

# Разработка подхода к оценке длительности выполнения заказа на опытном производстве

Development of approach to estimation of assessment of the duration at pilot production

doi 10.26310/2071-3010.2021.271.5.012



**А. Е. Бром,**  
д. т. н., профессор  
✉ abrom@yandex.ru

**A. E. Brom,**  
doctor of sciences, professor



**Ю. Л. Масленникова,**  
аспирант  
✉ maslennikova.yuliya@yandex.ru

**Yu. L. Maslennikova,**  
postgraduate student

Кафедра промышленной логистики, МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, Российская Федерация  
Department of industrial logistics, Bauman Moscow state technical university, Moscow, Russian Federation

Опытное производство является ядром разработки сложной инновационной техники, чем обуславливается актуальность исследования вопросов управления. Основными целевыми параметрами управления опытным производством являются сроки выполнения производственного заказа. Цель статьи — разработать подход к оценке длительности выполнения заказа на опытном производстве, который будет отвечать его специфике. Предложенный подход к оценке длительности выполнения производственного заказа имеет вид интервальной оценки. В рамках подхода учитывается смещение сроков изготовления заказов, обусловленное спецификой опытного производства, связанной с доводкой, испытаниями и доработкой изделий. В связи с внутренними и внешними факторами, оказывающими влияние на производственную ситуацию, длительность технологических операций предлагается принять за случайную величину. Интервал длительности технологических операций определяется исходя из экспертной оценки типа распределений случайных величин с учетом заданного уровня доверия. Агрегированная оценка длительности выполнения всего заказа основана на оценке суммы длительности каждой операции, полученной с использованием центральной предельной теоремы с наложением Ляпунова. Такой подход в части поддержки принятия управленческих решений позволит устанавливать наиболее реалистичные сроки выполнения производственного заказа и минимизировать вероятность возникновения издержек, связанных со штрафными санкциями или потерей деловой репутации промышленного предприятия, что обеспечивает практическую значимость.

Pilot production is the core of the development of complex innovative equipment, which determines the relevance of the study of management issues. The main target parameter of pilot production management is the duration of the production order. The aim of the article is to develop an approach to determining the duration of production of a complex innovative product, which will meet the pilot production specifics. The proposed approach to determining the duration of production order fulfillment has the form of interval estimation, which represents a scientific novelty. The approach takes into account the shift in the lead time for manufacturing orders, due to the specifics of pilot production, associated with fine-tuning, testing and finalizing the products. Due to the internal and external factors affecting the production situation, the duration of technological operations is proposed to be taken as a random value. The interval of duration of technological operations is determined on the basis of expert evaluation of the type of distributions of random variables, taking into account a given level of confidence. The aggregated estimation of the duration of the entire order is based on the estimation of the sum of the duration of each operation obtained using the Central Limit Theorem with Lyapunov Overlay. Such approach in the part of management decision support will allow to set the most realistic terms of production order fulfillment, minimizing the possibility of costs associated with penalties or loss of business reputation of an industrial enterprise, which provides practical relevance.

**Ключевые слова:** опытное производство, интервальное планирование, интервал длительности, производственный заказ, операция, случайная величина.

**Keywords:** pilot production, interval planning, duration interval, production order, operation, random variable.

## Введение

Опытное производство представляет собой центр разработки и создания инновационных изделий и технологий, модернизации и доработки конструкций, доведения опытных образцов до серийного выпуска. Инновационная продукция опытного производства обеспечивает конкурентоспособность промышленных предприятий на внутреннем и внешнем рынках. Специфика опытного производства характеризуется уникальностью, единичностью, инновационностью производимой продукции и исследовательским характером работ. Опытному производству характерны вероятностный характер и непредсказуемость конечного результата [2-4]. Выделим основные функции опытного производства [6-8, 12, 13]:

- проведение исследовательских работ в области разработки конструкций, технологий, новых изделий;

- доводка конструкций, дизайна, организационно-технологических новшеств;
- испытания опытного образца;
- подготовка и переподготовка кадров при освоении новых технологий и оборудования;
- составление технической документации для перехода к серийному производству
- контроль характеристик и качества в соответствии с ТЗ.

