

УДК 347.823.21

DOI 10.51955/2312-1327_2024_2_27

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВЫХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ АПРИОРНОЙ ИНФОРМАЦИИ

*Николай Сергеевич Херсонский,
orcid.org/0000-0003-1296-7131,
кандидат технических наук,
генеральный директор ООО «СОЮЗСЕРТ»,
ул. Викторенко, д. 7, корпус 30
Москва, 125167, Россия
hersn@yandex.ru*

*Людмила Геннадьевна Большедворская,
orcid.org/0000-0002-1425-7398,
доктор технических наук, профессор кафедры БПиЖД
Московский государственный технический
университет гражданской авиации,
Кронштадтский бульвар, д. 20
Москва, 125493, Россия
l.bolshedvorskaya@mstuca.aero*

Аннотация. Эта работа является продолжением двух этапов научного исследования, где разработан и изложен универсальный алгоритм системы применения статистических методов для управления несоответствующей продукцией.

Полученные результаты и их анализ позволили расширить круг исследований и разработать рекомендации по повышению эффективности процесса планирования и прогнозирования технико-экономических показателей предприятия в зависимости от априорной информации о влиянии внешних и внутренних факторов.

Ключевые слова: априорная информация, статистические методы, несоответствующая продукция.

PRODUCT QUALITY OUTPUT PREDICTION BASED ON A PRIORI INFORMATION

*Nikolai S. Khersonsky,
orcid.org/0000-0003-1296-7131,
candidate of technical sciences,
General Director of SOYUZCERT LLC,
7, building 30, Viktorenko St.
Moscow, 125167, Russia
hersn@yandex.ru*

*Ludmila G. Bolshedvorskaya,
orcid.org/0000-0002-1425-7398,
Doctor of Technical Sciences
Professor of the Department of BP&ZhD
Moscow State Technical University of Civil Aviation,
20, Kronshtadtsky blvd
Moscow, 125493, Russia
l.bolshedvorskaya@mstuca.aero*

Abstract. This work is a continuation of two stages of scientific research, where a universal algorithm for a system of applying statistical methods to manage non-conforming products has been developed and outlined.

The results obtained and their analysis made it possible to expand the range of studies and develop recommendations for improving the efficiency of the planning and forecasting of the technical and economic indicators of the enterprise, depending on a priori information on the influence of external and internal factors.

Keywords: a priori information, statistical methods, non-conforming products.

Введение

На фоне изменения научно-технического прогресса и активного внедрения в производство новых материалов и технологий производств, специалисты, принимающие решения о соответствии качества продукции требованиям нормативной документации, сталкиваются со сложными задачами, одной из которых является задача прогнозирования выходных параметров качества готовой продукции на определенный период времени.

В связи с этим прогнозирование выходных параметров качества продукции в зависимости от априорной (накопленной во времени) информации имеет большое значение, поскольку может являться основой для разработки текущего, оперативного и стратегического планирования выпуска продукции высокого качества и необходимого объема.

Предложенная математическая модель и использование актуализированной априорной информации позволяет обеспечить прогнозирование выходных параметров качества деталей и готовой продукции на определенный период времени (неделю, месяц, полгода и т.д.).

Материалы и методы

Для предприятия планирование деятельности (текущее, тактическое и стратегическое) на основе прогноза технико-экономических показателей имеет существенное значение. Достоверность и объективность прогноза зависят от априорной информации, формируемой под воздействием изменений внешних и внутренних факторов среды предприятия.

К внешним факторам относятся политическая и геополитическая обстановка, изменения в мировой экономике, изменения в технологической и социальной сферах развития.

Внутренние факторы формируются внутри предприятия и зависят, в основном, от результатов работы предприятия в целом.

В настоящее время способы сбора, формирования базы статистической информации по каждому из факторов и управление полученными данными проводятся предприятиями на основании отдельных показателей и критериев [Вентцель, 1962; Вентцель и др., 2000; Закс, 1976; Кендалл М., 1973; ДАМА-ДМВОК..., 2020].

