**Кравченко Е. Г., Отряскина Т. А., Шершнёв А. А.**
**E. G. Kravchenko, T. A. Otryaskina, A. A. Shershnev**

# ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРОИЗВОДСТВ

# QUALITY ASSESSMENT OF ENGINEERING PRODUCTION PROCESSES

**Кравченко Елена Геннадьевна** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Машиностроение» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: ek74@list.ru.
**Elena G. Kravchenko** – PhD in Engineering, Assistant Professor, Mechanical Engineering Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: ek74@list.ru.

**Отряскина Татьяна Александровна** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Машиностроение» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: knastu2000@mail.ru.
**Tatyana A. Otryaskina** – PhD in Engineering, Assistant Professor, Mechanical Engineering Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: knastu2000@mail.ru.

**Шершнёв Алексей Александрович** – студент Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).
**Alexey A. Shershnev** – Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

**Аннотация.** Применение типовых квалиметрических подходов для оценки качества промышленной продукции не даёт достоверных результатов при анализе качества технологических процессов, поскольку при их протекании происходит ряд динамических изменений, измерение которых существующими методиками даёт лишь приблизительную оценку. При этом не учитывается, что изменение одних показателей качества при осуществлении технологического процесса может быть скорректировано изменением других показателей. Разработана методика оценки качества технологических процессов, отличительной особенностью которой является применение безразмерного обобщённого показателя, учитывающего совокупность его характеристик (технических, экономических, эргономических и др.), а также использование подхода, базированного на оценке процессов по шкале значимости Харрингтона.

**Summary.** The use of typical qualimetric approaches for assessing the quality of industrial products does not give reliable results in analyzing the quality of technological processes, since during their course there are a number of dynamic changes, the measurement of which by existing methods gives only an approximate estimate. It does not take into account that the change in some quality indicators in the implementation of the techno-logical process can be corrected by the change in other indicators. A methodology for assessing the quality of technological processes has been developed, a distinctive feature of which is the use of a dimensionless generalized indicator that takes into account the set of its characteristics (technical, economic, ergonomic and others), as well as the use of an approach based on the assessment of processes on the Harrington significance scale.

**Ключевые слова:** технологические процессы машиностроительного производства, показатели качества, критерии оценки качества, функция желательности, шкала значимости.

**Key words:** engineering production processes, quality indicators, quality assessment criteria, desirability function, significance scale.

УДК 336.27

## Введение

Качество любой промышленной продукции является комплексным понятием и определяется целым рядом критериев, важнейшим из которых является уровень качества технологического процесса. В свою очередь, высокое качество технологического процесса достигается уровнем ка-

чества лежащей в его основе технологической системы, систем контроля и управления, применяемых технологий, инфраструктурой производства, включая обслуживающий персонал.

При оценивании качества технологических процессов необходимо учитывать особенности применяемой технологической системы. При использовании одинаковых материалов и технологий процессы в различных технологических потоках могут протекать с различными показателями точности и устойчивости, поэтому возникает необходимость введения показателя, учитывающего свойства технологической системы и позволяющего оценить вероятность осуществления технологических операций в контролируемых условиях, соответствующих технологическому регламенту и гарантирующих выпуск качественной продукции.

**Методика оценки качества технологического процесса**

Анализ существующих стандартных методик оценки качества технологического процесса [1–4] показал, что функция желательности Харрингтона [5; 6] является самым оптимальным методом определения отклика – обобщённого показателя уровня качества технологических процессов. При построении функции Харрингтона необходимо произвести конвертирование натуральных значений от частных откликов в безразмерную шкалу.

В соответствии с классификацией шкала желательности относится к классу психофизических (субъективных) шкал и предназначена для выявления тождественности между физическими и нефизическими характеристиками оцениваемого технологического процесса. При этом отклики, характеризующие протекание самого технологического процесса, являются его физическими параметрами, а экспертные оценки желательности значения отклика – нефизическими.

Существующие стандартные таблицы тождественности (соответствия) [1; 5; 6], в которых представлены соотношения желательности в числовой и эмпирической системах, можно идентифицировать как готовые шкалы желательности.

