

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КОЛИЧЕСТВЕННОГО ОЦЕНИВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

© 2005 Р.В. Буткевич, Ю.С. Клочков, Т.С. Яницкая, С.А. Ярыгин

Самарский государственный аэрокосмический университет

Рассмотрены основные недостатки существующих методик количественной оценки технологических процессов. Предложены методические основы для устранения упомянутых недостатков и разработаны алгоритмы оценки. Определены механизмы выбора показателей качества по уровню параметра Срк.

Анализ существующих методик количественного оценивания технологических процессов

В настоящее время одним из наиболее передовых методов построения системы эффективного управления деятельностью организации является процессный подход к управлению. Последний заключается в выделении в организации сети процессов и управления этими процессами для достижения максимальной эффективности деятельности организации. Исключением не стали и производственные процессы.

Производственный процесс представляет собой совокупность технологических процессов, которые являются его основной частью и представляют собой взаимосвязанные действия (операции) технологической системы (ТС) в отношении предмета труда с целью изготовления из него продукции. Технологические процессы относят к так называемым бизнес-процессам, процессам, создающим ценность для потребителя.

Технологическая система является системой нижнего уровня по отношению к производственной системе (производственному процессу), что в свою очередь определяет порядок анализа и последующих улучшений.

Современное управление технологической системой (производственной системой) строится на известном цикле Э. Деминга (цикл PDCA): планирование (Plan) > выполнение, реализация (Do) > проверка (Check) > действие (Action). Выходные данные одной стадии является входными данными для осуществления последующей. При этом стадию проверки (Check) можно

назвать контрольной или оценочной – именно на данной стадии осуществляется оценка функционирования ТС, ее стабильность и результативность. Точность оценки определяет инструмент воздействия на систему (производственную, технологическую), и чем точнее оценка, тем эффективнее управление данной ТС.

С другой стороны, к оценке процессов организации производителя подталкивает не только требования эффективности управления, что в итоге выливается в увеличение прибыли, но и требования потребителя. Часто возникает ситуация, когда при заключении контракта оговаривается допустимый уровень дефектности выпускаемой продукции. Возросшие требования потребителя и его грамотность в вопросах обеспечения качества заставляют производителя принимать решения по управлению технологическими процессами, опираясь на факты, т.е. на результаты измерений функционирования ТС и их последующие оценки.

При оценивании результативности функционирования ТС, иными словами, при оценивании качества технологического процесса (ТП), контролируются и измеряются параметры выполняемых технологических операций и переходов, последовательность их выполнения, а также технические элементы технологической системы и факторы, оказывающие влияние на основные технологические показатели, на характеристики безопасности технологических процессов и на качество изготавливаемой продукции.

Как показал анализ работ отечественных и зарубежных авторов, наиболее распространенной моделью оценки качества технологи-

ческого процесса является модель на основе операционного свертывания с применением экспертных методов по определению коэффициентов весомости [1]. Среди моделей свертывания преобладают сепарабельная или аддитивная модель (1) и (2) соответственно

$$f(\bar{\mu}) = \sum_{i=1}^n l(\lambda_i) \cdot f(\bar{\mu}_i), \quad (1)$$

$$\bar{\mu} = (\bar{\lambda}, \bar{\mu}), \quad (2)$$

где $\bar{\mu}$ – общая мера качества объекта; l – функция весомости; λ_i – коэффициент весомости; μ_i – частная мера качества; $(\bar{\lambda}, \bar{\mu})$ – скалярное произведение весомостей и частных мер качества.

Технологическая системы состоит из различного рода элементов, что в свою очередь определяет необходимость оценки каждого элемента системы в отдельности, а это приводит к необходимости проведения комплексной оценки ТС. Наиболее приемлемыми для выполнения оценки являются количественные шкалы (шкала разности, шкала отношений и т.д.). Представление оценок в данных шкалах позволяет применять к ним в дальнейшем операции сравнения, отношения, разности.