Способы использования априорной информации нашли широкое распространение в различных научных исследованиях, обеспечивая повышение достоверности диагностирования и прогнозирования работы сложных систем и объектов в условиях неопределенности [Львович и др., 2003]. На основании

одного из способов, выбор оптимального варианта решения предлагается осуществлять посредством преобразования оптимизационных задач с использованием замены переменных [Дорожко, 2012; Колобов и др., 2019]. Это обусловлено особенностью применимости оптимизационных задач и сложностью описания функционирования отдельных объектов при помощи аналитических моделей.

Такие проблемы могут возникать на этапах проектирования, создавая объективные предпосылки для получения интегрированной априорной информации, полученной при проектных оценках, и результатов обработки экспериментальных данных с целью повышения достоверности планирования и диагностирования надежности объектов, изделий, продуктов авиационной, судостроительной, машиностроительной и других отраслей промышленности [Кишман-Ливанова, 2017; Пестунов и др., 2007; Стрельников, 2003].

Наиболее распространенными методами для построения и анализа моделей технологического процесса создания продукции являются методы линейного программирования и корреляционно-регрессионного анализа, связывающие значения выходного параметра y с управляющими параметрами (входными параметрами) x_1, x_2, \dots, x_n . Однако, такие модели очень сложны, особенно для большого числа управляющих переменных.

Кроме этого, большинство технологических процессов изготовления различной продукции организованы так, что на управляющие переменные (удельное давление прессования, масса навески, температура, различные усилия обжима, крутящие моменты и др.) наложены ограничения, т.е. они могут изменяться в пределах своих допусков по нормативной документации на продукцию или при их отсутствии – технологических допусков, указанных в технологическом процессе.

Рассмотрим применение метода прогнозирования выходного параметра качества продукции в зависимости от двух управляющих переменных процесса изготовления продукции, на которые не наложены ограничения, и изменение которых определяется «белым шумом» процесса на выходе, на примере технологического процесса прессования цилиндрической детали.

Для процесса прессования детали в качестве выходного параметра принята высота детали H , а ее входами (управляющими переменными) обозначены: удельное давление прессования P и масса навески – M . Для разработки конкретного вида модели процесса прессования детали был спланирован эксперимент таким образом, что удельное давление и масса навески варьировались на трех уровнях. Для получения «белого шума» управляющие переменные изменялись в соответствии с планом случайного эксперимента, причем для каждой комбинации входов на трех уровнях изменения управляющих переменных (0, 1, -1) отпрессовано по десять деталей.

Модель процесса прессования детали, построенная по результатам экспериментов, имеет следующий вид:

$$H_t = 0,5H_{t-1} + 0,5H_{t-2} + 0,05[M_t - 0,5M_{t-1} + 0,5M_{t-2}] - 0,22[P_t - 0,5P_{t-1} + 0,5P_{t-2}] + \alpha_t, \quad (1)$$

где: H_t – значение высоты детали в момент времени t ;

H_{t-1} – значение высоты детали в предыдущие времена $t-1$;

H_{t-2} – значение высоты детали в предыдущие времена $t-2$;

P_t, P_{t-1}, P_{t-2} – значение удельного давления прессования в моменты времени $t, t-1, t-2$;

M_t, M_{t-1}, M_{t-2} – значение массы навески детали в моменты времени $t, t-1, t-2$;

α_t – «белый шум» с дисперсией $\sigma_\alpha^2 = 0,01$.

Для построения оптимальной модели регулирования высоты детали в зависимости от изменений управляющих переменных P и M произведем замену:

$$H_t - \hat{H} = \varepsilon_t; M_t - \hat{M}_t = U_t; P_t - \hat{P}_t = V_t,$$

где $\hat{H}, \hat{M}, \hat{P}$ – номинальные значения этих параметров в нормативной документации на деталь.