По определению [1], функция желательности ($d$) рассматривается в качестве значения частного отклика, переведённого в безразмерную шкалу. Анализируя данные, представленные в табл. 1, можно сделать вывод, что желательности «очень хорошо» соответствует оценка по шкале желательности $1 \geq d \geq 0{,}8$, а желательности «очень плохо» – $0 \leq d \leq 0{,}2$ и т.д.

Таблица 1

Стандартные оценки по шкале желательности

| Желательность | Оценка по шкале желательности | Значения желательностей | Кодированные значения для стандартной кривой по шкале желательности |
|---|---|---|---|
| | | $d$ | $y^i$ |
| Очень хорошо | 0,81 – 1,00 | 1,00 | 3,00 |
| Хорошо | 0,64 – 0,80 | 0,80 | 1,50 |
| Удовлетворительно | 0,38 – 0,63 | 0,63 | 0,85 |
| Плохо | 0,21 – 0,37 | 0,37 | 0,00 |
| Очень плохо | 0,00 – 0,20 | 0,20 | –0,50 |
| | | 0,00 | –3,00 |

Рекомендовано применять следующие виды диапазонов существования частных откликов:

- односторонние ($y_n \leq y_{\max}$ или $y_n \geq y_{\min}$);
- двусторонние ($y_{\min} \leq y_n \leq y_{\max}$).

Если наблюдается одностороннее ограничение, то к числу параметров относятся следующие характеристики качества технологического процесса: ремонтопригодность, сохраняемость, долговечность, работоспособность. И для указанных значений свойств ограничение имеет вид $y_n \geq y_{\min}$.

Ещё один диапазон одностороннего ограничения $y_n \leq y_{\max}$ применим для таких характеристик технологического процесса, как степень загрязнения окружающей среды, уровень шума, взрывобезопасность, уровень токсичности и ряд других подобных.

Обобщённая функция желательности ($D$) вычисляется как среднее геометрическое из частных функций предпочтительности $d$, при этом необходимо учитывать весомость каждого свойства:

$$D = \sqrt[n]{\prod_{u=1}^{n} d_u^{\beta_u}}, \quad (1)$$

где $n$ – число свойств технологического процесса; $\beta_u$ – коэффициент весомости свойства технологического процесса; $u$ – номер свойства в ранжированной последовательности свойств.

При проведении экспертной оценки рекомендовано руководствоваться мнением нескольких специалистов [2]. При обобщении ряда оценок, установленных экспертами, необходимо использовать метод ранговой корреляции [1; 3; 4].

Преобразование натуральных значений показателей качества ($y$) в частную безразмерную шкалу желательности ($d$) осуществляется по формуле [5; 6]

$$d = (e^{-e})^{-y}, \quad (2)$$

где $y$ – кодированное, взятое в условном масштабе значение частного показателя.

На основании экспертных оценок уровень качества технологического процесса рекомендовано определять по критериям, представленным в табл. 2.

Таблица 2

Критерии при оценивании качества технологического процесса

| $y_n$ | Свойства показателей качества ТП (частный отклик) | Определение свойств | Критерии |
|---|---|---|---|
| *1* | *2* | *3* | *4* |
| $y_1$ | Точность | Точность – свойство обеспечивать близость действительных значений параметров технологического процесса к нормируемым их значениям. *Кт* характеризует степень соответствия поля рассеяния контролируемого параметра полю допуска на этот параметр. Процесс считается точным, если коэффициент точности *Кт* < 1, т.е. поле рассеяния контролируемого параметра должно быть меньше поля допуска на этот параметр. Если *Кт* > 1, то процесс признаётся неточным (есть вероятность появления брака) | $0 \le y_n \le 1$ |
| $y_2$ | Стабильность | Стабильность – это свойство технологического процесса, обусловливающее постоянство распределений вероятности его параметров в течение некоторого интервала времени без вмешательства извне. А при $0 < Кс < 0{,}5T$ процесс считается стабильным и необходимы только предупреждающие действия. Технологический процесс считается стабильным при $Кс \to 1$ | $0 \le y_n \le 1$ |
| $y_3$ | Материалоёмкость | Материалоёмкость изделия определяется общей массой его конструкции в килограммах | $0 \le y_n$, кг |

