

УДК 519.876.2 : 658.5

**СТРУКТУРНАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ  
В ПРОСТРАНСТВЕ СОСТОЯНИЙ ПРОЦЕССОВ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ**

© 2019 А.Г. Ивахненко, О.В. Аникеева, М.Л. Сторублев

Юго-Западный государственный университет, г. Курск

Статья поступила в редакцию 01.08.2019

В условиях непрерывно изменяющейся внутренней и внешней среды производственные предприятия вынуждены учитывать постоянные изменения требований к их продукции со стороны потребителей и других заинтересованных сторон, а также действия конкурентов. Актуальность данной работы связана с обоснованием целеполагания в области качества на основе прогнозирования совместного изменения показателей качества процессов и продукции во времени. В результате анализа работ по использованию теории автоматического управления (ТАУ) в решении задач управления качеством выявлены недостатки существующих подходов и определена цель исследования, заключающаяся в разработке структурной модели формирования качества продукции в пространстве состояний процессов на основе графических функциональных моделей. В статье представлены функциональные модели деятельности промышленного предприятия. На основании разработанного авторами подхода к преобразованию функциональных моделей процессов в графические модели теории управления в пространстве состояний выполнено преобразование функциональных моделей *IDEFO* в структурные математические модели формирования качества продукции в пространстве состояний процессов на уровнях *A0* и *A1*, а также предварительно определены области их применения. Выделен типовой блок процесса для построения структурной модели формирования качества продукции.

*Ключевые слова:* качество, продукция, процесс, функциональная модель, математическая модель, пространство состояний.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ  
в рамках научного проекта № 19-01-00015.*

**ВВЕДЕНИЕ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ**

Разработка и применение различных моделей в менеджменте качества позволяет принимать обоснованные управленческие решения при управлении взаимосвязанными и взаимодействующими процессами.

В настоящее время наиболее развиты такие методы и инструменты, как *IDEF*, *ARIS* и *BPMN*, которые поддерживают графическое, динамическое имитационное и информационное моделирование бизнес-процессов. Их общим недостатком является то, что они не позволяют определять количественные взаимосвязи

*Ивахненко Александр Геннадьевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры стандартизации, метрологии, управления качеством, технологии и дизайна. E-mail: ivakhnenko2002@mail.ru*

*Аникеева Олеся Владимировна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры стандартизации, метрологии, управления качеством, технологии и дизайна. E-mail: olesya-anikeeva@yandex.ru*

*Сторублев Максим Леонидович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры стандартизации, метрологии, управления качеством, технологии и дизайна. E-mail: max100rublev@yandex.ru*

между показателями качества процессов и выпускаемой продукции. Такие взаимосвязи можно выявить только для отдельных процессов или операций с применением различных статистических методов, но не для всей сети процессов предприятия.

Цель данного исследования – разработка структурной модели формирования качества продукции в пространстве состояний процессов на основе графических функциональных моделей.

**ОБЗОР РАБОТ ПО ПОСТАВЛЕННОЙ ЗАДАЧЕ**

В целом идею использования теории автоматического управления (ТАУ) в решении задач управления качеством нельзя признать новой. В работе [1] рассмотрена формализация задачи управления качеством в пространстве состояний, но для физической системы химического реактора, а не предприятия. Разработка комплекса математических моделей [2] позволила использовать новые подходы к прогнозированию, анализу и контролю за движением финансовых ресурсов во взаимосвязи с построением статических и динамических экономико-ма-

тематических моделей. В работе [3] была выполнена модельная интерпретация понятий и соответствующих свойств, принятых в организационном управлении и менеджменте, к ограниченному количеству терминов и понятий классической теории автоматического управления. Это позволило по результатам анализа математической модели системы организационного управления решить количественными методами задачи: оценку условий устойчивости системы организационного управления предприятия; оценку эффективности и способов ее повышения для системы организационного управления. В работе [4] на основе ТАУ были разработаны и применены динамические модели: системы поддержания плановых темпов; деятельности функционального подразделения; формирования плановых темпов для двух взаимодействующих функциональных подразделений. Отметим, что в работе [5] при анализе инвестиционного процесса утверждается, что только теоретически можно рассматривать его как процесс управления в системе с обратной связью, но, поскольку раскрыть математическую сущность и формализовать передаточные функции ее компонентов практически невозможно, то такая идеализированная модель неприменима.