Именно особенности опытного производства обуславливают проблемы по достижению вышеперечисленных целей, что в большинстве случаев приводит к значительным временным и экономическим потерям:

- проектирование и изготовление уникальной продукции или разработка новой технологии могут вызывать нехватку специалистов необходимой квалификации, что приведет к дополнительным внеплановым затратам на поиск необходимых

специалистов или повышение квалификации имеющихся кадров, а также к увеличению длительности производственного цикла;

- исследовательский характер работ и поиск эффективных решений приводят к частой смене конструкторской и последующей технологической документации, их задержке, ошибкам или производственному браку, что также отразится на длительности выполнения заказа и экономических потерях;
- широкая номенклатура изделий обуславливает частую переналадку оборудования, что предполагает дополнительные экономические и временные издержки;
- срочные заказы, вызванные безотлагательной потребностью сторонних предприятий или необходимостью доводки дефектов конструкций, приводят к дополнительным перемещениям, трудозатратам, частой переналадке оборудования, что сказывается на сроках изготовления продукции.

Из этого следует, что именно длительность разработки и изготовления опытного образца является одним из основных количественных показателей конкурентоспособности опытного производства, так как соблюдение плановых временных показателей приведет к своевременному освоению продукции на серийном производстве, выполнению договорных обязательств по срокам сдачи производственного заказа, что в свою очередь позволит предприятию избежать таких издержек, как репутационные потери, штрафные санкции за нарушение договорных обязательств по срокам исполнения или расторжение договора.

Для опытного производства характерны появления возмущающих воздействий различной природы, оказывающих влияние на соблюдение плановых сроков изготовления продукции. С одной стороны, они обусловлены внешними факторами, такими как появление международных санкций, снижение государственного финансирования и инвестиций, срывы сроков поставки материалов и комплектующих, отсутствие на рынке необходимых технологий и оборудования и т. д. С другой стороны, смещение плановых сроков выполнения заказа зависит от возмущений, оказывающих влияние на производственную ситуацию, которые обусловлены самой спецификой опытного производства, приводящих к возвратным операциям, нарушению ритма производства, недостатку производственных ресурсов [9-11, 14, 15].

Функция планирования на опытном производстве направлена на достижение объемных (количество и состав продукции) и временных (срок изготовления) показателей производственной программы предприятия. Очевидно, что соблюдение плановых сроков выполнения заказа обеспечит предприятию высокие экономические показатели. Однако, согласовав с заказчиком (причем заказчиком может быть головное предприятие опытного производства) точную длительность изготовления заказа, обеспечить соблюдение установленных сроков выполнения каждой операции практически невозможно, учитывая факторы новизны и риска опытного производства. Следовательно, возникает сложность обеспечения планирования и

выполнения заказа в точные сроки. Поэтому, для решения первой задачи необходим подход к оценке длительности выполнения производственного заказа, учитывающий специфику опытного производства.

### Методы

Существующие методы календарного планирования включают:

- линейные графики (диаграммы) Ганта;
- сетевое планирование;
- метод балльных оценок с учетом заданной периодичности;
- метод индексной оценки загрузки оборудования;
- метод оптимизации асинхронности.

Однако, ни один из этих методов не учитывает специфику опытного производства, заключающуюся в появлении возвратных операций, внеплановых заказов, которые влияют на длительность выполнения заказа и отражаются на точности планирования.

В рамках подхода предлагается определять сроки выполнения технологических операций и производственного заказа в виде интервальной оценки с заданным доверительным интервалом.

Очевидно, что производственный заказ состоит из множества операций. Предполагая, что длительность выполнения технологической операции является случайной величиной, можно подойти к оценке длительности выполнения заказа как к случайному процессу.

Последовательность действий для оценки интервальной длительности изготовления изделия будет следующей:

- задать уровень достоверности получаемого интервала, (который будет означать вероятность нахождения срока исполнения заказа в интервале, полученном после оценивания);
- собрать экспертные временные данные по каждой операции (и имеющиеся директивные, если операции стандартные);
- указать тип распределения для каждой случайной величины, определить параметры случайной величины;
- оценить интервал длительности выполнения каждой операции;
- выполнить агрегацию всех оцененных интервалов для получения суммарного интервала длительности изготовления заказа.

