9.3. АНАЛИЗ И ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ И ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Мустафаев М.Г., к.т.н., инженер;
Мустафаева Д.Г., к.т.н., доцент,
заведующий сектором

НПП «Экофон», г. Владикавказ

Перейти на ГЛАВНОЕ МЕНЮ

Определены основные задачи контроля в производственном процессе при создании изделий приборостроения. Использование контроля и методов статистической обработки позволяют анализировать и определить уровень качества изделий, организовать межоперационный контроль качества производственного процесса, установить зависимости качества от контролируемых параметров, построить регрессионные модели взаимосвязи выходных характеристик изделий.

В современной экономике к производственным процессам (ПП) и качеству изделий предъявляются все более высокие технические и экономические требования [7-9]. Они направлены на значительное повышение технического уровня и эффективности использования изделий, совершенствование организации производственных процессов, что является важной народнохозяйственной проблемой. Решение этих задач неразрывно связано с совершенствованием и повышением качества процессов производства.

В общем случае производственный процесс представляется в виде многомерного объекта, на входе которого действует векторная переменная $X(t)$ с составляющими $x_1(t), ..., x_n(t)$. К этим переменным относятся все свойства сырья или заготовок (химический состав, размеры, механические свойства и т.д.). Параметры процесса, характеризующие условия протекания (температура, давление, скорость и т.д.), описывается векторной функцией $Z(t)$ с составляющими $z_1(t), ..., z_m(t)$. Выходные переменные описываются вектором $Y(t)$ с составляющими $y_1(t),..., y_n(t)$ – это характеристики изделий, такие как химический состав, размеры, количество, стоимость и т.д. Возмущающие факторы, воздействующие на процесс, описываются вектором $U(t)$ с составляющими $u_1(t),..., u_n(t)$.

Размерность векторов X, Y, Z и U обычно велика для реальных процессов и все их учесть принципиально невозможно, поэтому они рассматриваются как случайные функции. При этом $X(t)$, $Z(t)$ и $U(t)$ рассматриваются как причины, их объединяют в группу входных переменных.

В результате проведенного анализа процесса производства изделий приборостроения, была составлена причинно-следственная диаграмма, которая представлена на рис. 1.

По причинно-следственной диаграмме можно установить основные факторы, влияющие на качество и выход годных изделий. Проведенный анализ показал, что существенными факторами являются: несоответствие исходного материала при создании приборных структур требуемому составу и заданным свойствам; отсутствие воспроизводимости параметров структур от процесса к процессу; неправильная эксплуатация технологического оборудования.

Параметры функционирования производственного процесса могут рассматриваться как параметры эффективности. Они позволяют оценить качество решения производственной проблемы и достижение поставленных целей. Важными факторами результативности функционирования ПП являются соответствие планируемых целей требованиям среды и возможностям предприятия; адекватность выбранных стратегий поставленным целям; силы, обеспечивающие достижение целей; объем и качество ресурсов, необходимых для развития.

Между качеством изделий и эффективностью производства существует прямая зависимость. Повышение качества изделий способствует повышению эффективности производственного процесса в целом. Качество изделий непосредственно связано с эффективностью функционирования производственной системы. Решение этой проблемы позволит совершенствовать процесс производства изделий, повысить его экономичность.

Функционирование производства предусматривает эффективный способ управления ее составляющими в любой производственной ситуации. А такой способ имеет место в эффективной системе управления и при высокой степени производственно-технологической оснащенности предприятия. Повышение эффективности производства тесно связано с ростом эффективности принимаемых решений на всех уровнях иерархии. Принятие решений представляет собой основной инструмент управляющего воздействия, так как в разработке решений, их принятии, организации и контроле заключается деятельность управления.

