



МУЛЬТИПЛИКАТИВНЫЙ ПОКАЗАТЕЛЬ КАЧЕСТВА КАК МЕРА ДЛЯ АНАЛИЗА УРОВНЯ СОГЛАСОВАННОСТИ СТЕПЕНИ АВТОМАТИЗАЦИИ УЧАСТКА МЕХАНОСБОРОЧНЫХ ОПЕРАЦИЙ

М. В. Иванов

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Выполнен анализ роли механосборочных операций в структуре современного приборостроительного производства. Раскрыто содержание категории «согласованность степени автоматизации» применительно к механосборочным участкам. Предложена мера, позволяющая оценить уровень согласованности степени автоматизации технологических процессов или их составных частей, показана взаимосвязь между параметрами поточной линии. Проведено исследование технологических процессов механосборочных цехов приборостроительных организаций. Получены значения взвешенного мультипликативного показателя для каждого процесса. Показано, что значение предложенного показателя не зависят от организационных решений при текущем уровне автоматизации процессов и позволяет количественно оценить потери от рассогласованности автоматизации. Результаты исследования могут быть использованы при проектировании новых и реинжиниринге действующих механосборочных производств в приборостроении.

Ключевые слова: технологический процесс, механосборочные операции, приборостроение, автоматизация, поточная линия, такт, согласованность, мультипликативный показатель качества.

Для цитирования:

Иванов, М. В. Мультипликативный показатель качества как мера для анализа уровня согласованности степени автоматизации участка механосборочных операций / М. В. Иванов // Системный анализ и логистика. – 2026. – № 1(49). – с. 24-30. DOI: 10.31799/2077-5687-2026-1-24-30.

THE MULTIPLICATIVE QUALITY INDICATOR AS A MEASURE FOR THE CONSISTENCY ANALYSIS LEVEL OF THE AUTOMATION DEGREE OF MECHANICAL ASSEMBLY OPERATIONS SECTION

M. V. Ivanov

St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

An analysis of mechanical assembly operations role in the structure of modern instrumentation production is conducted. The "consistency of automation" concept is explored as it applies to mechanical assembly areas. A measure is proposed for assessing the level of automation consistency in technological processes or their components, and the relationship between flow line parameters is demonstrated. A study of the technological processes of mechanical assembly sections at instrumentation organizations was conducted. Weighted multiplicative indicators were obtained for each process. It is shown that the proposed indicator is independent of organizational decisions at the current level of process automation and allows for a quantitative assessment of losses due to automation inconsistency. The results of the study can be used in the design of new and reengineering of existing mechanical assembly facilities in instrumentation.

Keywords: engineering process, mechanical assembly operations, instrumentation, automation, production line, tact, consistency, multiplicative quality indicator.

For citation:

Ivanov, M. V. The multiplicative quality indicator as a measure for the consistency analysis level of the automation degree of mechanical assembly operations section / M. V. Ivanov // System analysis and logistics. – 2026. – № 1(49). – p. 24-30. DOI: 10.31799/2077-5687-2026-1-24-30.

Введение

Механосборочные операции представляют собой совокупность технологических процессов, в ходе которых осуществляется соединение деталей и узлов в готовые изделия или сборочные единицы [1]. В структуре машиностроительного и приборостроительного производства эти операции занимают особое место, являясь финишным этапом изготовления продукции. С другой стороны, именно на сборочных участках скапливается наибольший объем незавершенного производства и возникает максимальное количество логистических заторов ввиду их значительной трудоемкости [2]. Эффективность производства в целом



напрямую зависит от того, насколько рационально организован механосборочный участок.

Степень автоматизации технологического процесса – это количественная характеристика, показывающая долю функций управления и исполнения, переданных от человека техническим средствам [3]. Для отдельной операции коэффициент автоматизации k может быть рассчитан по формуле:

$$k = \frac{T_{авт}}{T_{общ}}, \quad (1)$$

где $T_{авт}$ – время выполнения операции в автоматическом режиме, $T_{общ}$ – общее время выполнения операции. Значение коэффициента автоматизации, близкое к единице, свидетельствует о высокой степени автоматизации процесса.