ε_t, U_t, V_t – значения отклонений параметров H, M, P в момент времени t .

Результаты эксперимента приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты оценки изменения высоты детали для различных комбинаций управляющих переменных

№№ п/п	Значения выходного параметра процесса прессования – высоты детали для различных комбинаций управляющих переменных (P, M) на трех уровнях (0,+1,-1)									
	0 / 0	-1 / 1	-1 / 1	1 / -1	1 / 1	-1 / -1	1 / -1	-1 / 1	1 / 1	0 / 0
1	92,0	92,3	91,8	92,3	91,9	92,3	91,9	92,4	91,9	92,0
2	92,0	92,4	91,8	92,2	92,0	92,2	91,7	92,3	92,0	92,1
3	92,0	92,4	91,8	92,2	91,8	92,2	91,8	92,4	91,8	92,1
4	92,0	92,4	91,8	92,2	92,0	92,1	91,7	92,3	91,8	92,0
5	92,0	92,2	91,9	92,1	91,8	92,2	91,7	92,4	91,8	92,0
6	92,1	92,4	91,8	92,3	92,0	92,2	91,7	92,4	92,0	92,0
7	92,0	92,3	91,8	92,2	91,9	92,4	91,7	92,5	92,0	92,1
8	92,1	92,5	91,8	92,1	92,0	92,2	91,8	92,4	91,8	92,0
9	92,1	92,4	91,7	92,2	91,9	92,2	91,9	92,4	91,8	92,0
10	92,1	92,4	91,8	92,2	91,9	92,2	91,7	92,2	91,9	92,2

После подстановки ε_t, U_t, V_t в уравнение (1) получим следующее уравнение модели:

$$\varepsilon_t = 0,5 \varepsilon_{t-1} + 0,5 \varepsilon_{t-2} + 0,05(U_t - 0,5U_{t-1} - 0,5U_{t-2}) - 0,22(V_t - 0,5V_{t-1} - 0,5V_{t-2}) + \alpha_t. \quad (2)$$

Произведя замену переменной t на $t+1$ в уравнении (2), получим:

$$\varepsilon_{t+1} = 0,5 \varepsilon_t + 0,5 \varepsilon_{t-1} + 0,05(U_{t+1} - 0,5U_t - 0,5U_{t-1}) - 0,22(V_{t+1} - 0,5V_t - 0,5V_{t-1}) + \alpha_{t+1}. \quad (3)$$

В уравнении (3) неизвестно значение α_{t+1} . Если положить, что:

$$0,5(\varepsilon_t + \varepsilon_{t-1}) + 0,05(U_{t-1} - 0,5U_t - 0,5U_{t-1}) - 0,22(V_{t-1} - 0,5V_t - 0,5V_{t-1}) = 0. \quad (4)$$

Тогда получим:

$$\varepsilon_{t+1} = \alpha_{t+1}. \quad (5)$$

Отсюда следует вывод, что отклонение выходного параметра процесса прессования от номинала (высоты детали от ее номинального значения по нормативной документации) равно значению «белого шума».

Заменим уравнение (4) в виде:

$$U_{t+1} - 4,4U_{t+1} = 0,5(U_t - U_{t-1}) - 2,2(V_t - V_{t-1}) - 10(\varepsilon_t - \varepsilon_{t-1}). \quad (6)$$

Уравнение (6) представляет собой прямую в пространстве управления (U, V) , поэтому любая точка, лежащая на этой прямой, будет оптимальной стратегией управления технологическим процессом прессования деталей.

Если в процессе управления масса навески не меняется ($U_t = 0$), то оптимальное управление будет задаваться следующим уравнением:

$$V_{t+1} = 0,5(V_t - V_{t-1}) + 2,27(\varepsilon_t - \varepsilon_{t-1}). \quad (7)$$

Если в процессе управления не изменяется удельное давление прессования ($V_t = 0$), то оптимальное управление будет осуществляться по уравнению:

$$U_{t+1} = 0,5(U_t - U_{t-1}) - 10(\varepsilon_t - \varepsilon_{t-1}). \quad (8)$$

Итак, управление выходным параметром процесса (высотой детали) может осуществляться в зависимости от изменения управляющих переменных, какими являются масса навески и удельное давление прессования.