Продолжение табл. 2

| *1* | *2* | *3* | *4* |
|---|---|---|---|
| $y_4$ | Технологическая трудоёмкость | Технологическая трудоёмкость процесса определяется на основе технически и экономически аргументированной суммы норм рабочего времени выполнения входящих в него технологических операций | $0 \le y_n$, норм/ч |
| $y_5$ | Производительность | Производительность – это свойство технологического процесса обеспечивать выпуск заданного количества деталей, сборочных единиц или изделий в единицу времени | $0 \le y_n \le 100$, % |
| $y_6$ | Долговечность | Свойство объекта сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта | $0 \le y_n \le 100$, % |
| $y_7$ | Безотказность | Свойство объекта непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или некоторой наработки | $0 \le y_n \le 1$ |
| $y_8$ | Ремонтопригодность | Свойство объекта, заключающееся в приспособленности к предупреждению и обнаружению причин возникновения отказов, повреждений и поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путём проведения технического обслуживания и ремонта | $0 \le y_n \le 100$, % |
| $y_9$ | Сохраняемость | Свойство объекта сохранять значения показателей безотказности, долговечности и ремонтопригодности в течение и после хранения или транспортирования | $0 \le y_n \le 100$, % |
| $y_{10}$ | Вероятность безотказной работы | Вероятность того, что в пределах заданной наработки опасный отказ системы не возникает | $0 \le y_n \le 1$ |
| $y_{11}$ | Себестоимость изготовления продукции | Себестоимость изготовления продукции складывается из всех затрат (материальных и трудовых) предприятия, необходимых для изготовления и реализации продукции, в денежном выражении | $0 \le y_n$, р. |
| $y_{12}$ | Коэффициент применяемости | Отношение количества наименований типоразмеров унифицированных, заимствованных, стандартных деталей к общему количеству наименований типоразмеров деталей в изделии | $0 \le y_n$, % |
| $y_{13}$ | Коэффициент взаимной унификации для групп изделий | Отношение количества наименований типоразмеров унифицированных деталей к общему количеству наименований типоразмеров деталей в изделии | $0 \le y_n$, % |
| $y_{14}$ | Уровень шума | Уровень, который не вызывает у человека значительного беспокойства и существенных изменений показателей функционального состояния систем и анализаторов, чувствительных к шуму | $50 \le y_n \le 110$, дБ |

Для комплексного оценивания качества технологического процесса экспертным методом определены следующие обобщённые показатели:

1. Учитывающие технологические свойства:

$$D_1 = \sqrt[4]{d_1 + d_2 + d_3 + d_4};$$

2. Учитывающие свойства назначения:

$$D_2 = d_5;$$

3. Учитывающие свойства надёжности:

$$D_3 = \sqrt[4]{d_6 + d_7 + d_8 + d_9};$$

4. Учитывающие свойства безопасности:

$$D_4 = d_{10};$$

5. Учитывающие экономические свойства:

$$D_5 = d_{11};$$

6. Учитывающие свойства стандартизации и унификации:

$$D_6 = \sqrt[2]{d_{12} + d_{13}};$$

7. Учитывающие эргономические и эстетические свойства:

$$D_7 = d_{14}.$$

Графический метод перевода расчётных значений показателей в натуральные значения откликов основан на идее построения графика зависимости безразмерных и натуральных показателей.

Для практической реализации предложенного подхода функцию желательности рекомендовано использовать в качестве номограммы, с помощью которой оперативно и с высокой информативностью можно определить значение отклика *y*’ для каждого кодированного значения частного показателя $y_i$ (см. рис. 1).

Выбор вида кривой желательности обусловлен её неоспоримыми преимуществами. Среди них можно выделить такие, как непрерывность, монотонность, гладкость. Данный выбор основывается на результатах экспертных наблюдений. Суть графического метода оценки качества технологического процесса на основе функции желательности (см. рис. 1) приведена ниже.

