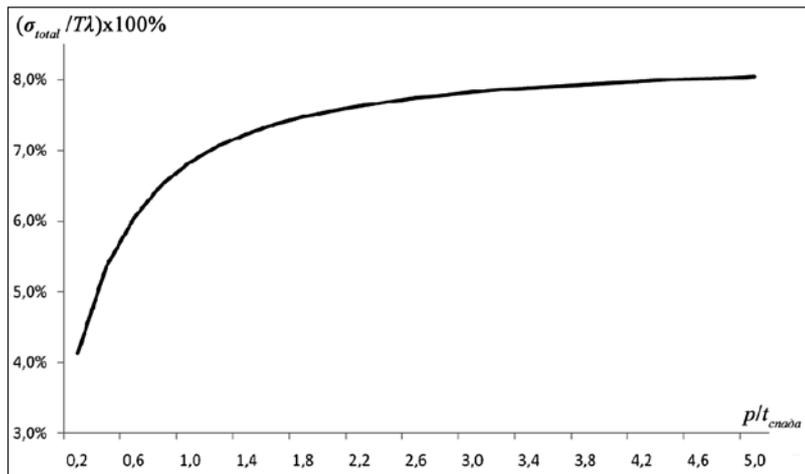


Рис. 2. Зависимость среднев квадратичной погрешности оценки учетного значения расхода  $(\sigma_{total}/T\lambda) \times 100$  от интервала времени  $p/t_{снада}$ . Постоянные значения:  $\lambda=1$ ,  $A=1\%$  и  $T/t_{снада} = 100$ .

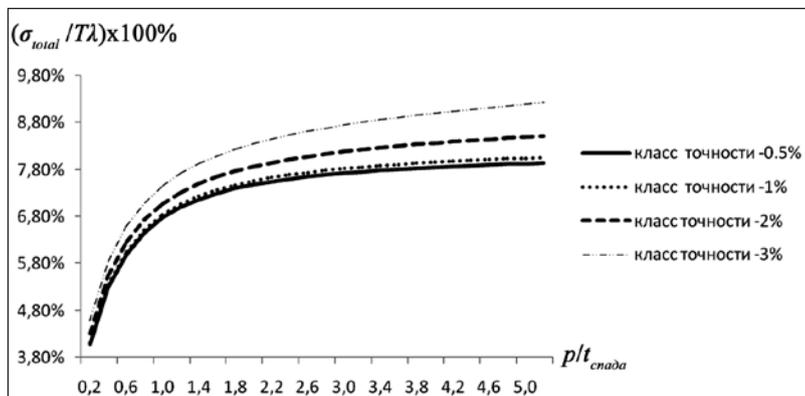


Рис. 3. Зависимость среднев квадратичной погрешности оценки учетного значения расхода  $(\sigma_{total}/T\lambda) \times 100$  от интервала времени  $p/t_{снада}$  при различном классе точности расходомера. Постоянные значения:  $\lambda=1$  и  $T/t_{снада} = 100$ .

Кривые рис. 4 показывают естественную тенденцию снижения погрешности учетного значения расхода при увеличении интервала времени, за который производится учет. В приведенном примере увеличение учетного интервала времени в четыре раза снижает погрешность оценки суммарного расхода за этот интервал вдвое.

Поскольку по оси ординат рис. 5 отложена относительная погрешность по отношению к имеющимся случайным колебаниям процесса изменения расхода потока во времени, то есть к  $\lambda$ , то его увеличение приводит к уменьшению относительной погрешности.

Таким образом, погрешности учетных значений расхода по известным погрешностям измерения дискретных текущих значений расхода и по принятой частоте их передачи в сервер для расчета учетного значения расхода за заданный интервал времени могут быть оценены по формуле (1), а примерное влияние на них разных параметров самого потока и расчетной схемы может быть получено рассмотрением графиков рис. 2–5.