Таким образом, прогнозирование высоты детали в момент времени $(t+1)$ может осуществляться за счет информации о состоянии процесса и управляющих переменных в момент времени t и $t-1$.

Аналогичный подход может быть использован для разработки моделей оптимального регулирования для технологических процессов изготовления любой продукции.

Разумеется, что нужно предварительно определить выходные параметры продукции (выходы процесса) и управляющие переменные (входы процесса).

Немаловажное значение имеет и точность прогнозирования выходных параметров деталей, которую можно представить в виде конуса. У основания

конуса точность довольно велика, но с увеличением времени прогнозирования точность уменьшается.

Результаты

Практическая применимость предложенного универсального метода, одним из этапов которого является механизм прогнозирования выходных параметров продукции с учетом сформированной априорной информации, позволяет по-новому взглянуть на процесс планирования деятельности предприятия.

Полученные выводы позволили дополнить ранее разработанную систему статистических методов контроля, регулирования и прогнозирования выходных параметров качества продукции, которая включает категорирование выходных параметров продукции, разработку статистической модели производства и анализа продукции, а также статистическое регулирование, статистический приемочный контроль и прогноз выходных параметров в зависимости от технологических процессов их изготовления [Херсонский и др., 2022а; Херсонский и др., 2022б].

Бесспорным достоинством такого подхода является возможность инициировать и оперативно реализовывать корректирующие действия, обеспечивая совершенствование и практическую применимость планов статистического регулирования и приемочного контроля [Херсонский, 2018].

Дискуссия

Особенностью дополненной и усовершенствованной системы является то, что она практически охватывает весь жизненный цикл продукции и может быть связана в единую систему обеспечения качества на предприятии всех видов продукции.

На первом этапе она формирует показатели качества продукции, которыми являются выходные параметры продукции, затем с помощью категорирования этих показателей определяет их влияние на безопасность и работоспособность продукции в целом или другой продукции, куда она входит как составная часть этой продукции. На основании этого разрабатываются таблицы классификации всех параметров и четко устанавливаются гарантии по качеству, предъявляемые к данной продукции в виде уровней качества.

Вторым этапом является этап поддержания и обеспечения качества продукции, который неразрывно связан со статистическим анализом производства и определения готовности производственного процесса обеспечить серийный выпуск продукции с заданными уровнями качества. Этот этап один из важных этапов в жизненном цикле продукции.

Следующий этап – это обеспечение качества продукции за счет регулирования ее выходных характеристик методами статистического регулирования (применения планов статистического регулирования в зависимости от заложенных уровней качества) путем поддержания значений параметров в заданных условиях посредством применения методологии 6-сигм [Рамперсад и др., 2009; Хэрри и др., 2003].

Автоматизация предлагаемого подхода и применение современных IT-технологий позволит организовать получение обратной связи, способствующей реализации оперативных корректирующих действий. Одной из современных технологий является активное внедрение цифровизации, позволяющей практически клонировать двойников продукции или импортозамещающих изделий. В настоящее время под влиянием интенсивного развития возможностей математического и имитационного моделирования на практике реализуются технологии цифровых двойников не только на экспериментальном уровне. Госкорпорация «Росатом», АО «Вертолеты России», АО «ОДК-Климов», ПАО «ОДК-Сатурн» и другие представители российской промышленности активно используют технологии создания цифровых двойников на промышленном уровне, снижая, тем самым, влияние санкционных ограничений на эффективность своей деятельности.

Заключение

Результаты научного исследования, целью которого являлась разработка метода прогнозирования выходных параметров качества продукции в зависимости от априорной информации, в основном достигнуты.