Анализ представленных выше работ показал, что существуют примеры эффективного применения ТАУ при исследовании различных систем, однако использованные в них подходы и полученные результаты не позволяют оценивать и управлять качеством процессов и продукции, за исключением временных показателей.

### РЕШЕНИЕ ПОСТАВЛЕННОЙ ЗАДАЧИ

На рис. 1 представлена модель деятельности промышленного предприятия в целом – производство промышленной продукции. Ее особенностью является рассмотрение только одного из

всех возможных типов преобразований входов в выходы: «информация» → «информация» (ГОСТ Р ИСО 9001-2015).

В этой модели разделены показатели качества деятельности (процессов) и результатов деятельности (продукции), поскольку учитываются оценки удовлетворенности деятельностью предприятия, как потребителей, так и заинтересованных сторон, например, выпуск продукции высокого качества может осуществляться с применением процессов, оказывающих неблагоприятное воздействие на окружающую среду.

Используя положения ТАУ [6] и предложенный авторами подход к преобразованию функциональных моделей процессов в графические модели теории управления в пространстве состояний, введем в рассмотрение:

1) вектор показателей качества деятельности –  $Y(t) = (Y_1(t), Y_2(t))$ , где  $Y_1(t), Y_2(t)$  – векторы показателей качества собственно самой деятельности и ее результатов, изменяющиеся во времени  $t$ , соответственно;

2) вектор переменных состояния деятельности промышленного предприятия –  $X(t)$ ;

3) вектор управления деятельностью предприятия в области качества –  $U(t) = (Z_1(t), Z_2(t), Z_3(t))$ , где  $Z_1(t)$  – вектор требований и ожиданий потребителей и заинтересованных сторон;  $Z_2(t)$  – вектор показателей удовлетворенности потребителей и заинтересованных сторон;  $Z_3(t)$  – вектор показателей качества комплектующих, сырья и материалов.

В квалиметрии [7-9] при оценке уровня качества выполняют нормирование единичных показателей качества, т.е. переходят от размерных величин к безразмерным относительным величинам принадлежащим диапазону [0; 1]. Считаем, что целесообразно нормировать таким же образом составляющие векторов  $X(t)$  и  $U(t)$ , чтобы их абсолютные значения принадлежали этому диапазону для более удобного представления результатов моделирования.



Рис. 1. Функциональная модель деятельности по производству промышленной продукции

Переменные состояния деятельности полностью ее характеризуют в каждый момент времени, а показатели качества деятельности – за некоторый интервал времени, после некоторого периода времени или через определенные промежутки времени.

Формирование вектора показателей качества деятельности при отсутствии возмущений и помех можно представить с применением оператора  $G$

$$Y(t)=G(X(t)), \quad (1)$$

или векторов показателей качества процессов и продукции с применением операторов  $G_1$  и  $G_2$

$$Y(t) = (Y_1(t), Y_2(t)) = \{G_1, G_2\}(X(t)). \quad (2)$$

Динамику процесса формирования качества процессов и продукции в пространстве состояний можно представить следующим уравнением:

$$\frac{dX(t)}{dt} = H(X(t)) + S(U(t)), \quad (3)$$

где оператор  $H$  характеризует собственные (внутренние) системные свойства деятельности, а оператор  $S$  отражает вклад внешних воздействий по отношению к деятельности на изменение ее состояний.