**Дублирование оценки учетного значения расхода материального потока различными независимыми способами**

В наиболее ответственных случаях для уменьшения погрешности оценки и повышения ее достоверности учетное значение расхода потока определяется

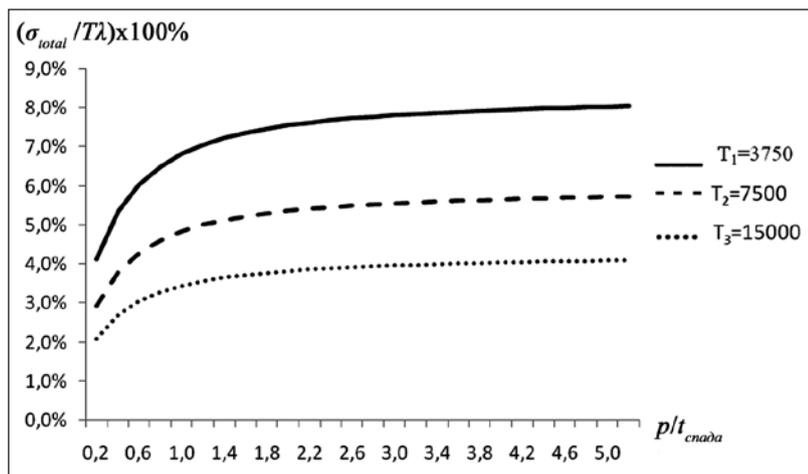


Рис. 4 Зависимость среднеквадратичной погрешности оценки учетного значения  $(\sigma_{total}/T\lambda) \times 100$  одного потока при различном интервале его учетного времени  $T$ , имеющего  $t_{снда} = 37,5$  (интервал учета меняется в диапазоне  $100 \dots 400 t_{снда}$ ), от интервала времени  $p/t_{снда}$ . Постоянные значения:  $\lambda = 1$  и  $A = 1\%$ .

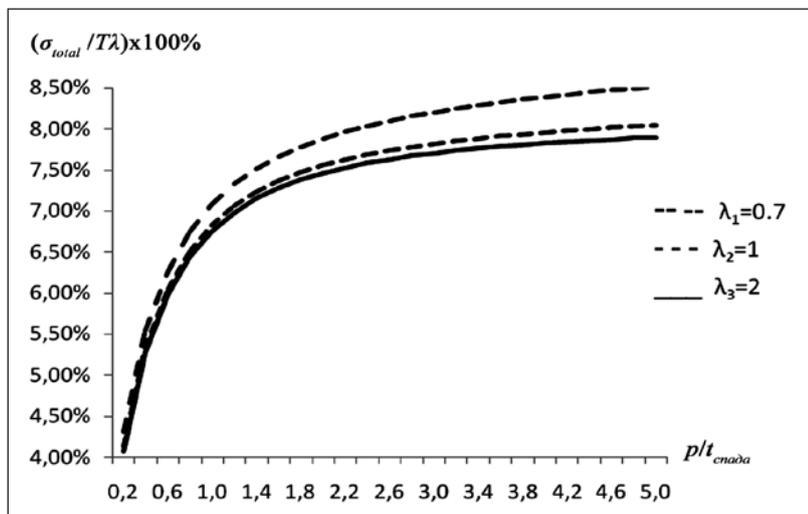


Рис.5. Зависимость среднеквадратичной погрешности оценки учетного значения расхода  $(\sigma_{total}/T\lambda) \times 100$  от интервала времени  $p/t_{снда}$  при различных по амплитуде случайных колебаниях расхода потока во времени (различных значениях  $\lambda$ ). Постоянные значения:  $T=3750$ ,  $t_{снда} = 37,5$  и  $A=1\%$ .

несколькими независимыми способами, причем это большей частью происходит не из-за дублирования приборов на транспортной линии потока (что является достаточно редким случаем), а естественным путем различных способов оценки учетного значения расхода потока. Например, оценкой учетного значения расхода потока его измерением и его вычислением по балансовым соотношениям в транспортной сети; измерением учетного значения расхода выходного потока агрегата и измерением изменения массы материала в хранилище, куда этот поток поступал. В общем случае фиксируются две оценки одного и того же потока, отличающиеся как по значению, так и по точности этого значения.

Пусть первая оценка учета потока  $X_1$  получена со среднеквадратичной погрешностью  $\sigma_1$ , и вторая

оценка учета этого же потока  $X_2$  имеет среднеквадратичную погрешность  $\sigma_2$ . Будем считать, что  $\sigma_2 \geq \sigma_1$ .