Разработка, проектирование и выпуск новых объектов, изделий и продукции высокого качества и необходимого объема зависят от неопределенности, малой изученности воздействия факторов внешнего и внутреннего характера. В связи с этим процесс формирования априорной информации о качестве выпускаемой продукции является одной из актуальных задач для повышения эффективности процесса планирования и прогнозирования технико-экономических показателей предприятия.

Предложенная математическая модель и использование актуализированной априорной информации позволяют обеспечить прогнозирование выходных параметров качества деталей и готовой продукции на определенный период времени (неделю, месяц, полгода и т.д.).

Практическая применимость представленного в работе метода прогнозирования выходных параметров качества продукции в зависимости от априорной информации позволит организовать изготовление различной продукции посредством регулирования и контролирования технологических процессов.

Полученные результаты и их анализ позволили расширить круг исследования и разработать рекомендации по повышению эффективности процесса прогнозирования и планирования технико-экономических показателей в зависимости от априорной информации с учетом двух важных аспектов:

- проведение статистического прогноза выходных параметров продукции в зависимости от входных параметров технологического процесса;
- проведение статистического прогноза технико-экономических показателей предприятия в зависимости от внешних факторов.

Библиографический список

- Вентцель Е. С.* Теория вероятностей. М.: Главное издательство физико-математической литературы, 1962. 564 с.
- Вентцель Е. С.* Теория вероятностей и её инженерные приложения. 2-е изд. / Е. С. Вентцель, Л. А. Овчаров. М.: Высшая школа, 2000. 480 с.
- Дорошко И. В.* Методика синтеза оптимальных стратегий диагностирования автоматизированных систем управления сложными техническими объектами с использованием априорной информации // Труды СПИИРАН. 2012. № 1 (20). С. 165-185. EDN PССУВР.
- Закс Л.* Статистическое оценивание. М.: Статистика, 1976. 598 с.
- Кендалл М.* Статистические выводы и связи / М. Кендалл, А. Стьюарт. М.: Наука, 1973. 466 с.
- Кишман-Ливанова Т. Н.* Невероятностный подход к решению обратных задач с неопределенной априорной информацией // Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей: материалы 44-й сессии Международного семинара им. Д.Г. Успенского. Москва, 23–27 января 2017 года. М.: Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, 2017. С. 169-173. EDN YIFYRB.
- Колобов А. Ю.* Определение надёжности средств выведения с использованием априорной информации / А. Ю. Колобов, Д. С. Блинов, Е. А. Дикун // Вестник НПО им. С. А. Лавочкина. 2019. № 4(46). С. 52-55. DOI 10.26162/LS.2019.46.4.008. EDN OCOLXO.
- Львович Я. Е.* Организация стратегий поиска оптимальных вариантов сложных систем с использованием априорной и текущей информации / Я. Е. Львович, М. А. Артемов, С. Ю. Белецкая // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Физика, Математика. 2003. №1 С. 152-156. EDN OBGFBH.
- Пестунов И. А.* Классификация больших массивов данных в условиях малой априорной информации / И. А. Пестунов, Д. И. Добротворский, Ю. Н. Синявский // Вычислительные технологии. 2007. Т.12. № S4. С. 50-58. EDN MWDZHP.
- Рамперсад Х.* TPS_LEAN SIX SIGMA. Новый подход к созданию высокоэффективной компании / пер. с англ. ООО «Переводим»; Под. науч. ред. В.Л. Шпера / Х. Рамперсад, А. Эль-Хомси. М.: РИА «Стандарты и качество». 2009. 416 с.
- Стрельников В. П.* Прогнозирование надежности электронных систем при отсутствии отказов с использованием дополнительной априорной информации // Математические машины и системы. 2003. № 3-4. С. 226-232. EDN RXQLQB.
- Херсонский Н. С.* Алгоритм применимости статистических методов контроля и регулирования выходных параметров продукции / Н. С. Херсонский, Л. Г. Большедворская // Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык. 2022а. № 4. С. 6-16. DOI 10.51955/2312-1327_2022_4_6. EDN OWTNSW.
- Херсонский Н. С.* Управление процессом оценки несоответствующей продукции на основе применения статистических методов / Н. С. Херсонский, Л. Г. Большедворская // Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык. 2022б. № 3. С. 33-47. DOI 10.51955/2312-1327_2022_3_33. EDN MOJSCO.
- Херсонский Н. С.* Категорирование параметров по их влияния на безопасность и работоспособность изделий // Компетентность. 2018. № 7(158). С. 9-19. EDN XZUBZB.
- Хэрри М.* 6 SIGMA. Концепция идеального менеджмента / М. Хэрри, Р. Шредер. М.: Из-во ЭКСМО. 2003. 454 с.
- DAMA-DMBOK: Свод знаний по управлению данными. Второе издание / Dama International [пер. с англ. Г. Агафонова]. М.: Олимп–Бизнес, 2020. 828 с.*