По оси ординат расположены значения желательности в интервале от 0 до 1. На ось абсцисс в условном масштабе нанесены значения отклика *y*’. Началом отсчёта горизонтальной оси считается значение, соотносимое с желательностью, равной 0,37. Выбор данного значения аргументируется тем фактом, что эта точка является экстремумом функции желательности, что значительно облегчает вычисления.

Ось *Y*’ – кодированная шкала, на которой симметрично относительно нуля отмечены кодированные значения откликов *y*’. Условно приведённая шкала разбита на три интервала. При этом выбранное количество интервалов определяет крутизну функции желательности в середине кривой. Поскольку основное назначение функции желательности – это перевод кодированных значений откликов в безразмерный параметр, то теоретически она полностью удовлетворяет поставленной задаче.

Идентифицированные шкалы откликов $Y_1$, $Y_2$, …, $Y_n$ произвольно прокалиброваны в точках, приведённых в табл. 1, и расположены параллельно кодированной шкале *Y*’. Полученная в результате этих преобразований шкала желательности относится к числу неравномерных. Алгоритм вычисления величины частной желательности информативен и прост:

1. Для получения значения величины частной желательности $d_{1j}$ нужно спроецировать точку конкретного числового значения $Y_{1j}$ на шкале $Y_1$.

2. Затем перенести полученное значение $Y_{1j}$ на график функции желательности и определить соответствующее значение $d_{1j}$ по оси ординат (шкале частной желательности *d*).

Уровень точности проведённых преобразований считается достаточным для поставленной измерительной задачи [1].