В реальных задачах принятия решений в подходах к выбору сохраняется большая неопределенность, заключающаяся в последовательном сужении множества решений. В начале исходное множество альтернативных решений Y сужается до множества допустимых решений $Y_д \subseteq Y$. Затем множество допустимых решений сужается до множества эффективных решений $Y_0 \subseteq Y_д$. После осуществляется выбор единственного решения из множества эффективных решений. Таким образом, последовательность выбора символически записывается в виде цепочки включений $Y_x \subseteq Y_0 \subseteq Y_д \subseteq Y$. Определение множества эффективных решений позволяет сузить множество допустимых решений, что облегчает дальнейшую задачу определения единственного оптимального решения. Количественно степень этого сужения оценивается коэффициентом определенности выбора:

$$\gamma = \frac{m_д - m_0}{m_д - 1},$$

где $m_д$ – количество решений в допустимом множестве;

m_0 – количество эффективных решений.

Коэффициент определенности выбора является характеристикой полезности выделения множества эффективных решений.

Рис. 1. Диаграмма определения причин и решения производственной проблемы

Применение различных методов контроля в производственном процессе позволяет установить статистическую взаимосвязь параметров изделий с режимами производственных операций и закономерности распределения параметров в зависимости от технологических, конструктивных, эксплуатационных и других факторов. В этих условиях разработка методов контроля и применение методов статистической обработки позволяет анализировать и устранять причины низкого технического уровня, организовывать межоперационный контроль качества ПП, установить зависимости выхода годных изделий от каждого из контролируемых параметров, построить регрессионные модели взаимосвязи параметров с выходными характеристиками изделий и выхода годных.

Статистическая обработка производственных параметров и анализ взаимосвязей исследуемых параметров на основе многомерного статистического анализа, причинного анализа и принятия решений повышает информативность результатов контроля производственных процессов. Решение этих задач требует разработки и организации систематического контроля производственных процессов производства изделий. Контроль ПП производится на всех этапах создания изделий (организация межоперационного контроля и установление корреляционных взаимосвязей, анализ устойчивости производственного процесса и т.д.). С этой точки зрения можно выделить основные задачи, решаемые с помощью контроля (табл. 1).

По мере накопления статистической информации и увеличения степени отработанной ПП производства изделий определяется объем контроля и его периодичность. Задачи обеспечения максимального объема информации могут быть решены методом факторного планирования эксперимента, при этом интегральные показатели качества ПП определяются по выходу годных изделий. Обеспечение стабильности воспроизведения производственных операций и количественной оценки влияния каждого из производственных параметров определяются на основе информативных параметров качества.

Основные задачи контроля заключаются в организации межоперационного статистического анализа и регулирования производственного процесса производства изделий с применением причинного анализа взаимосвязей параметров изделий. На этих этапах решаются задачи определения технологических ограничений и норм параметров для контроля уровня настройки и точности выполнения производственных операций, направленных на поддержание высокого выхода годных и надежности изготовляемых по данной технологии. Поддержание параметров производственных процессов в определенных пределах обеспечивает стабильное воспроизведение производственных операций и количественную оценку влияния производственных параметров на качество изделий.

Таблица 1

ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ КОНТРОЛЯ

Этапы контроля	Назначение контроля
Статистический контроль ПП	Пооперационный контроль выполнения производственных операций. Оценка характеристик работы оборудования и операторов. Прогнозирование выхода годных. Оценка устойчивости производственного процесса. Анализ производственных операций и процесса в целом
Статистический анализ и регулирование ПП	Первичная статистическая обработка параметров (средние, дисперсии, определение информативности параметров, определение закона распределения, исключение аномальных наблюдений). Установление корреляционных связей с характеристиками режимов операций и выхода годных. Определение скрытых механизмов формирования множества измеряемых параметров. Графическое отображение статистической информации. Анализ и принятие решения по корректировке и управлению производственным процессом. Анализ и принятие решений по статистическому регулированию ПП

При статистическом анализе процесса производства изделий производится:

- первичная статистическая обработка;
- установление статистических связей параметров;
- определение скрытых закономерностей производственного процесса;
- построение регрессионных моделей связи выхода качественных изделий и режимами технологических операций;
- анализ устойчивости производственного процесса.