Для получения оценки длительности одной операции необходимо ввести следующие параметры:

- пусть  $f_1, f_2, \dots, f_n$  — плотности распределения случайных величин, которые указали эксперты, оценивая наиболее реалистичные длительности выполнения операции;
- $C_1, C_2, \dots, C_n$  — веса экспертных данных.

Экспертам предлагается использовать три вида распределений: равномерное (U), треугольное (T) и трапециевидное (Tr), как наиболее подходящих и удобных в оперировании. В табл. 1 приведен пример, в котором несколько экспертов оценили длительность сварочной операции, используя одно из описанных распределений.

Таблица 1

Оценка длительности сварочной операции несколькими экспертами

Эксперт	Эксперт 1	Эксперт 2	Эксперт 3	Эксперт 4
Оценка	Tr (3, 5, 7, 8)	Tr (2, 4, 6, 8)	T (4, 7, 9)	U (4, 7)

Экспертами могут выступать специалисты планово-диспетчерского отдела (ПДО) и планово-распределительного бюро (ПРБ), а также начальник цеха, мастер и распределитель. Так как на опытном производстве отделы ПДО и ПРБ часто объединены в один отдел, в качестве эксперта службы планирования можно выделить одного специалиста. Веса экспертных данных могут быть заданы двумя способами. Если все эксперты считаются одинаково опытными, их веса равны. В ином случае, лицо, принимающее решение, может определить веса экспертных данных в зависимости от их опыта и квалификации, пример представлен в табл. 2.

Основная идея агрегации экспертных оценок заключается в том, что время выполнения одной операции рассматривается, как случайная величина со смешанным распределением:

$$f = \sum_{k=1}^n C_k f_k.$$

Вероятность того, что случайная величина примет значение, лежащее в интервале  $(a, b)$ , равна определенному интегралу в пределах от  $a$  до  $b$ , от плотности распределения этой случайной величины [5]:

$$P(a < X < b) = \int_a^b f(x) dx,$$

где  $a$  и  $b$  — искомые значения интервала длительности выполнения операции,

$$P(a < X < b) \geq \gamma,$$

где  $\gamma$  — заданный уровень доверия.

Таблица 3

Перечень операций заказа

Рама крепления кузова		
№	Наименование операции	Длительность, ч
1	Сборка под сварку	2,66
2	Сварка	2,42
3	Сборка под сварку	0,5
4	Сварка	0,66
5	Слесарная обработка	1,5
6	Слесарная обработка	3,5
7	Сборка под сварку	32
8	Сварка	24
9	Слесарная зачистка	2
10	Сборка под сварку	4,25
11	Сварка	5
12	Слесарная зачистка	1,25
13	Сборка под сварку	3,5
14	Сварка	4,5
15	Слесарная зачистка	1,25
16	Слесарная сборка	3,5
17	Доплатной листок	107

Таблица 2

Распределение весов экспертов

Эксперты	Распределение весов в зависимости от опыта и квалификации
Специалист ПРБ	0,25
Начальник цеха	0,35
Распределитель работ в цеху	0,15
Мастер	0,25

Для нахождения значений  $a, b$  примем следующие уравнения:

$$\begin{cases} b - a \rightarrow \min, \\ \int_a^b f(x) dx \geq \gamma. \end{cases}$$

С целью определения интервала длительности выполнения всего заказа необходимо просуммировать случайные величины каждой операции. Для оценки суммы случайных величин можно использовать центральную предельную теорему (ЦПТ). Поскольку в условиях задачи могут быть распределения разных случайных величин, то необходимо воспользоваться ЦПТ с наложенным условием Ляпунова [1]:

$$a_k = MX_k, b_k^2 = DX_k, B_n^2 = \sum_{k=1}^n b_k^2 = D\left(\sum_{k=1}^n X_k\right), \\ \exists \delta, \delta > 0, \frac{\sum_{k=1}^n M|X_k - a_k|^{2+\delta}}{B_n^{2+\delta}}.$$

Это условие означает, что случайные величины могут иметь разные распределения, но вклад дисперсии каждой случайной величины в общую суммарную дисперсию должен быть мал, чтобы отдельно взятая случайная величина не могла существенно влиять на сумму.