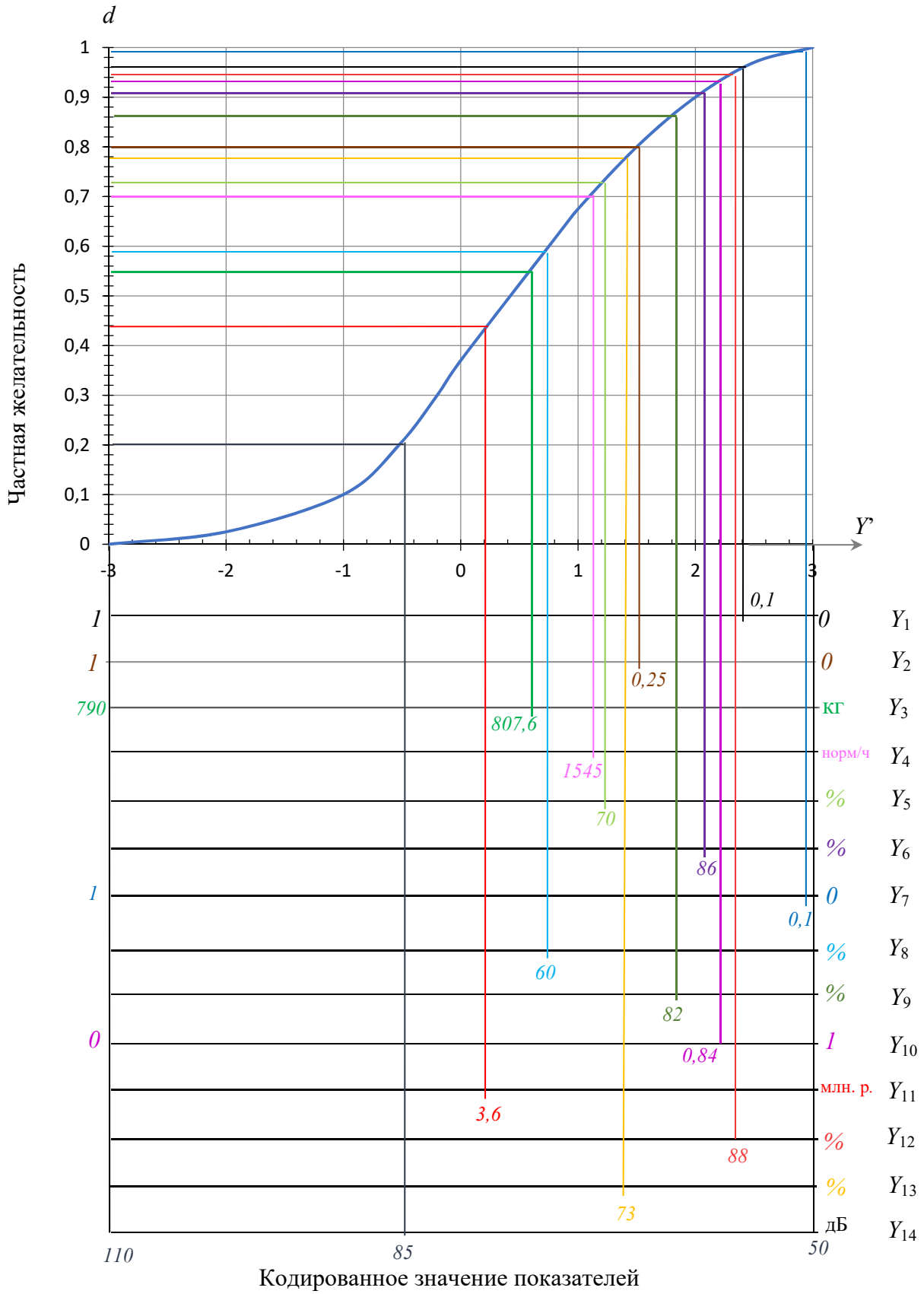


Рис. 1. Функция желательности

**Оценка качества технологического процесса**

Практическая реализация разработанной методики оценки качества технологических процессов была апробирована на примере технологического процесса сборки узла «XXX». Выполненное преобразование натуральных значений частных откликов в частные функции желательности представлено в табл. 3.

Таблица 3

Натуральные и обобщённые по функции желательности отклики

| **Условное обозначение натуральных значений по показателям** | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| технологическим | | | | | | | | | | | | |
| $Y_1$ | | | $Y_2$ | | | $Y_3$ | | | $Y_4$ | | | $D_1$ |
| $y_1$ | $y_1$’ | $d_1$ | $y_2$ | $y_2$’ | $d_2$ | $y_3$ | $y_3$’ | $d_3$ | $y_4$ | $y_4$’ | $d_4$ | |
| 0,1 | 2,4 | 0,96 | 0,25 | 1,5 | 0,8 | 807,6 | 0,6 | 0,55 | 1545 | 1,1 | 0,7 | 0,74 |

| **Условное обозначение натуральных значений по показателям** | | | |
|---|---|---|---|
| назначения | | | |
| $Y_5$ | | | $D_2$ |
| $y_5$ | $y_5$’ | $d_5$ | |
| 70 | 1,2 | 0,73 | 0,73 |

| **Условное обозначение натуральных значений по показателям** | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| надёжности | | | | | | | | | | | | |
| $Y_6$ | | | $Y_7$ | | | $Y_8$ | | | $Y_9$ | | | $D_3$ |
| $y_6$ | $y_6$’ | $d_6$ | $y_7$ | $y_7$’ | $d_7$ | $y_8$ | $y_8$’ | $d_8$ | $y_9$ | $y_9$’ | $d_9$ | |
| 86 | 2,07 | 0,91 | 0,1 | 2,9 | 0,99 | 60 | 0,66 | 0,59 | 82 | 1,8 | 0,86 | 0,81 |

| **Условное обозначение натуральных значений по показателям** | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| безопасности | | | | экономическим | | | |
| $Y_{10}$ | | | $D_4$ | $Y_{11}$ | | | $D_5$ |
| $y_{10}$ | $y_{10}$’ | $d_{10}$ | | $y_{11}$ | $y_{11}$’ | $d_{11}$ | |
| 0,84 | 2,2 | 0,93 | 0,93 | 3,6 | 0,2 | 0,42 | 0,42 |

| **Условное обозначение натуральных значений по показателям** | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| стандартизации и унификации | | | | | | | эргономическим и эстетическим | | | |
| $Y_{12}$ | | | $Y_{13}$ | | | $D_6$ | $Y_{14}$ | | | $D_7$ |
| $y_{12}$ | $y_{12}$’ | $d_{12}$ | $y_{13}$ | $y_{13}$’ | $d_{13}$ | | $y_{14}$ | $y_{14}$’ | $d_{14}$ | |
| 88 | 2,3 | 0,94 | 73 | 1,4 | 0,78 | 0,85 | 85 | -0,5 | 0,2 | 0,2 |