Первичная статистическая обработка проводится для определения средних значений и дисперсий для параметров $\{x_i\}$, $i = 1...n$, с целью исключения результатов, выходящих за границы изменения x_i, проверяется вид закона распределения x_i.

Для статистических данных, распределенных по нормальному закону, проводится исключение аномальных наблюдений по критерию Граббса [5, 13, 1, 11]. При этом вычисляется расчетное значение критерия:

$$G_{max} = \frac{\bar{x}_{i\,max} - \bar{\bar{x}}}{S_{\bar{x}}},$$

$$G_{min} = \frac{\bar{\bar{x}} - \bar{x}_{i\,min}}{S_{\bar{x}}},$$

где $\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i$ – среднее значение исследуемого параметра;

$\bar{\bar{x}} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \bar{x}_i$ – общее среднее арифметическое значение результата испытания;

$S_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(\bar{x}_i - \bar{\bar{x}})^2}$ – дисперсия параметра;

n – количество наблюдений.

Если $G < G_{кр} = G_{таб}(\alpha, n)$, где $G_{таб}$ – табличное значение критерия Граббса [4, 8], α – уровень значимости, то в выборке нет аномальных значений.

При первичной статистической обработке исключаются неинформативные параметры. Для этого область изменения x_i разбивается на k интервалов; k выбирается в зависимости от физической природы параметра и может быть принято равным значению $[l + 3{,}2 \log n]$. Тогда энтропия по Шеннону, оценивающая информативность x_i, определяется как:

$$H_i = -\sum_{j=1}^{k} p_{ij} \log p_{ij},$$

где p_{ij} – частота попадания x_i в j-й интервал.

Чем меньше значение H_i, тем менее информативным является x_i. Если $H_i < \gamma$, где γ – некоторое наперед заданное малое число, то x_i считается неинформативным и исключается из рассмотрения.

Существуют две причины информативности параметра x_i:

- x_i не характеризует изменение функционирования ПП;
- методика измерения не отражает действительного изменения x_i.

Для установления взаимосвязей между характеристиками ПП и выходом годных изделий проводится корреляционный анализ [9, 10]. Оценкой связи двух x_i и x_j служит парный коэффициент корреляции, вычисляемый по формуле:

$$R_{ij} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x}_i)(x_j - \bar{x}_j)}{\bar{S}_i \bar{S}_j}.$$

Значимость коэффициента корреляции проверяется с помощью статистики Стьюдента:

$$t_{ij} = R_{ij}\sqrt{(n-2)(1-R^2 ij)}$$

с $k = n - 2$ степенями свободы.

Если $|t_{ij}| < t_{кр} = t_{таб}(\alpha, k)$, где $t_{таб}$ – табличное значение распределения Стьюдента [8, 11,12], то R_{ij} считается незначимым, т.е. линейной зависимости в статистическом смысле нет.

Если исследуются параметры $x_1,...,x_m$, то связи между ними описываются корреляционной матрицей:

$$Q_m = \begin{bmatrix} 1 & R_{12} & ... & R_{1m} \\ R_{21} & 1 & ... & R_{2m} \\ ... & ... & ... & ... \\ R_{m1} & R_{m2} & ... & 1 \end{bmatrix}.$$

В этом случае зависимости между x_i, $i = \overline{1,m}$, более многообразны и сложны, чем в случае двух отдельно-рассматриваемых параметров. Для исследования зависимости между x_i и x_j при фиксированном значении $x_1,...,x_l$, $l = m - 2$ вычисляется частный коэффициент корреляции:

$$R_{ij\cdot 1,...,m} = q_{ij} / \sqrt{q_{ii} q_{jj}},$$

где q_{ij}, q_{ii}, q_{jj} – алгебраические дополнения к элементам R_{ij}, R_{ii}, R_{jj} корреляционной матрицы Q_m.