### Результаты

На примере ФГУП «НАМИ», опытно-производственного центра в области исследований, проектирования, построения, разработки и испытаний автотранспортных средств, определим интервал длительности выполнения одного из заказов. На опытное производство «НАМИ» поступил заказ на изготовлению рамы крепления кузова. Перечень операций и их длительности, оцененные одним экспертом представлены в табл. 3.

Уровень доверия следует принимать выше 80%, что обеспечить наиболее точные сроки выполнения заказа. Обычно в научной литературе уровень доверия принимается в интервале  $(0,9; 0,95)$ , однако в исследуемом примере это недопустимо, так как полученный интервал длительности будет слишком широк для принятия решения в производственной ситуации. Поэтому уровень доверия был принят за  $\gamma = 0,8$ .

Первоначальная оценка эксперта была взята за ожидаемую оценку  $(t_e)$ . В качестве распределения были взяты треугольные распределения. Для большей

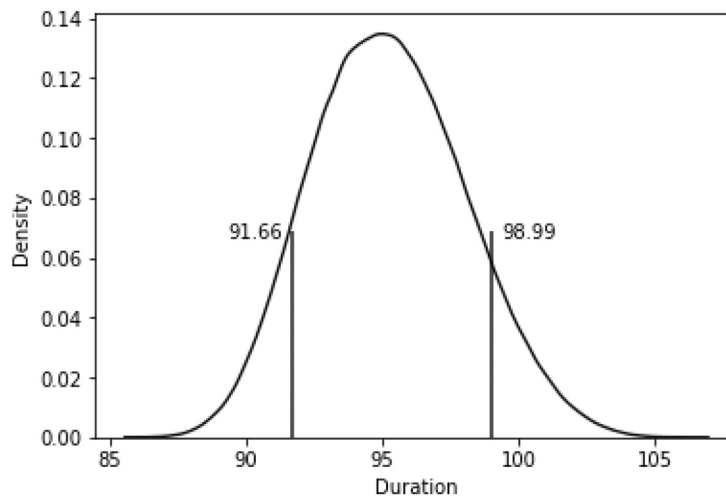


Рис. 1. Интервал длительности выполнения заказа по изготовлению рамы крепления кузова

реалистичности  $t_p$  и  $t_o$  рассчитывались следующим образом:

$$t_o = t_e (0,9 + \varepsilon),$$

$$t_p = t_e (1,2 + \varepsilon),$$

где  $\varepsilon$  — случайная величина, равномерно распределенная на интервале  $[-0,05; 0,05]$ . Оптимистическое время взято с коэффициентом примерно 0,9, а пессимистическое примерно с коэффициентом 1,2 с целью минимизации ошибки эксперта.

С заданным уровнем доверия  $\gamma=0,8$  был получен суммарный интервал длительности выполнения производственного заказа (рис. 1).

Из графика (рис. 1) видно, что с вероятностью в 80% длительность изготовления изделия будет лежать в интервале (92; 99) дней. Такой диапазон длительности выполнения заказа можно представить руководителю промышленного предприятия.

### Обсуждения

Инструмент был продемонстрирован на примере регламентированного технологического процесса, в то время как наиболее показателен был бы пример с укрупненным объектом планирования — исследование длительности всей связки опытного производства, включая процессы НИР, проектирования, снабжения, подготовительного производства и циклы испытаний. Такого рода исследования авторы продолжают в последующих работах. Однако, приведенный пример показателен с точки зрения понимания специфики опытного производства, так как даже на длительности детерминированных операций может повлиять появление внеплановых заказов и смена их приоритетности, о чем говорилось в статье [16].