Выражение (3) описывает класс детерминированных непрерывных систем с линейно входящими управлениями [6], т.е. системы с постоянной структурой. При выпуске различных видов продукции на некотором одном предприятии в выражениях (2) и (3) операторы  $G_1, G_2, H$  и  $S$  могут быть различными. В том случае, если при выпуске одного вида продукции вектор управления деятельностью  $U(t)$  приводит к непрерывному изменению структуры и/или параметров процесса формирования качества процессов и продукции, то выражение (3) неприменимо. При дискретном изменении структуры и/или параметров процесса это выражение можно применять на тех временных интервалах, где  $U(t) = \text{const}$ .

Выражения (1) и (3) являются обобщенной моделью формирования качества продукции в пространстве состояний процессов промышленного предприятия, соответствующей модели его деятельности (рис. 1), т.е. уровню A0 диаграммы IDEF0. На рис. 2 показана графическая структурная модель ТАУ, составленная по выражениям (1) и (3).

Декомпозиция уровня A1 модели деятельности промышленного предприятия представлена на рис. 3, три основных блока процессов кото-

рой соответствуют ГОСТ Р ИСО 9001. Отметим, что в самой методологии IDEF0 (Р 50.1.028-2001) заложена возможность и необходимость учета и совмещения различных точек зрения на количество и взаимосвязи блоков на всех уровнях декомпозиции. Так, в работе [10] в функциональной модели процессов менеджмента качества выделено 4 основные группы, поскольку рассматривались вопросы, связанные с совершенствованием информационной поддержки управления качеством.

Для данного уровня декомпозиции:

1) вектор показателей качества будет иметь составляющие  $Y(t) = (Y_1^{A1}(t), Y_2^{A1}(t), Y_1^{A2}(t), Y_2^{A2}(t), Y_1^{A3}(t), Y_2^{A3}(t))$ , где верхние индексы составляющих вектора  $Y(t)$  соответствуют выделенным процессам: A1 – жизненного цикла продукции на предприятии; A2 – измерения, анализа и управления со стороны руководства; A3 – обеспечения ресурсами;

2) вектор переменных состояния будет включать составляющие  $X(t) = (X^{A1}(t), X^{A2}(t), X^{A3}(t))$ ;

3) вектор управления будет иметь составляющие  $U(t) = (U^{A1}(t), U^{A2}(t), U^{A3}(t))$ .

Составляющая вектора показателей качества на рассматриваемом уровне  $Y_1^{A2}(t) = 0$ , поскольку в соответствии с правилами функционального моделирования у функционального блока не должно быть непосредственной обратной связи, т.е. оценка качества принятых решений при измерении, анализе и управлении не может осуществляться блоком A2. Однако, при декомпозиции блока A2 у  $Y_1^{A2}(t)$  появятся нетривиальные составляющие, например можно будет осуществлять измерения показателей качества процесса принятия решений и самих решений без рассмотрения блоков A1 и A3 – не дожидаясь проявления последствий необоснованных решений при обеспечении ресурсами и при создании продукции.

Теперь уравнение (2) примет следующий вид:

$$Y(t) = (\{G_{11}, G_{12}\}X^{A1}(t), \{G_{21}, G_{22}\}X^{A2}(t), \{G_{31}, G_{32}\}X^{A3}(t)), \quad (4)$$

где операторы в выражении (4) являются декомпозицией операторов  $G_1$  и  $G_2$  для трех рассматриваемых процессов.

На основе анализа модели деятельности промышленного предприятия (рис. 3) был установлен структурный состав вектора управления (зависимость векторов от времени не указана)

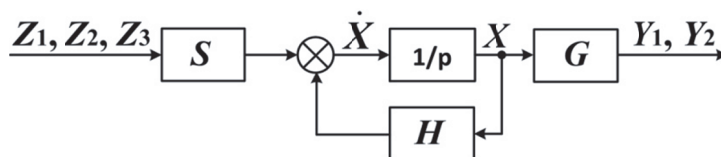


Рис. 2. Структурная модель деятельности по производству промышленной продукции в пространстве состояний ( $1/p$  – символьный оператор интегрирования)