Значимость частного коэффициента корреляции проверяется со степенями свободы $k = n - l - 2$.

Оценку связи выхода годных изделий с параметрами можно провести с помощью множественного коэффициента корреляции:

$$R_j = \sqrt{1 - |q_m|} / q_{jj},$$

где $|q_m|$ – определитель корреляционной матрицы.

Значимость множественного коэффициента корреляции проверяется с помощью статистики Фишера:

$$F = \frac{R^2(n - l - 2)}{l(1 - R^2)}$$

с $k_1 = n - l - 2$ и $k_2 = l$ степенями свободы.

Если $F < F_{кр} = F_{таб}(\alpha, k_1, k_2)$, где $F_{таб}$ – табличное значение распределения Фишера [8, 11,12], то R считается незначимым.

Для выявления скрытых закономерностей производственного процесса используют методы факторного анализа [119, 120]. При этом каждое наблюдение x_{ij}, $i = \overline{1,m}$, $j = \overline{1,n}$, представляется в виде:

$$x_{ij} = \sum_{r=1}^{k} l_{ir} f_{rj} + e_{ij},$$

где f_{rj} – r-й фактор в j-м наблюдении;

k – количество факторов (k значительно меньше m);

l_{ij} – нагрузка r-го фактора в i-й переменной;

e_{ij} – остаток, действующий только на x_{ij}.

Для вычисления матрицы факторных нагрузок определяются собственные значения и соответствующие собственные векторы корреляционной матрицы. Затем определяются собственные значения $\lambda_1, \lambda_2, \ldots, \lambda_k$, большие либо равные значению заданной константы (обычно единицы). Факторные нагрузки для i-й переменной j-го фактора вычисляются по формуле:

$$a_{ij} = v_{ij}\sqrt{\lambda_j}\,,\ i = \overline{1,m}\,,\ j = \overline{1,k}\,,$$

где λ_j – отдельные собственные значения Q_m;

v_{ij} – элементы соответствующих нормативных векторов.

После выявления взаимосвязей характеристик производственного процесса на этапе корреляционного анализа строятся регрессионные модели [13, 14]. Выходная оценка y производственного процесса (выход годных изделий) представляется с помощью линейной функции регрессии в виде:

$$y = b_0 + \sum_{j=1}^{n} b_j x_j + e\,,$$

где b_0 – свободный член;

b_j, $j = \overline{0,n}$ – неизвестные параметры;

e – ошибка аппроксимации y посредством функции регрессии.

Коэффициенты регрессии вычисляются так:

$$b_j = \beta_j * \frac{\overline{S_y}}{\overline{S_j}}\,,$$

где $\overline{S}_y$ – оценки дисперсии y;

$\overline{S}_j$ – оценка дисперсии x_j.

$$\beta_j = \sum_{i=1}^{m} r_{iy} * r_{ij}^{-1}, \quad j = \overline{1,n},$$

где r_{iy} – коэффициент корреляции между y и x_i.

Значимость коэффициента регрессии b_j проверяется с помощью t-статистики:

$$t_j = \frac{b_j}{S_{b_j}}, \quad j = \overline{1,n},$$

с $k = n - m - 1$ степенями свободы,

где $S_{b_j} = \sqrt{\frac{r_{jj}^{-1}}{D_{jj}} S^2}$,

$$D_{jj} = \sum_{i=1}^{m}\left(x_{ij} - \overline{x}_j\right)^2,$$

$$S^2 = \sum_{i=1}^{m} \frac{e_i^2}{n - m - 1}\,.$$

Если $|t_j| < t_{кр} = t_{таб}(\alpha, k)$, то b_j считается значимым, что свидетельствует о существенности влияния x_j на y.