Внедрение элементов концепции «Индустрия 4.0» и «Индустрия 5.0» делает автоматизацию повсеместным явлением в сфере производства [4]. Однако практика внедрения новых технологий показывает, что максимальный эффект достигается не при полной автоматизации каждой операции по отдельности, а при создании согласованных цифровых цепочек [5].

Основными параметрами любой поточной линии являются:

- такт - интервал времени, через который периодически выпускаются изделия или сходят с линии [6];
- количество рабочих мест (расчетной и фактическое) [7];
- коэффициент загрузки рабочего места [8].

Выражения основных параметров поточной линии представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Выражения основных параметров поточной линии

	Такт поточной линии	Количество рабочих мест (расчетное)	Коэффициент загрузки рабочего места
Расчетная формула	$r = \frac{F_э}{N}$	$K_{i p} = \frac{t_i}{r}$	$K_{заг} = \frac{K_{i p}}{K_{i ф}}$

где $F_э$ – эффективный фонд времени работы линии за период (в минутах), N - программа выпуска за тот же период (шт.), t_i – время выполнения операции на i -ом рабочем месте, $K_{i p}$ – расчетное количество рабочих мест на i -ю операцию, $K_{i ф}$ – фактическое количество рабочих мест на i -ю операцию, полученное округлением в большую сторону расчетного количества рабочих мест.

Длительность производственного цикла обработки партии изделий в значительной степени определяется наиболее загруженным рабочим местом [9]. Если на каждой операции закреплено одно рабочее место, то:

$$T_u = \sum_{i=1}^n t_i + (N_{узод} - 1) \cdot \max(t_i), \quad (2)$$

где $\max(t_i)$ – время выполнения операции на наиболее загруженном рабочем месте, $N_{узод}$ – размер партии. Как видно из формулы (2), именно максимальное время операции вносит



определяющий вклад в общую длительность цикла, что напрямую связывает организацию производства во времени с эффективностью использования автоматизированного оборудования.

Разработка меры согласованности степени автоматизации механосборочных процессов

Под согласованностью степени автоматизации понимается такое соотношение уровней автоматизации последовательно расположенных рабочих мест (операций) в единой технологической цепочке, которое обеспечивает минимизацию простоев оборудования и межоперационных заделов при заданной программе выпуска. Нарушение согласованности степени автоматизации на механосборочных участках приводит к следующим негативным последствиям:

1. **Возникновение «узких мест»:** операция с наименьшим уровнем автоматизации (или наибольшим временем выполнения) ограничивает производительности всей системы, независимо от уровня автоматизации остальных операций.
2. **Рост незавершенного производства:** перед операциями с низкой степенью автоматизации накапливаются заделы, что требует дополнительных складских площадей.
3. **Снижение эффективности использования оборудования:** высокоавтоматизированные операции простаивают в ожидании поставки деталей с предыдущих, менее автоматизированных, участков.
4. **Усложнение производственного планирования:** неоднородность в автоматизации требует создания буферных запасов деталей и усложняют планирование.

В теории квалиметрии и системного анализа для оценки сложных объектов используется несколько подходов к построению показателей качества. Одним из них является комплексный показатель, который характеризует несколько свойств системы [10]. Адаптируем средневзвешенный геометрический (мультипликативный) показатель [11] применительно к оценке степени согласованности уровня автоматизации:

$$Q = \prod_{i=1}^n k_i^{w_i}, \quad (3)$$

где Q – комплексный показатель качества, w_i – весовой коэффициент i -й операции, причем $\sum_{i=1}^n w_i = 1$, k_i – коэффициент автоматизации i -й операции.

Вес операции может быть определен как экспертным методом, так и пропорционально ее доле в общей трудоемкости изготовления изделия:

$$w_i = \frac{t_i}{\sum_{j=1}^n t_j}, \quad (4)$$

где t_i – время выполнения i -й операции.