Комплексная оценка $\bar{\mu}$ ТС может быть определена по совокупности следующих основных оценок мер качества (показателей качества) технологического процесса μ_i [2]:

- 1) $K_{\text{тд}}$ – оценка соответствия технологической документации (ТД) установленным требованиям.
- 2) $K_{\text{н}}$ – оценка технологического процесса по техническим характеристикам его исполнения (точности, стабильности, надежности и т.п.).
- 3) $K_{\text{п}}$ – оценка ТП по показателям качества произведенной продукции.
- 4) $K_{\text{нту}}$ – оценка научно-технического уровня ТП.
- 5) $K_{\text{н}}$ – оценка ТП по соответствию назначению.
- 6) $K_{\text{пр}}$ – оценка ТП по показателям производительности.
- 7) $K_{\text{р}}$ – оценка ТП по ресурсоемкости

изготовления продукции.

8) $K_{\text{от}}$ – оценка ТП по соответствию требованиям безопасности.

9) $K_{\text{ж}}$ – оценка соответствия ТП экологическим требованиям охраны окружающей среды.

Оценка основных показателей качества μ_i осуществляется на основании выражения [1]

$$\mu_i = \frac{\sum_{j=1}^n \mu_j}{n} = \frac{\mu_1 + \mu_2 + \dots + \mu_n}{n}, \quad (3)$$

где μ_j – единичный показатель, характеризующий единичное свойство технологического процесса; n – количество единичных показателей, характеризующих основное свойство технологического процесса.

Оценка показателей μ_j производится по одной шкале (например, значение показателя – балл).

Расчет комплексного показателя в соответствии с (2) осуществляется следующим способом (4):

$$\bar{\mu} = \lambda_1 \cdot \mu_1 + \lambda_2 \cdot \mu_2 + \dots + \lambda_i \cdot \mu_i, \quad (4)$$

где λ_i – коэффициент весомости (значимости) соответствующий показателю качества μ_i .

Данный подход является типовым и применяется в квалиметрии для оценки технического уровня качества промышленных изделий. Такое же применение его к технологическому процессу приводит к ошибочным оценкам. Покажем это.

Пусть имеется две оценки ТС $\bar{\mu}^A$ и $\bar{\mu}^B$, произведенные в различные промежутки времени t_1 и t_2 . Причем $\bar{\mu}^A = \bar{\mu}^B$. Тогда из выражения (4) следует

$$\bar{\mu}^A = \lambda_1 \cdot \mu_1^A + \lambda_2 \cdot \mu_2^A + \dots + \lambda_i \cdot \mu_i^A, \quad (5)$$

$$\bar{\mu}^B = \lambda_1 \cdot \mu_1^B + \lambda_2 \cdot \mu_2^B + \dots + \lambda_i \cdot \mu_i^B, \quad (6)$$

$$\bar{\mu}^A = \bar{\mu}^B > \lambda_1 \cdot \mu_1^B + \lambda_2 \cdot \mu_2^B + \dots + \lambda_i \cdot \mu_i^B. \quad (7)$$

Пусть за время $\Delta t = t_2 - t_1$ изменились только значения показателей качества μ_1^i и μ_2^i , тогда система (7) примет вид

$$\bar{\mu}^A = \lambda_1 \cdot \mu_1^A + \lambda_2 \cdot \mu_2^A = \lambda_1 \cdot \mu_1^B + \lambda_2 \cdot \mu_2^B = \bar{\mu}^B. \quad (8)$$

Данная система имеет бесконечное множество решений. При принятии показателем качества уровня $\mu_1^B = Z$, показателю μ_2^B достаточно быть равным

$$\mu_2^B = \frac{\bar{\mu}^A - \lambda_1 \cdot Z}{\lambda_2}. \quad (9)$$

Тогда оценка не “почувствует” изменения, произошедшие в функционировании технологического процесса. Можно показать, что при изменении во времени большего количества показателей качества условие $\bar{\mu}^A = \bar{\mu}^B$ будет выполняться с вероятностью $P > 0$, т.е. возможна компенсация изменения одной меры качества другой мерой. Использование комплексного показателя, который осуществляет свертку качественно различных показателей – нормативных (значение показателя не изменяется во времени, при достижении нормативного уровня; в дальнейшем не отражает состояние процесса в течение времени), функциональных, показателей безопасности, приводит к снижению точности оценки, потери целевого назначения оценивания и усложняет проведение самой процедуры.