Если оценки расхода  $X_1$  и  $X_2$  отличаются друг от друга менее двух  $\sigma_2$ , то есть диапазоны оценок в значительной части совпадают, то исходные средства, по которым получены эти оценки, исправны и соответствуют указанным классам точности, а полученные оценки можно использовать для усреднения с целью уточнения значения расхода. При этом усреднение оценок целесообразно проводить с учетом их точности, то есть рассчитывать искомое значение расхода  $\tilde{X}$  по формуле:

$$\tilde{X} = \alpha_1 X_1 + (1 - \alpha_1) X_2,$$

$$0 < \alpha_1 < 1.$$

Тогда  $\sigma_1$ , обеспечивающее минимум дисперсии оценки  $\tilde{X}$ , находится из условия:

$$\min \sigma_{\tilde{X}}^2 = \alpha_1^2 \sigma_1^2 + (1 - \alpha_1)^2 \sigma_2^2,$$

то есть  $\frac{\partial \sigma_{\tilde{X}}^2}{\partial \alpha_1} = 2\alpha_1 \sigma_1^2 - 2(1 - \alpha_1) \sigma_2^2 = 0,$

откуда  $\alpha_1 = \frac{\sigma_2^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}.$

Значение искомого расхода:

$$\tilde{X} = \frac{\sigma_2^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} X_1 + \frac{\sigma_1^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} X_2.$$

Дисперсия оценки  $\tilde{X}$ :

$$\sigma_{\tilde{X}}^2 = \left( \frac{\sigma_2^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \right)^2 \sigma_1^2 + \left( \frac{\sigma_1^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \right)^2 \sigma_2^2 = \frac{\sigma_1^2 \sigma_2^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2},$$

а среднеквадратичная погрешность оценки  $\tilde{X}$ :

$$\sigma_x = \frac{\sigma_1 \sigma_2}{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}}.$$

Если при дублировании оценок показателя  $X$ , то есть при оценке показателя  $X$  двумя независимыми способами, их значения  $X_1$  и  $X_2$  отличаются друг от друга больше, чем на  $2\sigma_2$ , где  $\sigma_2 \geq \sigma_1$ , то истинное значение показателя с большой вероятностью не есть усредненное значение этих оценок. Такой результат сопоставления оценок свидетельствует, что либо в одну из оценок вкралась ошибка, либо одна из оценок получена от измерительных средств, которые не соответствуют указанному в них классу точности. В любом из этих случаев требуется детальная провер-

*Эксперт - это человек, который больше уже не думает; он знает.*  
 Фрэнк Хаббард

ка обоих способов оценки показателя и либо компенсация ошибки, либо перенастройка (или замена) тех средств, которые ответственны за имеющееся расхождение оценок. Только после нахождения неверной оценки другую оценку можно считать значением показателя  $X$ .

**Вычисление учетного значения расхода одного из продуктовых потоков технологического агрегата по балансовому уравнению**

В технологическом агрегате может производиться косвенная оценка суммарного расхода одного входного или выходного потока за заданный интервал времени по алгебраической сумме суммарных за это же время расходов остальных потоков этого агрегата. Необходимые условия правильности этой оценки:

— масса материала, находящегося в агрегате, примерно постоянна во времени, что справедливо для подавляющего большинства различных технологических агрегатов;

— преобразование сырьевых компонентов в агрегате не ведет к изменению их физического состояния (например, не происходит превращения жидкости в газ или пар);

— минимальный интервал времени, за который проводится учет расходов всех его материальных потоков  $\Delta t$ , должен значительно превосходить время всех переходных динамических режимов технологического процесса в агрегате, что позволяет пренебречь динамическими свойствами процесса. В подавляющем большинстве технологических процессов такой интервал времени находится в пределах смены.

Для суммарных значений расходов входных и выходных потоков агрегата за время  $\Delta t$  справедливо следующее балансовое уравнение:

$$\sum_{i=1}^{i=n} x_i(\Delta t) - \sum_{j=1}^{j=m} y_j(\Delta t) = 0,$$

где  $x_i(\Delta t)$  — суммарное значение расхода  $i$ -ого входного (сырьевого) потока за интервал времени  $\Delta t$  при общем числе сырьевых потоков  $n$ ,  $y_j(\Delta t)$  — суммарное значение расхода  $j$ -ого выходного (продуктового) потока за интервал времени  $\Delta t$  при общем числе продуктовых потоков  $m$ .