Чем больше времени занимает операция, тем больший вклад она вносит в производственный цикл и тем важнее ее автоматизация для общей производительности.

Показатель Q сохраняет чувствительность к операциям с низким уровнем автоматизации, которая регулируется весовыми коэффициентами. Если операция с низким



значением k_i имеет малый вес (например, вспомогательная операция), ее влияние на Q будет незначительным. Если же низкое значение k_i имеет операция с большим весом (ключевая операция), это приведет к резкому снижению Q , сигнализируя о проблеме.

Исследование взаимосвязи мультипликативного показателя качества и его компонентов

Для проверки теоретических положений и подтверждения практической значимости предложенного взвешенного мультипликативного показателя проведено исследование технологических процессов приборостроительных предприятий, осуществляющих механосборочные работы.

Для каждого процесса были собраны следующие данные:

- время выполнения каждой операции t_i , мин.;
- эффективный фонд времени работы линии $F_э$, мин./смену;
- программа выпуска N , шт./смену;
- коэффициенты автоматизации по каждой операции k_i ;
- фактическое количество рабочих мест $K_{i\phi}$ по данным предприятия.

На основе исходных данных для каждого технологического процесса рассчитаны:

- Такт поточной линии;
- Расчетное количество рабочих мест;
- Коэффициент загрузки;
- Весовые коэффициенты операций, пропорционально трудоемкости;
- Взвешенный мультипликативный показатель.

Результаты расчетов по каждому технологическому процессу представлены в таблице 2.

Таблица 2 - Результаты расчета технологических процессов механосборочных участков

№	Наименование операции	t_i , мин	K_{ip}	$K_{i\phi}$	$K_{заг}$	k_i	w_i	Q
1	Сборка датчика давления	$F_э = 450$ мин./смену, $N = 45$ шт./смену, $r = 10,0$ мин./шт.						0,81
	Установка корпуса (базовая деталь)	1,8	0,18	1	0,18	0,85	0,18	
	Запрессовка штуцера (соединение с натягом)	2,2	0,22	1	0,22	0,82	0,22	
	Резьбовое соединение чувствительного элемента	2,0	0,20	1	0,20	0,79	0,20	
	Пайка контактных выводов (неразъемное соединение)	2,1	0,21	1	0,21	0,81	0,21	
	Контроль герметичности (испытания)	1,9	0,19	1	0,19	0,78	0,19	
2	Монтаж блока питания	$F_э = 480$ мин./смену, $N = 40$ шт./смену, $r = 12,0$ мин./шт.						
	Установка печатной платы (базирование)	1,8	0,15	1	0,15	0,92	0,15	0,69
	Установка разъемов (закрепление)	2,2	0,18	1	0,18	0,88	0,18	
	Пайка волной (электромонтаж)	6,0	0,50	2	0,25	0,45	0,25	
	Установка радиаторов (механическое крепление)	1,9	0,16	1	0,16	0,90	0,16	
	Маркировка (нанесение обозначений)	1,7	0,14	1	0,14	0,87	0,14	
Электрический контроль (испытания)	1,4	0,12	1	0,12	0,85	0,12		