Разработка методических основ количественной оценки качества технологических процессов

Решение данной проблемы можно построить на следующих принципах:

а) принцип многоуровневой оценки – оценка функционирования технологического процесса осуществляется на двух уровнях (базовый уровень, требуемый уровень);

б) принцип разделения показателей качества – деление показателей качества по уровням оценки как на основании назначения показателя качества, так и на основании величин принимаемых значений показателями качества;

в) принцип последовательности оценки – при достижении базового уровня, возможен переход к оценке требуемого уровня.

Построение методики количественной оценки на данных принципах позволит точнее оценивать результативность ТС. Алгоритм проведения оценки приведен на рис. 1.

При осуществлении оценки все показатели качества ТС разделяют на два перечня:

1. Перечень статичных показателей –

сюда относят показатели качества, характеризующие свойства элементов ТС, определяющие допустимые нормативные уровни элементов системы (показатели безопасности ТС, нормоконтроля ТД, комплектности ТД, максимально допустимые уровни потенциальной экологической безопасности ТП и т.п.)

2. Перечень динамических показателей – показатели качества, не устанавливающие нормативные уровни элементов и характеризующие назначение ТС (показатели стабильности ТС, показатели надежности, производительности).

Для показателей второго перечня определяют базовые уровни, соответствующие минимально допустимому уровню качества ТП, позволяющего выпускать продукцию с требуемым уровнем качества.

На первом этапе осуществляется оценка ТП по первому уровню перечню показателей качества. При достижении всеми показателями качества требуемых нормативных уровней считается, что ТП функционирует на базовом уровне, оценка в данном случае равна нулю. В противном случае, когда хотя бы один показатель не удовлетворяет установленному уровню оценка не продолжается, так как ТП функционирует с нарушением установленных норм.

На втором этапе осуществляется оценка показателей качества в соответствии с методикой оценки простых свойств и свертывания их в комплексную оценку [3]. Итогом данного этапа и будет составлять оценка качества технологического процесса, которая и определит управленческие решения.

Анализ показателей серии Ср

Немаловажной составляющей оценки качества ТС является выбор показателей качества, особенно тех, которые отражают основное назначение технологического процесса – изготовление продукции.

Зная требования к качеству выпускаемой продукции, можно установить нормативные уровни годной продукции на каждом процессе. Тогда необходим комплексный показатель, который в условных единицах позволял бы оценивать качество процесса в зависимости от величины его рассеяния и смещения. Для расчета такого показателя необходимо подобрать функцию, которая удовлетворяла бы