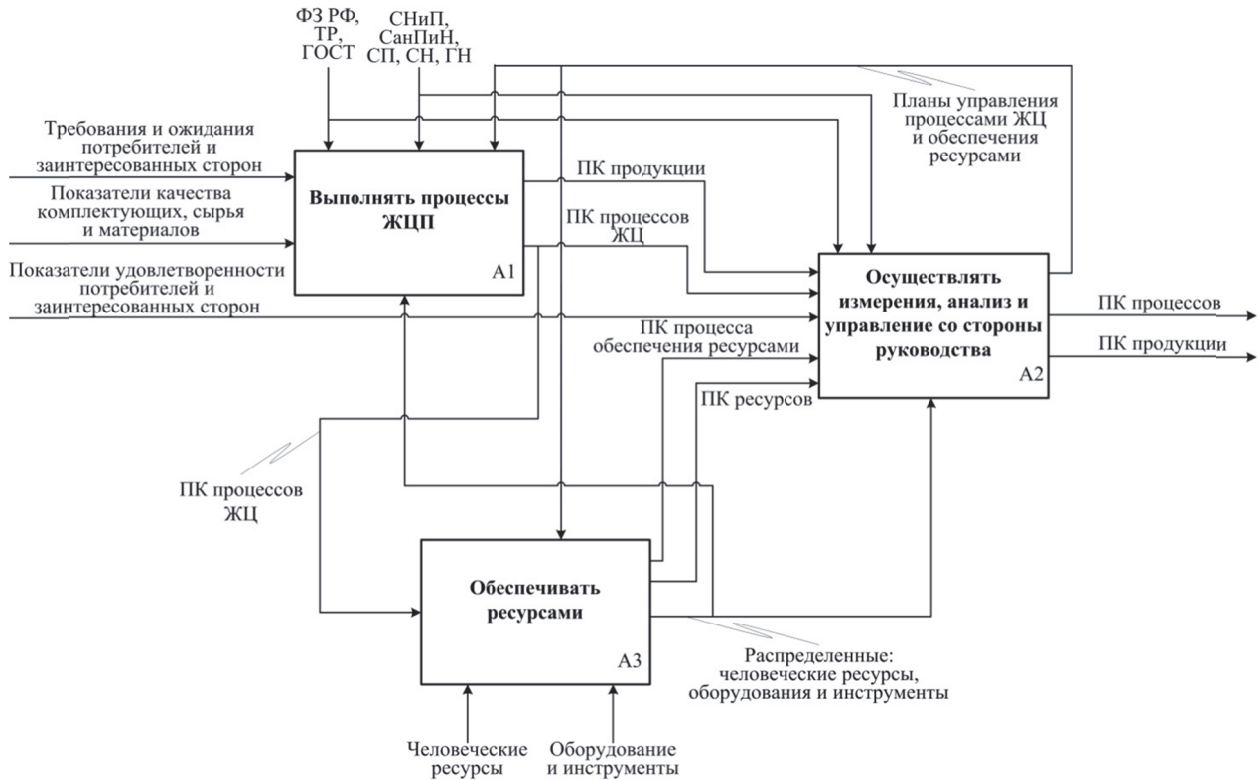


Рис. 3. Уровень A1 функциональной модели деятельности промышленного предприятия

$$U^{A1} = Y_2^{A2}; U^{A2} = (Y_1^{A1}, Y_2^{A1}, Y_1^{A3}, Y_2^{A3}, Z_1, Z_2, Z_3); U^{A3} = (Y_2^{A2}). \quad (5)$$

С учетом (5) уравнения (3) примут вид

$$\frac{dX^{A1}}{dt} = H_1(X^{A1}) + S_1(Y_2^{A2}),$$

$$\frac{dX^{A2}}{dt} = H_2(X^{A2}) + S_2(Y_1^{A1}, Y_2^{A1}, Y_1^{A3}, Y_2^{A3}, Z_1, Z_2, Z_3), \quad (6)$$

$$\frac{dX^{A3}}{dt} = H_3(X^{A3}) + S_3(Y_2^{A2}).$$

В свою очередь выражения (4) и (6) являются обобщенной моделью формирования качества продукции в пространстве состояний процессов промышленного предприятия, соответствующей модели его деятельности (рис. 3) на уровне A1 диаграммы IDEF0. Графическая структурная модель, составленная по выражениям (4) и (6), показана на рис. 4.