Продолжение таблицы 2

№	Наименование операции	t_i , мин	$K_{i p}$	$K_{i \phi}$	$K_{зз}$	k_i	w_i	Q
3	Сборка оптического модуля	$F_3 = 480$ мин./смену, $N = 20$ шт./смену, $r = 24,0$ мин./шт.						0,62
	Установка базового корпуса	4,8	0,20	1	0,20	0,95	0,20	
	Ручная регулировка оптической системы	9,6	0,40	1	0,40	0,40	0,40	
	Склеивание оптических элементов (неразъемное соединение)	6,0	0,25	1	0,25	0,90	0,25	
	Контроль параметров (оптические испытания)	3,6	0,15	1	0,15	0,85	0,15	
4	Сборка измерительной головки	$F_3 = 450$ мин./смену, $N = 30$ шт./смену, $r = 15,0$ мин./шт.						0,48
	Установка корпуса	2,25	0,15	1	0,15	0,75	0,15	
	Калибровка измерительной шкалы (ручная настройка)	5,25	0,35	1	0,35	0,30	0,35	
	Запрессовка подшипников	3,0	0,20	1	0,20	0,70	0,20	
	Завинчивание крышки	2,7	0,18	1	0,18	0,65	0,18	
	Контроль точности	1,8	0,12	1	0,12	0,60	0,12	
5	Участок ручной сборки трансформаторов	$F_3 = 480$ мин./смену, $N = 15$ шт./смену, $r = 32,0$ мин./шт.						0,27
	Установка каркаса	8,0	0,25	1	0,25	0,25	0,25	
	Намотка обмоток (намоточная операция, вручную)	19,2	0,60	2	0,30	0,30	0,30	
	Изолирование межслойное (укладка изоляции)	6,4	0,20	1	0,20	0,20	0,20	
	Пайка выводов	8,0	0,25	1	0,25	0,35	0,25	

Техпроцесс №1 имеет высокий уровень согласованности ($Q = 0,81$), все операции имеют близкие значения k_i (0,78-0,85). Коэффициенты загрузки низкие (0,18-0,22), что указывает на значительные резервы производительности. Весовые коэффициенты распределены равномерно (0,18-0,22), что свидетельствует о сбалансированности процесса.

В техпроцессе №2 наблюдается уровень согласованности $Q = 0,69$, при среднем уровне автоматизации $k = 0,81$ (как в техпроцессе №1) имеется провал на операции пайки ($k_3 = 0,45$). Операция пайки имеет наибольший вес ($w_3 = 0,25$) и является наиболее трудоемкой. Благодаря введению 2 рабочих мест ($K_{i \phi} = 2$), коэффициент загрузки снижен до 0,25, что устраняет перегрузку. Организационное решение компенсировало технологическое отставание операции пайки, но Q остается на уровне 0,69, сигнализируя о необходимости модернизации этой операции.

Техпроцесс №3, также как и №2, обладает средним уровнем согласованности без дублирования ($Q = 0,62$). Ручная регулировка оптической системы ($k_2 = 0,40$) имеет максимальный вес ($w_2 = 0,40$) и высокий коэффициент загрузки (0,40). Отсутствие дублирования ($K_{i \phi} = 1$) создает умеренную перегрузку на критической операции. Процесс требует либо введения второго рабочего места на ручной регулировке оптической системы, либо частичной автоматизации этой операции для повышения показателя k_2 .

Техпроцесс №4 имеет недостаточный уровень согласованности ($Q = 0,48$). Ручная операция калибровки ($k_2 = 0,30$) имеет наибольший вес ($w_2 = 0,35$). Коэффициент загрузки 0,35 при $K_{i \phi} = 1$ указывает на умеренную перегрузку. Значение $Q < 0,5$ сигнализирует о технологическом отставании. Введение дублирования операций не изменит общего состояния процесса. Требуется коренная модернизация операции калибровки.

В техпроцессе №5 согласованность практически отсутствует ($Q = 0,27$). Все операции



имеют низкие коэффициенты автоматизации (0,20-0,35). Операция намотки ($k_2 = 0,30$) имеет наибольший вес ($w_2 = 0,30$) и дублирована ($K_{i\phi} = 2$), что снизило загрузку до 0,30. Несмотря на дублирование, показатель Q остается низким. Процесс требует комплексной автоматизации всех операций. Организационные методы дают ограниченный эффект.

Таким образом, мультипликативный показатель качества может использоваться как мера для анализа уровня согласованности степени автоматизации участка механосборочных операций, а также позволяет:

- ранжировать процессы по технологическому уровню;
- выявлять операции, требующие модернизации;
- оценивать эффективность организационных решений.