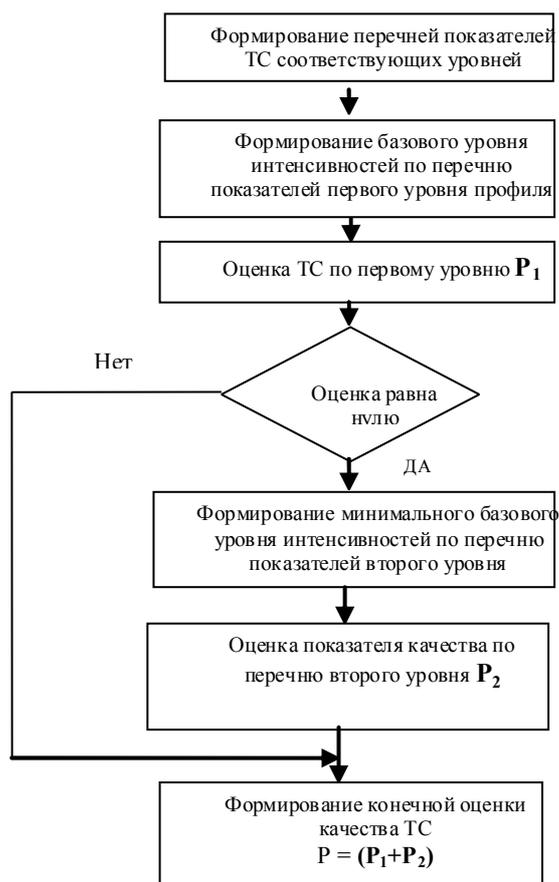


Рис. 1. Алгоритм оценки технической системы

следующим требованиям: оценка должна базироваться на измерении нескольких независимых показателей, характеризующих текущие настройки процесса; разрабатываемый показатель должен быть доступным для применения на практике, не требуя специальной подготовки от персонала. Чаще всего в роли такого показателя выступает $C_{рк}$, рассмотрим его более подробно.

При заданных границах поля допуска верхней контрольной границы (ВКГ) и нижней контрольной границы (НКГ) для признака X на этапе производства необходимо оценивать качество его исполнения. Уровень качества зависит от того, насколько велика доля изделий, для которых признак X находится в поле допуска (НКГ; ВКГ). На практике часто о качестве процесса судят по показателям серии C_p [4].

Расчет показателя C_p ведется по формуле

$$C_p = \frac{ВКГ - НКГ}{6\sigma} \quad (10)$$

Чем больше значение коэффициента C_p ,

тем больше заданный допуск по сравнению с естественным рассеянием процесса, то есть протяженностью бу интервала (НКГ; ВКГ), на который приходится 99,73% значений признака X , имеющего распределение с $(\bar{X}; y^2)$ [4].

Коэффициент C_p не зависит от уровня настройки процесса, его можно интерпретировать как потенциальную меру качества процесса при его оптимальном центрировании.

За реальную характеристику уровня качества технологического процесса принимают показатель $C_{рк}$, который рассчитывается по формуле

$$C_{рк} = (1 - K)C_p \quad (11)$$

$$K = \frac{\left| \frac{ВКГ + НКГ}{2} - \bar{X} \right|}{\frac{ВКГ - НКГ}{2}} \quad (12)$$

где K – является безразмерной величиной, характеризующей различие между действительным и оптимальным уровнем настройки процесса.

Чем меньше K , тем ближе уровень настройки к оптимальному. Если K превышает единицу, то \bar{X} лежит вне поля допуска. Одним из недостатков этого коэффициента можно отметить то, что он не ограничен сверху, и теоретически может изменяться в пределах $(0; +\infty)$.

Коэффициент $C_{рк}$ является функцией параметров \bar{X} и y . В точке $\bar{X} = \frac{ВКГ + НКГ}{2}$

принимает максимальное значение, равное C_p , а в точках $\bar{X} = НКГ$ и $\bar{X} = ВКГ$ обращается в ноль. Если $\bar{X} \in [НКГ; ВКГ]$, то $C_{рк}$ лежит между 0 и C_p , в противном случае он имеет отрицательное значение. Таким образом показатель $C_{рк}$ ограничен сверху показателем C_p , а снизу может меняться до $-\infty$. В свою очередь показатель C_p сверху не ограничен, а снизу имеет предел равный нулю. Используя только показатель $C_{рк}$ неудовлетворительно протекающего производственного процесса нельзя определить, не имея другой информации, объясняются ли нарушения хода процесса его большим рассеянием или плохим регулированием уровня настройки, это возможно сделать, только исследуя в со-

вокупности природу изменения всех показателей серии Ср [4]. За время работы с показателем Ср_к как основным, определяющим качество технологического процесса, по показаниям которого принимались соответствующие управленческие решения, были обнаружены его следующие недостатки в некоторых частных случаях

1. Нечувствительность показателя к увеличению доли брака; при изменении процесса, как показано на рис. 2, показатель Ср_к остается неизменным, так как он является односторонним [5]. При этом меняется как \bar{X} так и σ .

2. Рост показателя в момент, когда доля неисправного брака или приносящего более существенные потери увеличивается.