### Выводы

Следует отметить, что интервальная оценка длительности выполнения производственного заказа обладает преимуществами над сетевыми моделями планирования и управления (СПУ), так как с помощью методов СПУ возможно определить только конкретную дату завершения операции или изготовления изделия, следовательно, если даже одна операция введена в план с ошибкой в сроках, весь процесс планирования потребует существенных корректив. Кроме того, СПУ не учитывают опыта и квалификации специалистов, определяющих длительности выполнения операций, а также вероятности выполнения производственного заказа в определенные сроки.

Таким образом, предложенный подход к интервальной оценке длительности выполнения производственного заказа можно использовать, как инструмент в части поддержки принятия решений в области оперативного планирования опытного производства. Более того, имея интервальную оценку длительности каждой операции, возможно заранее координировать работу участка, цеха и межцеховое взаимодействие. Контроль выполнения каждой технологической операции в определенном временном диапазоне обеспечит выполнение заказа в сроки, согласованные с заказчиком, что позволит свести к минимуму вероятность возникновения штрафных санкций по неисполнению договорных обязательств и потери деловой репутации предприятия.

Следует отметить необходимость дальнейших исследований в рамках оперативного управления опытным производством, в том числе в разработке подходов к определению потребностей в материальных ресурсах, оснастке, персонале; в определении инструментов диспетчеризации.

### Список использованных источников

1. В. Бенткус. Граница типа Ляпунова//Теория вероятности. Приложение. № 49 (2). 2005. С. 311-323.
2. В. С. Виноградов. Технологическая подготовка производства сварных конструкций в машиностроении. М.: Машиностроение, 1981. 224 с.
3. Е. Б. Вотина, М. П. Шалимов, А. М. Фивейский. Основы технологической подготовки производства: учеб. пособие. Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2017. 168 с.
4. Г. Я. Гольдштейн. Стратегические аспекты управления НИОКР. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. 244 с.
5. А. А. Натан, О. Г. Горбачев, С. А. Гуз. Теория вероятности и математическая статистика: учебное пособие. М.: Можайский полиграфический комбинат, 2011. 144 с.

6. П. А. Руденко. Проектирование технологических процессов в машиностроении: учебное пособие. Киев: Вища школа, 1985. 255 с.
7. Н. И. Рыжков. Производство сварных конструкций в тяжелом машиностроении. Организация и технология. М.: Машиностроение, 1980. 375 с.
8. H. Almgren. Pilot production and manufacturing start-up: the case of Volvo S80//International Journal of Production Research. 2000. Vol. 38. №. 17. 4577-4588 p.
9. V. A. Vasiliev, A. B. Mayborodin, S. V. Aleksandrova, X. D. Kramarenko. Multi-agent programming technology as the instrument of operational management systems implementation in pilot production//International Conference «Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies» (IT&QM&IS). IEEE, 2019. 320-322 p.
10. R. Hagen. Modelling the functional behaviour of a flexible pilot production plant. BS thesis. University of Twente, 2019.
11. C. Henrionnet, L. Pourchet, P. Neybecker et al. Combining innovative bioink and low cell density for the production of 3D-Bioprinted cartilage substitutes: a pilot study//Stem cells international. 2020. 2020 (3-4): 1-16.
12. X. Luan, Q. Zhang, O. E. Fakir et al. Uni-Form: a pilot production line for hot/warm sheet metal forming integrated in a Cloud Based SMARTFORMING platform//Advanced High Strength Steel and Press Hardening: Proceedings of the 3rd International Conference on Advanced High Strength Steel and Press Hardening (ICHSU2016). 2017. P. 492-497.
13. E. Lutters, J. de Lange, R. G. J. Damgrave/ Virtual dashboards in pilot production environments//International Conference on Competitive Manufacturing, COMA 2019: Knowledge valorisation in the age of digitalization. 2019. P. 22-27.
14. Y. Maslennikova, A. Brom. Methodology of Quantitative and Qualitative Evaluation of an Industrial Enterprise Digital Potential on the Example of Evaluation of the personnel Resources Component//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 666(6), 062100.
15. M. Zharova, S. Shirokova, O. Rostova. Management of pilot IT projects in the preparation of energy resources//E3S Web of Conferences. EDP Sciences, 2019. Vol. 110. P. 02033.
16. А. Е. Бром, Ю. Л. Масленникова. Оценка организационной устойчивости опытного производства с учетом приоритетности выполнения заказов//Автоматизация в промышленности. 2021. № 8.