Для определения причин разладки производственного процесса сравнивают между собой параметры соответствующих партий разлаженного процесса и партии с максимальным выхода годных. Сравнение проводят по статистическим характеристикам, как среднее значение и дисперсия параметров.

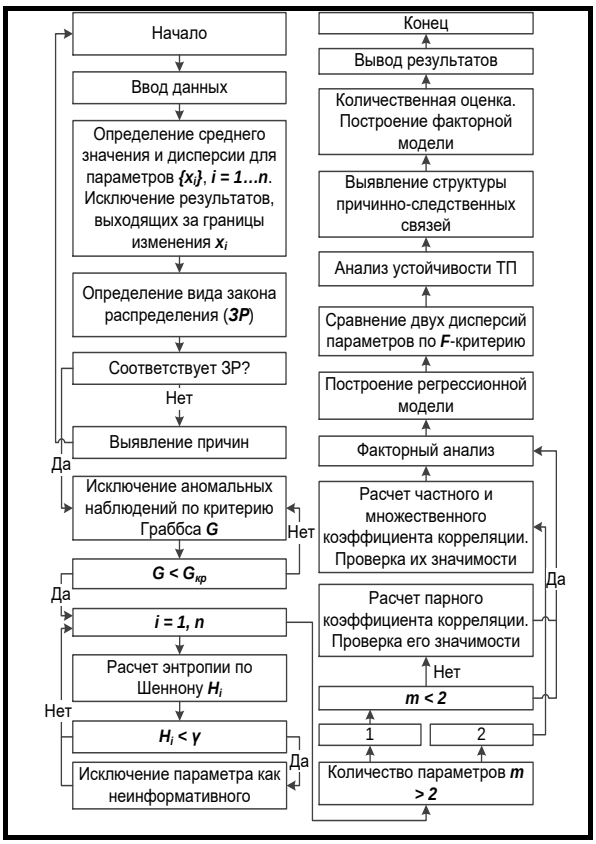

Рис. 2. Алгоритм статистического анализа ПП

Для сравнения двух дисперсий $\overline{S_1^2}$ и $\overline{S_2^2}$ применяют F-критерий:

$$F = \frac{\overline{S_1^2}}{\overline{S_2^2}}$$

с $k_1 = n_1 - 1$ и $k_2 = n_2 - 1$ степенями свободы;

где n_1, n_2 – количество элементов в сравниваемых партиях.

Если $F < F_{кр} = F_{таб}(\alpha, k_1, k_2)$, то дисперсии считаются равными.

Для сравнения двух средних применяется t-критерий. Если дисперсии исследуемых партий равны, то вычисляется статистика:

$$t = \frac{\overline{x}_1 - \overline{x}_2}{\sqrt{\left((n_1 - 1)\overline{S}_1^2 + (n_2 - 1)\overline{S}_2^2\right) / (n_1 + n_2 - 2)}} \sqrt{\frac{n_1 n_2}{n_1 + n_2}}$$

с $k = n_1 + n_2 - 2$ степенями свободы.

Если дисперсии не равны, то:

$$t = \frac{\overline{x}_1 - \overline{x}_2}{\sqrt{\frac{\overline{S}_1^2}{n_1} + \frac{\overline{S}_2^2}{n_2}}}\,.$$

Для $|t| < t_{кр} = t_{таб}(\alpha, k)$ средние значения считаются равными.

Для анализа устойчивости производственного процесса, сравниваем векторы средних по T^2-критерию Хотеллинга [6, 18, 3, 12]:

$$T^2 = \frac{n_1 n_2}{n_1 + n_2}\left(\overline{x_1} - \overline{x_2}\right) Q^{-1} \left(\overline{x_1} - \overline{x_2}\right)^T,$$

где $Q = \frac{1}{n_1 + n_2 - 2}\left[(n_1 - 1)Q_1 + (n_2 - 1)Q_2\right]$ – объединенная корреляционная матрица;

Q_1, Q_2 – корреляционные матрицы сравниваемых партий.