При изменении процесса, как показано на рис. 3, показатель Ср_к возрастает, так как доля брака слева остается меньше, чем справа, и доля брака справа снижается. Но на практике часто бывает ситуация, когда выход за одну из границ ведет, например, к некоторому перерасходу материала, а за другую к забраковке всей партии, или к более существенным экономическим потерям предприятия. При этом меняется только значение \bar{X} .

Такие недостатки показателя ведут к неверным принимаемым управленческим решениям, поэтому существует необходимость в разработке таких показателей, которые в данных частных случаях могли бы достоверно отобразить уровень качества технологического процесса [5].

Для расчета такого показателя необхо-

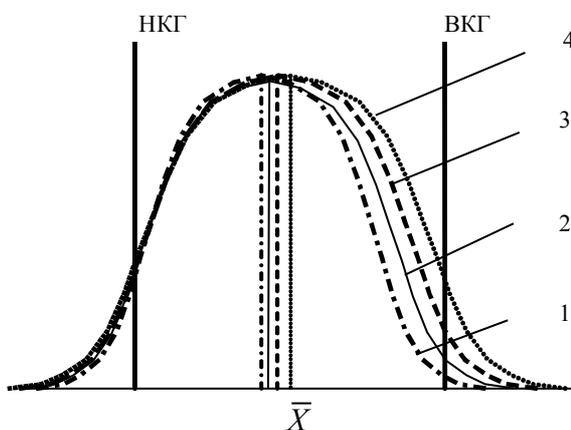


Рис. 2. Вид кривых описывающих состояние технологического процесса: 1, 2, 3, 4 – состояния технологического процесса

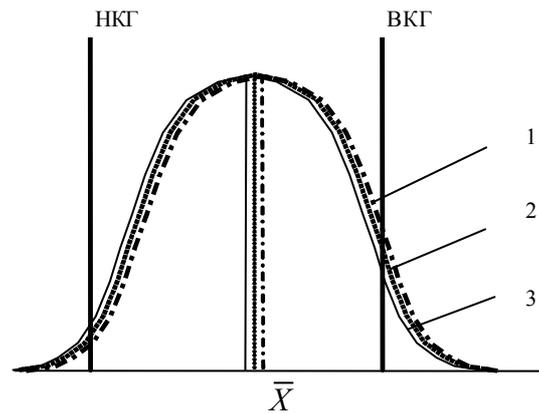


Рис. 3. Кривые нормального распределения, характеризующие технологический процесс: 1, 2, 3 – состояния технологического процесса

димо подобрать функцию, которая удовлетворяла бы следующим требованиям: оценка должна базироваться на измерениях нескольких независимых показателей, характеризующих текущие настройки процесса; разрабатываемый показатель должен быть доступным для применения на практике, не требуя специальной подготовки от персонала.

Для решения указанного выше первого недостатка введем новый показатель.

За показатель качества для рассеивания процесса Q_p можно взять разницу между действительной долей годных изделий P_d и такой же долей, но в случае центрированного процесса P_{цд} (т.е. при совпадении математического ожидания и середины поля допуска). Расчет действительной доли годных изделий известен, он сводится к формуле [4]

$$P_d = \Phi\left(\frac{ВКГ - \bar{X}}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{НКГ - \bar{X}}{\sigma}\right). \quad (13)$$

Для расчета P_{цд} необходимо определить смещение математического ожидания относительно середины поля допуска

$$\Delta = \bar{X} - \frac{ВКГ + НКГ}{2}. \quad (14)$$

Найдем ВКГ' и НКГ' для центрированного процесса:

$$ВКГ' = ВКГ + \Delta, \quad НКГ' = НКГ + \Delta.$$

Тогда

$$P_{цд} = \Phi\left(\frac{ВКГ' - \bar{X}}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{НКГ' - \bar{X}}{\sigma}\right). \quad (15)$$

Действительно, в этом случае вероятность $R_{цд}$ будет таковой как при совпадении математического ожидания и середины поля допуска. Тогда показатель можно представить в виде

$$Q_p = [1 - (R_{цд} - R_d)]. \quad (16)$$

Очевидно, что на практике $R_{цд}$ будет всегда больше R_d .