#### References

1. V. Bentkus. Granica tipa Lyapunova [Lyapunov type boundary]//Teoriya veroyatnosti. Prilozhenie [Probability Theory. Supplement]. № 49 (2). P. 311-323. (In Russ.)
2. V. S. Vinogradov. Tekhnologicheskaya podgotovka proizvodstva svarnykh konstruktsiy v mashinostroyeni [Technological preparation of welded structures production in mechanical engineering]. M.: Mashinostroyeniye, 1981. 224 p. (In Russ.)
3. E. B. Votynova, M. P. Shalimova, A. M. Fiveyskiy. Osnovy tekhnologicheskoy podgotovki proizvodstva: ucheb. posobie [Fundamentals of technological preparation of production]. Ekaterinburg: Izdvo Ural. un-ta, 2017. 168 p. (In Russ.)
4. G. Ya. Gol'dshtejn. Strategicheskie aspekty upravleniya NIOKR [Strategic aspects of R&D management]. Taganrog: Izdvo TRTU, 2000. 244 p. (In Russ.)
5. A. A. Natan, O. G. Gorbachev, S. A. Guz. Teoriya veroyatnosti i matematicheskaya statistika [Probability Theory and Mathematical Statistics]. M.: Mozhajskij poligraficheskij kombinat, 2011. 144 p. (In Russ.)
6. P. A. Rudenko. Proektirovaniye tekhnologicheskikh processov v mashinostroyeni [Design of technological processes in mechanical engineering]. Kiev: Vishcha shkola, 1985. 255 p. (In Russ.)
7. N. I. Ryzhkov. Proizvodstvo svarnykh konstruktsiy v tyazhelom mashinostroyeni. Organizatsiya i tekhnologiya [Production of welded structures in heavy engineering. Organization and technology]. M.: Mashinostroyeniye, 1980. 375 p. (In Russ.)
8. H. Almgren. Pilot production and manufacturing start-up: the case of Volvo S80//International Journal of Production Research. 2000. Vol. 38. №. 17. 4577-4588 p.
9. V. A. Vasiliev, A. B. Mayborodin, S. V. Aleksandrova, X. D. Kramarenko. Multi-agent programming technology as the instrument of operational management systems implementation in pilot production//International Conference «Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies» (IT&QM&IS). IEEE, 2019. 320-322 p.
10. R. Hagen. Modelling the functional behaviour of a flexible pilot production plant. BS thesis. University of Twente, 2019.
11. C. Henrionnet, L. Pourchet, P. Neybecker et al. Combining innovative bioink and low cell density for the production of 3D-Bioprinted cartilage substitutes: a pilot study//Stem cells international. 2020. 2020 (3-4): 1-16.
12. X. Luan, Q. Zhang, O. E. Fakir et al. Uni-Form: a pilot production line for hot/warm sheet metal forming integrated in a Cloud Based SMARTFORMING platform//Advanced High Strength Steel and Press Hardening: Proceedings of the 3rd International Conference on Advanced High Strength Steel and Press Hardening (ICHSU2016). 2017. P. 492-497.
13. E. Lutters, J. de Lange, R. G. J. Damgrave/ Virtual dashboards in pilot production environments//International Conference on Competitive Manufacturing, COMA 2019: Knowledge valorisation in the age of digitalization. 2019. P. 22-27.
14. Y. Maslennikova, A. Brom. Methodology of Quantitative and Qualitative Evaluation of an Industrial Enterprise Digital Potential on the Example of Evaluation of the personnel Resources Component//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 666(6), 062100.
15. M. Zharova, S. Shirokova, O. Rostova. Management of pilot IT projects in the preparation of energy resources//E3S Web of Conferences. EDP Sciences, 2019. Vol. 110. P. 02033.
16. А. Е. Бром, Ю. Л. Масленникова. Otsenka organizatsionnoy ustoychivosti opytnogo proizvodstva s uchetoм priorytetnosti vypolneniya zakazov//Avtomatizatsiya v promyshlennosti 2021. № 8. (In Russ.)