Коэффициенты весомости ($\beta_u$) показателей свойств технологического процесса определяются экспертным опросом по методу рангов. Составляется ранжированный ряд свойств технологического процесса в порядке возрастания суммы рангов. Показатель значимости свойства соответствует месту $u$, которое свойство занимает в полученном ранжированном ряду:

$$\beta_u = \frac{u}{2^{u-1}}.$$

Значения коэффициентов весомости $\beta_u$ для выбранных показателей качества технологических процессов приведены в табл. 4.

Таблица 4

Показатель весомости свойств технологического процесса

| Обозначение ранга свойства | $\beta_1$ | $\beta_2$ | $\beta_3$ | $\beta_4$ | $\beta_5$ | $\beta_6$ | $\beta_7$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Значение показателя весомости | 1,00 | 1,00 | 0,75 | 0,50 | 0,31 | 0,187 | 0,11 |

Комплексная оценка качества технологического процесса рассчитывается как обобщённая функция желательности ($D$) и определяется в соответствии с разработанной последовательностью:

1. Перевод частных показателей свойств технологического процесса в кодированные значения ($y$).

2. Определение частных функции желательности $d_i$ по формуле (2).

3. Установление соответствия значений базовых точек величинам наблюдаемых параметров экспертным методом.

4. Установление линейной зависимости между рассматриваемыми показателями качества технологического процесса и их безразмерными значениями.

5. Определение частной функции желательности (по рис. 1).

6. Построение диаграммы значений комплексных показателей качества (см. рис. 2).

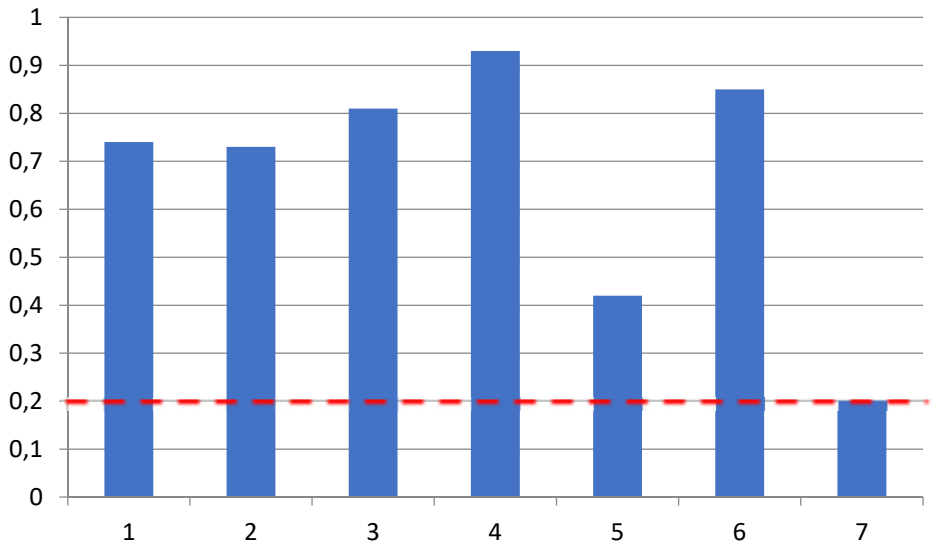


Рис. 2. Диаграмма значений комплексных показателей качества технологического процесса

7. Анализ полученных данных проводится на основании значений, представленных на диаграмме (см. рис. 2). Исходя из проведённого анализа наивысшие значения имеют показатели надёжности, безопасности, назначения, а также показатель стандартизации и унификации. Значения эргономических и эстетических показателей оказались самыми низкими и, следовательно, для этих показателей необходимо разработать мероприятия по их улучшению.