За показатель качества, характеризующий способность процесса удовлетворять принятым требованиям, можно использовать отношение

$$Q_c = R_{цд} / R_c. \quad (17)$$

где R_c – целевое (стандартное) значение, установленное внутри предприятия.

Кроме описанных, предлагается использовать показатель, отражающий энтропию процесса, который будет характеризовать увеличение количества возможных исходов. Использование степени неопределенности позволит в случаях долговременных наблюдений охарактеризовать разлаженность процесса, связанную со старением технологического оборудования:

$$Q_{\varepsilon} = 1/H, \quad (18)$$

где H – энтропия системы.

Комплексный показатель рассчитывается по формуле

$$Q = Q_p Q_c Q_{\varepsilon}. \quad (19)$$

Сравнение показателей

Очевидно, что показатель Q_p по характеру будет вести себя также как и показатель $(1-K)$ рассчитываемый при вычислении $S_{рк}$, его отличием от $(1-K)$ будет то, что Q_p ограничен как снизу так и сверху и изменяется в пределах от 0 до 1, тогда как $(1-K)$ изменяется от $-\infty$ до 1.

Проведем сравнение этих показателей на примере, в котором $S_{рк}$ остается всегда неизменным и равным 0,33, $ВКГ=50$, $НКГ=10$, а \bar{X} изменяется от 11 до 49 включительно с шагом 1.

Показатель $(1-K)$ ведет себя, как показано на рис. 4.

Как видно, он имеет характер линейного изменения. Поясним графически (рис. 5).

Показатель $(1-K)$ графически можно представить как $(1 - \frac{a}{\sigma})$, поэтому он изменя-



Рис. 4. Характер поведения показателя $(1-K)$

ется в нашем примере по линейному закону.

Как показывают расчеты, показатель Q_p ведет себя следующим образом (рис. 6).

Такой характер изменения можно пояснить тем, что Q_p учитывает не линейное изменение расстояния d относительно f (рис. 5), а работает с площадями под кривой, как показано на рис. 7. $Q_p = 1 - (S_1 - S_2)$.

Как показывает корреляционный анализ, показатели $(1-K)$ и Q_p имеют степень корреляции равную 0,96.

Из анализа также видно, что u и \bar{X} изменяются по линейному закону (рис. 8).

Для проведения анализа поведения показателей Q и $S_{рк}$ построим графики их поведения (рис. 9).

Как видно из рисунка показатель $S_{рк}$ не изменяется, тогда как Q имеет тенденцию к снижению. Такой характер поведения показателя Q объясняется тем, что происходит увеличение вероятности доли браковочной продукции и происходит рост u , что говорит об увеличении не только смещения \bar{X} отно-