Затем вычисляется F-статистика:

$$F = \frac{(n_1 + n_2 - m - 1)}{(n_1 + n_2 - 2)m} T^2$$

с $k_1 = m$ и $k_2 = n_1 + n_2 - m - 1$ степенями свободы (m – количество параметров, по которым проводится сравнение). Если $F < F_{кр} = F_{таб}(\alpha, k_1, k_2)$, то векторы средних считаются равными.

Проведенные исследования показали, что значение F-статистики меньше критического, что говорит об устойчивости производственного процесса производства изделий.

Разработанный алгоритм статистического анализа и регулирования производственного процесса производства изделий на основе комплексного подхода приведен на рис. 2.

При статистических исследованиях производственного процесса производства изделий целесообразно применять одновременно методы причинного и факторного анализа для построения многоуровневых факторных моделей. В результате факторного анализа строится причинный граф взаимодействий параметров, испытывающих наиболее сильные факторные нагрузки исследуемого фактора F. Затем производится расчет парных коэффициентов причинного влияния. На основе многоуровневой факторной модели проводится анализ изучаемого процесса.

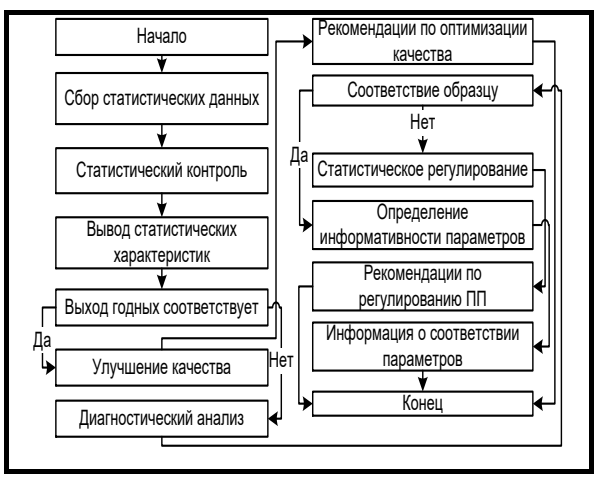

Рис. 3. Алгоритм принятия решений

На основе статической обработки полученных данных результатов такого анализа и выданных рекомендаций относительно воздействий на производственный процесс принимается решение относительно корректировки режимов технологических операций. Эти решения принимаются на основе полученных результатов с учетом особенности процесса производства. Алгоритм принятия решений в условиях контроля производственного процесса представлен на рис. 3.

Использование контроля и методов статистической обработки позволяют анализировать и определить причины низкого уровня качества, организовать межоперационный контроль качества производственного процесса, установить зависимости качества от контролируемых параметров, построить регрессивные модели взаимосвязи выходных характеристик изделий. Статистический анализ производственного процесса необходимо осуществлять на основе комплексного подхода, при котором во взаимосвязи должны применяться методы многомерной статистики, причинного анализа и принятия решений.