8. Расчёт обобщённой функции желательности $D$ по формуле (1):

$$D = \sqrt[7]{D_1^{\beta 1} \cdot D_2^{\beta 2} \cdot D_3^{\beta 3} \cdot D_4^{\beta 4} \cdot D_5^{\beta 5} \cdot D_6^{\beta 7} \cdot D_7^{\beta 7}}\,,$$

$$D = \sqrt[7]{0{,}74^1 \cdot 0{,}73^1 \cdot 0{,}81^{0{,}75} \cdot 0{,}93^{0{,}5} \cdot 0{,}42^{0{,}31} \cdot 0{,}85^{0{,}187} \cdot 0{,}2^{0{,}11}} =$$

$$= \sqrt[7]{0{,}74 \cdot 0{,}73 \cdot 0{,}85 \cdot 0{,}96 \cdot 0{,}76 \cdot 0{,}97 \cdot 0{,}84} = 0{,}83\,.$$

9. Обобщённая оценка технологического процесса сравнивается со шкалой стандартных оценок (см. табл. 2) и между собой.

10. После расчёта и анализа полученного значения обобщённой функции желательности $D$ делается вывод об уровне качества рассматриваемого технологического процесса. Чем большее значение имеет обобщённая функция желательности, тем выше будет качество технологического процесса.

**Вывод.** Исследованный по разработанной методике технологический процесс соотносится по шкале желательности с уровнем «очень хорошо». Анализ результатов оценки показал, что технологический процесс сборки узла «XXX» пригоден для использования.

**Заключение**

Разработанная методика оценки качества технологических процессов основывается на применении функции желательности, что позволяет производить сопоставление как измеряемых, так и оцениваемых откликов.

Предложенная методика позволяет проводить оценку качества существующих технологических процессов, а также разработать требования к новым технологическим процессам машиностроительных производств.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Методические основы количественного оценивания технологических процессов / Р. В. Буткевич, Ю. С. Клочков, Т. С. Яницкая, С. А. Ярыгин // Известия Самарского научного центра РАН. – 2005. – Т. 7. – № 2. – С. 456-463.
2. Михайловский, И. А. Управление качеством изделий на основе регламентации комплекса требований к процессам их производства / И. А. Михайловский // Век качества. – 2011. – № 2. – С. 49-51.
3. Федюкин, В. К. Управление качеством технологических процессов / В. К. Федюкин. – М.: КНОРУС, 2013. – 232 с.
4. Дербишев, А. В. Управление технологическими процессами в машиностроении и приборостроении / А. В. Дербишев. – М.: Издательство стандартов, 1977. – 164 с.
5. Кравченко, Е. Г. Разработка критериев оценки качества технологических процессов машиностроительных производств / Е. Г. Кравченко, Т. Ю. Забарина // Научно-техническое творчество аспирантов и студентов: материалы 46-й научно-технической конференции студентов и аспирантов. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГТУ», 2016. – С. 205-207.
6. Кравченко, Е. Г. Методика оценки качества технологических процессов / Е. Г. Кравченко, Т. Ю. Забарина, А. А. Степанов // Современные материалы, техника и технологии. – 2016. – № 1 (4). – С. 118-121.
7. Отряскина, Т. А. Исследование термодинамических процессов при стружкообразовании / Т. А Отряскина, Е. Г. Кравченко // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № VII-1 (47). – С. 85-89.
8. Саблин, П. А. Высота микронеровностей и параметры шероховатости – комплексная оценка качества обработанной поверхности / П. А. Саблин, В. С. Щетинин // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № VII-1 (47). – С. 90-94.
9. Космынин, А. В. Обеспечение качества обработки материалов резанием посредством внедрения трансформируемых управляемых звеньев в систему станочных систем / А. В. Космынин, В. С. Щетинин, П. А. Саблин // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № V-1 (45). – С. 115-118.
10. Оценка точности контроля шероховатости поверхностей изделий машиностроения / Е. Г. Кравченко, В. В. Алтухова, А. С. Гамаюнова, Е. А. Середкина // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2021. – № V (53). – С. 55-64.