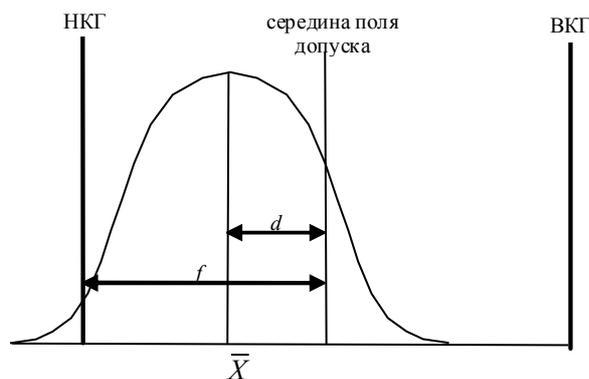


Рис. 5. Метод расчета показателя $(1-K)$

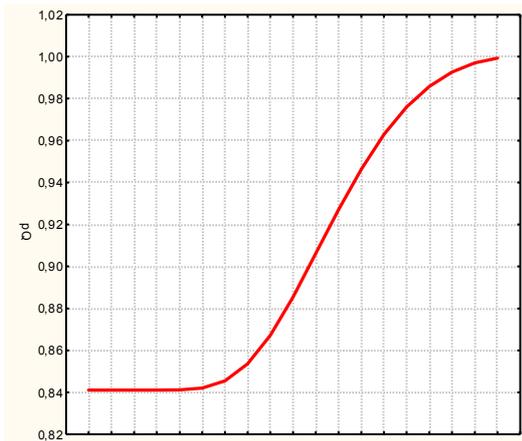


Рис. 6. Характер изменения показателя Qp

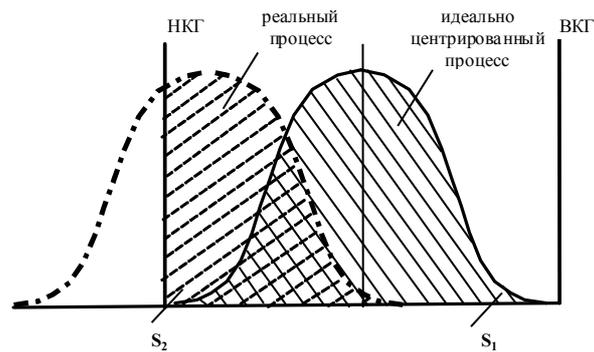


Рис. 7. Метод расчета показателя Qp

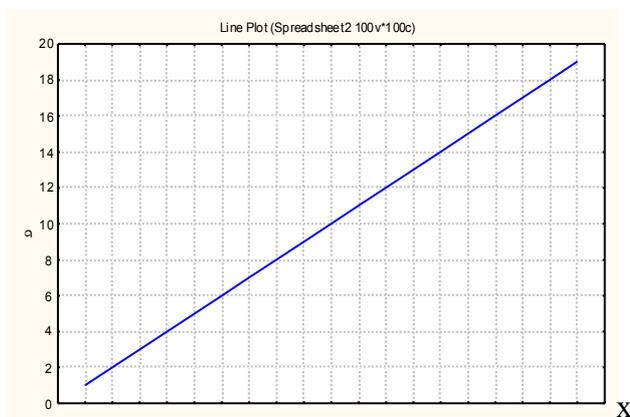


Рис. 8. Характер изменения u и \bar{X}

сительно середины поля допуска, но и изнашивании технологического оборудования. В случае, когда качество технологического оборудования не изменялось (т.е. u не увеличивалась и, следовательно, энтропия не имела тенденцию роста), график кривой Q совпадал бы с кривой R_d .

В случае, когда возникает второй недостаток показателя $S_{рк}$, необходимо воспользоваться следующим методом оценки уровня качества (рис. 10).

В этом случае необходимо рассчитывать показатель качества $Q_{эк}$ следующим образом:

$$Q_{эк} = P_1 \mathcal{E}_1 + P_2 \mathcal{E}_2, \quad (20)$$

где P_1 – вероятность выхода продукции за НКГ, P_2 – вероятность выхода продукции за ВКГ, \mathcal{E}_1 – экономические потери, связанные с выходом продукции за НКГ, \mathcal{E}_2 – экономические потери, связанные с выходом продукции за ВКГ.

Если первое слагаемое $Q_{эк}$ рассчитать будет не сложно, так как независимо от удаления от НКГ экономические потери изме-

няться не будут, то с другой стороны чаще всего будет возникать иная картина.

Поэтому $P_1 \mathcal{E}_1$ необходимо рассчитывать следующим образом:

$$P_1 \mathcal{E}_1 = \sum p_i \mathcal{e}_i, \quad (21)$$

где p_i – вероятность появления заранее предполагаемого перерасхода материала, \mathcal{e}_i – экономические потери, связанные с данным конк-