Заключение

Проведено исследование технологических процессов приборостроительных организаций, в ходе которого выявлена необходимость разработки инструмента, позволяющего оценить согласованность механосборочных участков, имеющих различный уровень автоматизации, что актуально в условиях создания цифрового производства в рамках концепции «Индустрия 4.0» и «Индустрия 5.0»;

Предложена мера на основе комплексного показателя качества, позволяющая оценить уровень согласованности степени автоматизации технологических процессов или их составных частей путем использования мультипликативной формы для сохранения чувствительности к технологическим операциям с низким уровнем автоматизации, которая регулируется предложенными весовыми коэффициентами;

Подтверждена практическая значимость предложенной меры путем анализа данных технологических процессов приборостроительных организаций. Показана взаимосвязь между значениями меры согласованности степени автоматизации механосборочного участка и параметрами поточной линии.

Результаты проведенного исследования могут быть применены в приборостроительных организациях, реализующих переход к цифровому производству в рамках концепций «Индустрия 4.0» и «Индустрия 5.0», и содержащих участки механосборочных операций с различным уровнем автоматизации и технологического оснащения при оценке параметров согласованности технологических линий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Филиппенко И. В.* Модели автоматизированного проектирования технологического процесса сборки / И.В. Филиппенко, В.В. Евсеев, С.С. Милютин // ТАРП. – 2015. – №2 (21). – С. 4-7.
2. *Гусев А. А.* Высокоэффективное решение проблемы серийной автоматической сборки изделий на основе целенаправленного построения комплекта связей, обеспечивающего многократное увеличение допусков сборочной системы / А. А. Гусев, И. А. Гусева, К. А. Хайбуллов // Известия МГТУ «МАМИ». – 2008. №2(6). – С. 346-355.
3. *Фролов А. П.* Алгоритм определения степени автоматизации полиграфического производства / А. П. Фролов // Вестник МГУП. – 2012. – №6. – С. 63-66.
4. *Степаненко А. А., Федорова И. К., Землюлина В. Ю.* Переход от Индустрии 4.0 к 5.0: тенденции и перспективы // Российские регионы в фокусе перемен: сборник докладов XVIII Международной конференции. – Екатеринбург: Издательство Издательский Дом «Ажур». – 2023. – С. 178-183.
5. *Данилов А. Д.* Модели для автоматизированного проектирования поточных производств / А. Д. Данилов // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2009. – Т. 5, № 6. – С. 163-166.
6. *Донцов С. С.* Организация поточного производства на предприятиях строительной



- индустрии / С. С. Донцов, В. П. Шеломенцева // Современные технологии управления. – 2024. – №4 (108). – 9 с.
7. Организация и планирование производства промышленных предприятий: учебник: издание второе, дополненное. / К.Б. Доброва [и др.] – М.: Мир науки, 2025. – 262 с.
 8. *Трусова Л. И.* Организация производства и менеджмент в машиностроении: Учебное пособие / Л. И. Трусова, В. В. Богданов, В. А. Щепочкин. – Ульяновск: УлГТУ, 2009. – 63 с.
 9. *Пигнастый О. М.* Дискретно-событийная модель расчета продолжительности производственного цикла изготовления партии изделий / О. М. Пигнастый, Г. К. Кожевников // Научные ведомости: Экономика. Информатика. – 2019. – №2(46). – С. 326-336;
 10. ГОСТ 15467-79. Управление качеством продукции. Основные понятия, термины и определения. – М.: Стандартиформ, 2009. – 22 с.;
 11. ГОСТ 24294-80. Определение коэффициентов весомости при комплексной оценке технического уровня и качества продукции. – М.: Издательство стандартов, 1982. – 10 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Иванов Максим Викторович

К.т.н., старший преподаватель каф. 5 “Инноватики и интегрированных систем качества”
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения
Россия, 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А
E-mail: umka62@list.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Ivanov Maksim Viktorovich

Ph.D. of Engineering Sciences, senior lecturer of the department 5 “Innovation and integrated quality systems”
Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation
67, Bolshaya Morskaya str., Saint-Petersburg, 190000, Russia
E-mail: umka62@list.ru

Дата поступления: 12.03.2026

Дата принятия: 17.03.2026