Отсюда непосредственно следует, что суммарный расход за время  $\Delta t$  одного сырьевого или продуктового потока можно вычислить по уравнению баланса для рассматриваемого агрегата. Так, например, учетное значение  $m$ -ого продуктового потока за интервал  $\Delta t$  определяется равенством:

$$y_m(\Delta t) = \sum_{i=1}^{i=n} x_i(\Delta t) - \sum_{j=1}^{j=m-1} y_j(\Delta t).$$

Если среднеквадратичная погрешность измерения суммарного расхода  $i$ -ого входного (сырьевого) потока за интервал времени  $\Delta t$  есть  $\sigma_i(\Delta t)$  при  $i=1...n$ , а среднеквадратичная погрешность измерения суммарного расхода  $j$ -ого выходного (продуктового) потока за интервал времени  $\Delta t$  есть  $\sigma_j(\Delta t)$  при  $j=1...m-1$ , то среднеквадратичная погрешность вычисляемой величины  $y_m(\Delta t) - \sigma_m(\Delta t)$  определяется следующим равенством:

$$\sigma_m(\Delta t) = \sqrt{\sum_{i=1}^{i=n} \sigma_i^2(\Delta t) + \sum_{j=1}^{j=m-1} \sigma_j^2(\Delta t)}.$$

**Вычисление учетного значения расхода материального потока, заполняющего/опорожняющего хранилище**

Косвенная оценка суммарного расхода потока, заполняющего/опорожняющего хранилище за заданный интервал времени может производиться по алгебраической сумме суммарных за это же время расходов остальных потоков, контактирующих с хранилищем, и изменению количества материала в хранилище за заданное время. Необходимое условие правильности этой оценки заключается в отсутствии неучтенных потоков в хранилище.

Для суммарных значений расходов входящих и выходящих потоков за время  $\Delta t$  справедливо следующее балансовое уравнение:

$$\sum_{i=1}^{i=n} x_i(\Delta t) + z(\Delta t) = 0,$$

где  $x_i(\Delta t)$  — суммарное значение расхода  $i$ -ого входящего (со знаком +) или выходящего (со знаком -) потока за интервал времени  $\Delta t$  при общем числе связанных с хранилищем потоков  $n$ ,  $z(\Delta t)$  — алгебраическое значение изменения массы материала в хранилище за интервал времени  $\Delta t$ .

Отсюда непосредственно следует, что суммарный расход за время  $\Delta t$  одного потока можно вычислить по уравнению баланса для рассматриваемого хранилища. Так, например, учетное значение  $n$ -ого потока за интервал  $\Delta t$  определяется равенством:

$$x_n(\Delta t) = \sum_{i=1}^{i=n-1} x_i(\Delta t) + z(\Delta t).$$

Если среднеквадратичная погрешность измерения суммарного расхода  $i$ -ого потока за интервал времени  $\Delta t$  есть  $\sigma_i(\Delta t)$  при  $i=1...n-1$ , а среднеквадратичная погрешность измерения изменения массы материала в хранилище за интервал времени  $\Delta t$  есть  $\sigma_x(\Delta t)$ , то среднеквадратичная погрешность вычисляемой величины  $x_n(\Delta t) - \sigma_n(\Delta t)$  определяется следующим равенством:

$$\sigma_n(\Delta t) = \sqrt{\sum_{i=1}^{i=n-1} \sigma_i^2(\Delta t) + \sigma_x^2(\Delta t)}.$$

**Вычисление учетных значений расходов ряда потоков в производственной транспортной сети**

Совместное определение учетных значений расходов потоков можно рассмотреть на примере участка производственной транспортной сети, состоящей из совокупности транспортных узлов разного типа (агрегатов, хранилищ, перекрестий потоков) и соединяющих их путей. Участок такой сети выделен из общей транспортной сети производства и приведен на рис. 6.

На этом участке измеряются исправными приборами суммарные расходы потоков  $X_1, X_2, X_7$  за заданный интервал времени и изменения количества материала в резервуарах 1 и 2 за этот же интервал времени. Ни неизвестных потерь, ни неучтенных потоков нет.

Пусть значения измеряемых суммарных потоков есть  $x_1, x_2, x_7$ , а изменения количества материала в резервуарах за анализируемый интервал времени равны  $z_1, z_2$ . Тогда учетные значения расходов в остальных путепроводах вычисляются из следующей системы уравнений:

$$\begin{aligned} x_3 &= x_1 + x_2; \\ x_4 &= x_3 + z_1; \\ x_5 &= x_7; \\ x_6 &= x_4 - x_5; \\ x_8 &= x_6 + z_2. \end{aligned}$$

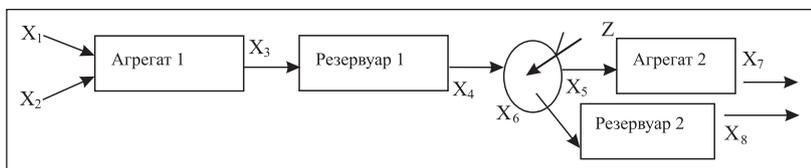


Рис. 6. Участок производственной транспортной сети, где Z – узел - перекрестие путепроводов;  $X_1 \dots X_8$  - путепроводы.