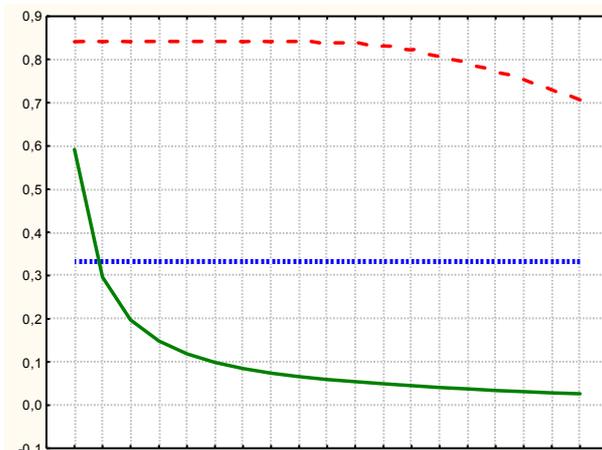


Рис. 9. Сравнение показателей

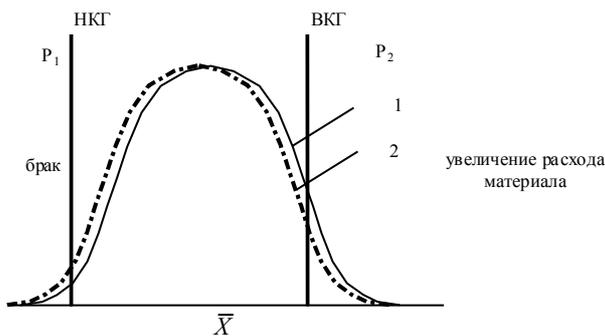


Рис. 10. Изменение состояние технологического процесса во времени:
1, 2 – состояния технологического процесса

рентным уровнем перерасхода материала (расчитанные на единицу продукции).

Кроме того, следует учитывать объем выпускаемой продукции V .

$$\text{Тогда } Q_{эк} = V(\sum p_1 \varepsilon_1 + P_2 \varepsilon_2).$$

Область применения данной методики

Методические основы количественной оценки технологического процесса могут служить основой построения методики многоуровневой оценки качества ТП. Разделение показателей качества на статистические и динамические позволяет сужать поиск проблем в функционировании ТС и принимать верные управленческие решения.

Разработанные количественные показатели качества применимы в случаях, когда технологический процесс подчиняется нормальному закону распределения. Кроме того, как показывает практика показатель Q лучше использовать в тех случаях, где вероятность выхода годных изделий невысока, т.е. при показателе $C_{рк} = 0,5$ и менее, в других случаях удоб-

нее пользоваться принятыми показателями серии $C_{рк}$. Показатель $Q_{эк}$ применим там, где выход за одну из границ будет связан с браком продукции, а выход за другую с экономическими потерями, или в общем случае, когда потери за счет выхода изделия за одну границу поля допуска неравны потерям в случае выхода изделия за другую границу поля допуска. В частности, такой показатель применим на производстве проводов, где из-за уменьшения диаметра провода бракуется вся партия, а из-за увеличения происходит перерасход, как материала токопроводящей жилы, так и изолирующих веществ.

Таким образом, анализ качества технологического процесса является сложной задачей, решение которой зависит от грамотного применения методик оценки, а также грамотного выбора показателей качества.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федюкин В.К. Управление качеством процессов. СПб.: Питер, 2004.
2. Зорин Ю.В., Ярыгин В.Т. Системы качества и управления процессами. Самара: СПИ, 1997.
3. Азгальдов Г.Г., Райхман Э.П. О квалитметрии. М.: Издательство стандартов, 1973.
4. Х.-Й Миттаг, Х. Ринне. Статистические методы обеспечения качества. М.: Машиностроение, 1995.
5. А.Н. Чекмарев, В.А. Барвинок, В.В. Шалавин. Статистические методы управления качеством. М.: Машиностроение, 1999.

THE METHODOLOGICAL PRINCIPLES OF QUANTITATIVE EVALUATION OF TECHNOLOGICAL PROCESS

© 2005 R.V. Butkevitch, Y.S. Klotchkov, T.S. Janitscay, S.A. Jarygin

Samara State Aerospace University

The article deals with the main drawbacks of the existing methods of quantitative evaluation of technological systems. The methodological principles for the solution of the mentioned drawbacks are suggested and an evaluation algorithm is developed. The mechanism for choosing quality measures on basis of the level of the index $C_{рк}$ and distinctive features of technological process is determined.