References

- DAMA-DMBOK*: A body of knowledge on data management. Second edition. Moscow: *Olympus Business*, 2020. 828 p.
- Dorozhko I. V. (2012). Methodology for synthesizing optimal strategies for diagnosing automated control systems for complex technical objects using a priori information. *Proceedings of SPIIRAN*. 1(20): 165-185.
- Harry M., Schroeder R. (2003). 6 SIGMA. The concept of ideal management. Moscow: From EKSMO, 2003. 454 p.
- Kendall M., Stewart A. (1973). Statistical conclusions and connections. Moscow: Science, 1973. 466 p.
- Khersonsky N. S. (2018). Categorization of parameters by their impact on the safety and performance of products. *Competence*. 7(158): 9-19.
- Khersonsky N. S., Bolshedvorskaya L. G. (2022a). Algorithm of applicability of statistical methods of control and regulation of output parameters of products. *Crede Experto: transport, society, education, language*. 4: 6-16.
- Khersonsky N. S., Bolshedvorskaya L. G. (2022b). Management of the process of assessing non-conforming products based on the use of statistical methods. *Crede Experto: transport, society, education, language*. 3: 33-47.
- Kishman-Livanova T. N. (2017). An incredible approach to solving inverse problems with uncertain a priori information. *Questions of the theory and practice of geological interpretation of geophysical fields: materials of the 44th session of the International Seminar named after D.G. Uspensky*. 169-173.
- Kolobov A. Y., Blinov D. S., Dikun E. A. (2019). Determination of the reliability of the means of removal and the use of a priori information. *Bulletin of NPO named after S.A. Lavochkin*. 4(46): 52-55.
- Lvovich Y. E., Artemov M. A., Beletskaya S. Yu. (2003). Organization of strategies for finding optimal options for complex systems using a priori and current information. *Bulletin of Voronezh State University. Series: Physics, Mathematics*. 1: 152-156.
- Pestunov I. A., Dobrotvorsky D. I., Sinyavsky Yu. N. (2007). Classification of large data sets in conditions of small a priori information. *Computing technologies*. 12(S4): 50-58.
- Rampersad H., El-Homsi A. (2009). TPS_LEAN SIX SIGMA. New approach to creating a highly efficient company. Moscow: RIA "Standards and Quality", 2009. 416 p.
- Strelnikov V. P. (2003). Predicting the reliability of electronic systems in the absence of failures using additional a priori information. *Mathematical machines and systems*. 3-4: 226-232.
- Wentzel E. S. (1962). Probability theory. Moscow: *The main publishing house of physical and mathematical literature*. 1962. 564 p.
- Wentzel E. S., Ovcharov L. A. (2000). Probability theory and its engineering applications. 2nd ed. Moscow: Higher School, 2000. 480 p.
- Zaks L. (1976). Statistical evaluation. Moscow: *Statistics*, 1976. 598 p.