Сравнение моделей, представленных на рис. 1, 2 и рис. 3, 4, показывает, что исследование качества продукции в пространстве состояний процессов можно выполнять на различных уровнях декомпозиции деятельности предприятия. Целесообразность выбранного уровня будет определяться структурами операторов  $G$ ,  $H$  и  $S$ , а также временными затратами на определение их параметров. Есть основание полагать, что можно выделить типовой блок процесса (подпроцесса, операции) для их отдельного исследова-

ния. Сравнение моделей, представленных на рис. 1, 2 и рис. 3, 4, показывает, что исследование качества продукции в пространстве состояний процессов можно выполнять на различных уровнях декомпозиции деятельности предприятия. Целесообразность выбранного уровня будет определяться структурами операторов  $G$ ,  $H$  и  $S$ , а также временными затратами на определение их параметров. Есть основание полагать, что можно выделить типовой блок процесса (подпроцесса, операции) для их отдельного исследова-

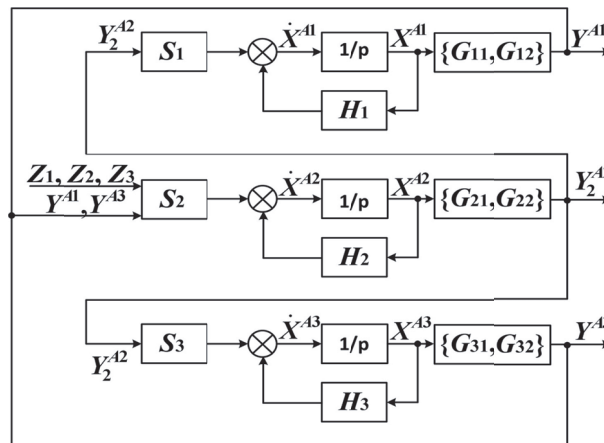


Рис. 4. Структурная модель взаимосвязанных и взаимодействующих процессов производства продукции в пространстве состояний

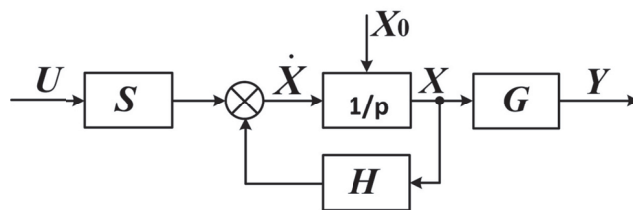


Рис. 5. Типовой блок структурной модели ( $X_0$  – вектор начальных условий)

дования, что позволит использовать известные проверенные данные из различных источников. Такой типовой блок процесса для построения структурной модели формирования качества продукции представлен на рис. 5.

Выделенный типовой блок позволит формализовать построение структурных рассмотренного класса математических моделей, как системы процессов предприятия, так и его отдельных процессов на основе функциональных моделей IDEF0.

К направлениям дальнейших исследований отнесем следующие: раскрытие структуры введенных операторов; исследование свойств математической модели; непосредственное моделирование и анализ результатов; развитие модели при учете неуправляемых (наблюдаемых и ненаблюдаемых) внешних воздействий.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе разработанного ранее подхода к преобразованию функциональных моделей процессов в графические модели теории управления в пространстве состояний выполнено преобразование функциональных моделей процессов IDEF0, рассматривающих тип преобразований входов в выходы «информация» → «информация», в структурные математические модели формирования качества продукции в пространстве состояний на уровнях A0 и A1. Для созданных моделей, относящихся к классу детерминированных непрерывных систем с линейно входящими управлениями, предварительно определены области их применения. Созданные модели могут найти применение при обосновании целей в области качества предприятий, выпускающих различные виды промышленной продукции. Использование этих моделей позволяет учитывать отсутствие или наличие непрерывного или дискретного изменения структуры и/или параметров процесса формирования качества процессов и продукции на промышленном предприятии.