Если среднеквадратичные погрешности измерения суммарных расходов —  $x_1, x_2, x_7$  соответственно есть  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_7$ , а измерения изменений количества материала  $z_1, z_2$  имеют погрешности  $\sigma_9, \sigma_{10}$ , то погрешности вычисляемых учетных значений расходов определяются из указанной системы равенств:

$$\begin{aligned} \sigma_3 &= \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}; \\ \sigma_4 &= \sqrt{\sigma_3^2 + \sigma_9^2}; \\ \sigma_5 &= \sigma_7; \\ \sigma_6 &= \sqrt{\sigma_4^2 + \sigma_5^2}; \\ \sigma_8 &= \sqrt{\sigma_6^2 + \sigma_{10}^2}. \end{aligned}$$

**Заключение**

Приведенные в первой и второй частях данной статьи способы определения качественных и количественных ключевых показателей работы производства, алгоритмы их оценок и погрешностей этих оценок призваны способствовать совершенствованию внедряемых на предприятиях систем контроля и учета работы производства и, в частности, комплекса их КПЭ.

В то же время важно подчеркнуть, что анализ приведенных вариантов определения учетных значений расходов продуктовых и энергетических потоков применительно к конкретным свойствам автоматизируемого производства позволяет так установить число и места расположения измерительных приборов и выбрать их необходимый класс точности, чтобы сформировать эту группу КПЭ достаточно полно, с необходимой точностью и достоверностью; при этом достигая в целом экономию финансовых ресурсов на ее реализацию.

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

**Autodesk выпускает первую 3D-инструкцию для LEGO MINDSTORMS**

Autodesk Inventor Publisher поможет легче собирать программируемых роботов нового поколения.

Компания Autodesk, лидер в области разработки ПО для 3D-дизайна и проектирования, в сотрудничестве с компанией LEGO Group создает интерактивные 3D-инструкции по сборке программируемых роботов LEGO MINDSTORMS на новой платформе EV3. Комплект LEGO MINDSTORMS EV3 включает мобильное приложение с 3D-инструкцией и Web-сайт.

Интерактивная инструкция по сборке, доступная через мобильные приложения для устройств на iOS и Android, а также на сайте MINDSTORMS.COM, создана на базе технологии Autodesk Inventor Publisher и представляет собой альтернативу традиционным инструкциям. 3D-инструкция наглядно демонстрирует последовательность и методику сборки компонентов, делая понятным процесс сборки даже самых сложных роботов.

Программное обеспечение Autodesk Inventor Publisher предлагает альтернативу традиционной технической документации. Оно позволяет создавать интерактивные 3D-инструкции для iPad, устройств на Android и Web-сайтов, делая их более понятными. Используя приложение, юные строители роботов LEGO MINDSTORMS EV3 могут просматривать инструкцию в цифро-

вом виде, останавливая анимацию в нужных местах, увеличивая, уменьшая и вращая изображение, чтобы лучше понять позицию каждой детали в сборке. В качестве дополнительного интерактивного развлекательного элемента в инструкцию встроены вызываемые двойным кликом подсказки, рассказывающие о назначении каждого элемента конструкции, а также карта, которая позволяет в любой момент увидеть, какой именно элемент в данное время находится в работе.

В дополнение к знаменитым кирпичикам LEGO набор MINDSTORMS EV3 содержит множество других элементов, включая моторчики, инфракрасные сенсоры и даже программируемый микрокомпьютер, что позволяет детям создавать роботов, способных двигаться, ходить и выполнять любые запрограммированные действия. LEGO MINDSTORMS EV3 будет включать интерактивные 3D-инструкции по сборке для пяти различных роботов, в том числе гуманоида EV3RSTORM, стреляющего шариками во время ходьбы, скорпионоподобного SPIK3R, способного находить инфракрасные маячки, и змееподобного R3PTAR, который ползает, трясется и наносит удары.

<http://www.lego.com> [www.autodesk.ru](http://www.autodesk.ru)