Литература

1. Айвазян С.А. и др. Прикладная статистика. Основы моделирования и первичная обработка данных [Текст] / С.А. Айвязян, И.С. Енюков, Л.Д. Миналкин. – М. : Финансы и статистика, 1983. – 472 с.
2. Большев Л.Н. Таблицы математической статистики [Текст] / Л.Н. Большев, Н.В. Смирнов. – М. : Наука, 1983. – 416 с.
3. Вадзинский Р. Статистические вычисления в среде Excel [Текст] / Р. Вадзинский. – СПб. : Питер, 2008. – 608 с.
4. Дубров А.М. и др. Многомерные статистические методы [Текст] / А.М. Дубров, В.С. Мхитарян, Л.И. Трошин. – М. : Финансы и статистика, 1998. – 352 с.
5. Енюков И.С. Методы, алгоритмы, программы многомерного статистического анализа [Текст] / И.С. Енюков. – М. : Финансы и статистика, 1986. – 232 с.
6. Куликов Е.И. Прикладной статистический анализ [Текст] / Е.И. Куликов. – М. : Горячая Линия – Телеком, 2008. – 464 с.
7. Мустафаева Д.Г. Информационные технологии при создании сложных изделий [Текст] / Д.Г. Мустафаева // Мат-лы X междунар. науч.-техн. конф. «Информационно-вычислительные технологии и их приложения». – Пенза, 2009. – С. 189-191.
8. Мустафаева Д.Г. Управление и контроль технологической системы при производстве изделий [Текст] / Д.Г. Мустафаева // Мат-лы XXIV междунар. науч. конф. «Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-24». – Пенза, 2011. – С. 112-114.
9. Мустафаева Д.Г. Факторы повышения устойчивости предприятия при создании сложных изделий [Текст] / Д.Г. Мустафаева // Мат-лы V Всеросс. науч.-практ. конф. «Актуальные вопросы экономических наук». – Новосибирск, 2009. – С. 52-54.
10. Мюллер П. и др. Таблицы по математической статистике [Текст] / П. Мюллер, П. Нойман, Р. Шторм. – М. : Финансы и статистика, 1982. – 278 с.
11. Симчера В.М. Методы многомерного анализа статистических данных [Текст] / В.М. Симчера. – М. : Финансы и статистика, 2008. – 400 с.
12. Халафян А.А. Statistica 6 Статистический анализ данных [Текст] / А.А. Халафанян. – М. : Бином-Пресс, 2010. – 528 с.
13. Шор Я.Б. Статические методы анализа и контроля качества и надежности [Текст] / Я.Б. Шор. – М. : Советское радио, 1962. – 553 с.
14. Bendat J.S. Engineering applications of correlation and spectral analysis [Text] / Julius S. Bendat, Allan G. Piersol. – J. Wiley, New York, 1993. – 458 p.

15. Ceberio J. A linear regression analysis [Text] / J. Ceberio. – Springer-Verlag, 1980. – 452 p.
16. Draper N.R. Applied regression analysis [Text] / Norman R. Draper, Harry Smith. – J. Wiley, New York, 1998. – 706 p.
17. Förster E. Methoden der correlations- und regressions analyse [Text] / Erhard Förster, Bernd Rönz. – Verl. Die Wirtschaft, Berlin, 1979. – 324 p.
18. Middleton M.R. Data analysis using Microsoft Excel: updated for Office XP [Text] / Michael R. Middleton. – Thomson Learning, 2003. – 316 p.

Ключевые слова

Анализ; контроль; параметр; качество; алгоритм; решение; метод; модель; процесс; совершенствование; взаимосвязь; устойчивость.

Мустафаев Марат Гусейнович

Мустафаева Джамиля Гусейновна

РЕЦЕНЗИЯ

Актуальность темы. Повышение технического уровня и эффективности применения изделий, совершенствование организации производственных процессов является актуальным направлением исследований.

Научная новизна и практическая значимость. В работе предложены подходы, позволяющие обеспечить эффективную организацию и повышение качества функционирования производства. В работе проведен анализ и рассмотрены возможные подходы по совершенствованию производственных процессов и качества организации производства. Показана возможность повышения качества изделий путем организации и применения статистических методов и разработки алгоритма анализа производственного процесса. Поставлены и решены задачи по оптимизации производственных процессов, повышения информативности процессов производства и применения многомерных статистических методов повышения качества изделий. Предлагаемые подходы позволяют улучшить организацию производства и повысить эффективность функционирования производственных процессов.

Заключение. Статья отвечает требованиям, предъявляемым к научным публикациям. Рекомендую опубликовать статью в открытой печати.

Гончаров И.Н., д.т.н., профессор, кафедра «Электронные приборы» Северо-Кавказского металлургического института (государственного технического университета), г. Владикавказ.

Перейти на ГЛАВНОЕ МЕНЮ