Выделен типовой блок процесса для построения структурной модели формирования качества продукции. Определены направления дальнейших исследований полученных структурных математических моделей.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Невиницын В.Ю. Анализ и синтез комплекса «жидкофазный химический реактор – управляющая система» с использованием методов синергетики: дис. ... канд. техн. наук. Иваново, 2013. 148 с.
2. Кочетова А.Н. Методы и алгоритмы прогнозирования оценок эффективности организационных систем (на примере промышленного производства лесхозов): дис. ... канд. техн. наук. Воронеж, 2004. 187 с.
3. Ганз В.А., Герасимова Е.М., Герасимов Е.Л. Модели систем организационного управления: монография / под науч. ред. В. В. Козловского. Минск: Право и экономика, 2015. 308 с.
4. Пономарёв В. М. Методы и средства повышения безопасности и устойчивости функционирования железнодорожного транспорта в чрезвычайных ситуациях: дис. ... докт. техн. наук. Москва, 2011, 416 с.
5. Булыгина О.В., Емельянов А.А., Емельянова Н.З. Системный анализ в управлении рискованными проектами с применением специальных шкал (на примере процессов инвестирования) // Прикладная информатика. 2016. № 5 (65). С. 31–61.
6. Александров А. Г., Артемьев В. М., Афанасьев В.Н. Справочник по теории автоматического управления / ред. А.А. Красовский. М.: Наука, 1987. 711 с.
7. Азгальдов Г.Г., Костин А.В. Метрология и квалиметрия: вопросы идентификации // Мир измерений. 2010. №1. С. 4-7.
8. Кириллов В.И. Квалиметрическая поддержка многоцелевых задач принятия решений в условиях многофакторности, неопределенности и риска // Метрология и приборостроение. 2008. № 1. С. 24 – 31.
9. Кириллов В.И., Анощенко Н.Б. Применение методов квалиметрии для обоснования принимаемых решений в условиях неопределенности и риска // Доклады БГУИР. 2007. № 3 (20). С. 150 – 155.
10. Дубровин А.В. Методика совершенствования информационной поддержки управления качеством жизненного цикла машиностроительной продукции: дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2019. 177 с.

**STRUCTURAL MODEL OF FORMATION OF PRODUCT QUALITY  
IN THE STATE SPACE OF THE INDUSTRIAL ENTERPRISE PROCESSES**

© 2019 A.G. Ivakhnenko, O.V. Anikeeva, M.L. Storublev

Southwest State University, Kursk

For the constantly changing conditions of internal and external environment manufacturing enterprises have to take into account the constant changes in product requirements from customers, stakeholders, and the actions of competitors. The work relevance is associated with the justification of goal-setting in the quality field based on the prediction of joint change of products quality indicators and processes quality indicators in time. The analysis works on the use of automatic control theory in the solution of quality management problems helped to identify the shortcomings of existing approaches and define the purpose of the research. The research purpose is to develop structural model of product quality formation in the state space of the processes based on graphical functional models. The article presents functional models of an industrial enterprise activity. The transformation of functional IDEF0 models in structural mathematical models for the product quality formation in the state space of the processes on the levels of A0 and A1 is made in article. The transformation is made on the basis of the developed by authors approach to the transformation of the functional process model in graphical models, control theory in state space. Ranges of application of structural mathematical models of formation of product quality are pre-defined. The standard block of process for creation of structural model of formation of product quality is allocated.

*Keywords:* quality, products, process, functional model, mathematical model, state space.

---

*Alexander Ivakhnenko, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Standardization, Metrology, Quality Management, Technology and Design.*

*E-mail: ivakhnenko2002@mail.ru*

*Olesya Anikeeva, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Standardization, Metrology, Quality Management, Technology and Design.*

*E-mail: olesya-anikeeva@yandex.ru*

*Maxim Storublev, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Standardization, Metrology, Quality Management, Technology and Design.*

*E-mail: max100rublev@yandex.ru*