

Машиностроение и машиноведение

УДК 62-1

DOI: 10.30987/article_5bf3cb4d183e11.06361598

Е.А. Ивахненко, И.В. Зотов, Л.М. Червяков

ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ ПРИ ПРИНЯТЫХ СТРАТЕГИЯХ РЕАЛИЗАЦИИ ЭТАПОВ ИХ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА

Предложены два альтернативных понятия стратегии реализации этапов жизненного цикла изделий машиностроения. Определены условия формирования системы показателей качества. Представлены процессы, характеризующие страте-

гии реализации различных этапов жизненного цикла.

Ключевые слова: изделия машиностроения, стратегия, жизненный цикл, процесс, показатель качества.

E.A. Ivakhnenko, I.V. Zotov, L.M. Chervyakov

SUBSTANTIATION OF CHOICE OF ENGINEERING PRODUCE QUALITY INDICES AT ADOPTED STRATEGIES OF STAGE REALIZATION OF THEIR LIFE CYCLE

The aim of the work consists in the substantiation of the choice of engineering produce quality indices at initial stages of their design on the basis of the strategy consideration in the realization of their life cycle stages.

With the use of the well-known system of concepts oriented to the formation of information models there are offered two alternative ideas of the strategy. Processes characterizing strategies of different cycle realization of a life cycle are presented.

Investigation methods: information modeling, the stage analysis of product life cycle.

An investigation result: the information model of the strategy in the realization of the stage "Operation, Repair and Maintenance Operation".

Conclusion: the definition of strategies in the realization of basic stages of machine life at the initial stage designing allows ensuring the compliance of a product design with the strategies adopted and specifying an operation purpose and choosing reasonably quality indices.

Key words: engineering products, strategy, life cycle, process, quality index.

Введение

Конкурентоспособность любой продукции зависит от ее качества. Технологический прорыв нашей страны напрямую связан с качеством различных изделий машиностроения, которое формируется при проектировании, обеспечивается при изготовлении, расходуется при эксплуатации, поддерживается при ремонте и может быть частично перенесено при распоряжении после завершения их эксплуатации. Значимость начальных этапов проектирования связана с разработкой облика (концепции) машин, характеризуемого их показателями качества. Показатели качества изделий машиностроения характеризуют проявление их свойств на различных этапах жизненного цикла.

Анализ литературных источников [1-11] показал, что реализация этапов жиз-

ненного цикла изделий машиностроения определяется принятой стратегией. В настоящее время известны стратегии:

- 1) технического обслуживания и ремонта изделий на уровне однотипных и на уровне разнотипных элементов и устройств;
- 2) проектирования экологичных изделий;
- 3) завершения жизненного цикла изделий.

Однако в научной литературе отсутствует определение данного понятия, поэтому нашли применение частные понятия, характеризующие отдельные свойства. Например, для такого свойства, как надежность, в ГОСТ 27.003 [9] применяется понятие «условия эксплуатации», с использованием которого в этом стандарте

представлена методика выбора номенклатуры задаваемых показателей надежности. Основой методики является общий принцип выбора рациональной (минимально необходимой и достаточной) номенклатуры задаваемых показателей надежности. Отметим, что данный принцип является

частным, поскольку характеризует только одно свойство изделия. В целом условия формирования системы показателей качества машин должны быть основаны на проявлении их свойств, при принятых стратегиях реализации всех этапов жизненного цикла.

Определение понятия стратегии реализации этапов жизненного цикла изделий машиностроения

В работе [1] для наукоемкого машиностроения предложена система понятий (словарь), ориентированных на создание информационных моделей, включающих основные сущности (объекты) реального мира, с использованием символов нотации Бэкуса – Наура:

- «ИЗДЕЛИЕ ::= комбинация материалов, предметов и иных компонентов, получаемая в результате совокупности ПРОЦЕССОВ и предназначенная к использованию по назначению...».

- «ПРОЦЕСС ::= преобразование материальных и/или информационных объектов реального мира при помощи (с использованием) РЕСУРСОВ и под воздействием УПРАВЛЕНИЯ. В ходе процесса могут происходить СОБЫТИЯ...».

- «РЕСУРС ::= средство осуществления ПРОЦЕССА...».

- «СРЕДА ::= окружающая среда: атмосфера, водная среда, космос и т.д.: совокупность факторов, влияющих на СВОЙСТВА и ЗНАЧЕНИЯ свойств ИЗДЕЛИЯ, ПРОЦЕССА, РЕСУРСА».

- «СОСТОЯНИЕ объекта (ИЗДЕЛИЯ, ПРОЦЕССА, РЕСУРСА, СРЕДЫ, ДОКУМЕНТА) ::= совокупность ЗНАЧЕНИЙ изменяемых СВОЙСТВ объекта в момент времени t_0 (из множества – непрерывного или дискретного – допустимых состояний)».

- «СОБЫТИЕ ::= изменение СОСТОЯНИЯ (переход в другое состояние) ИЗДЕЛИЯ, ПРОЦЕССА, РЕСУРСА, СРЕДЫ, ДОКУМЕНТА...».

- «УПРАВЛЕНИЕ ::= ИНФОРМАЦИЯ (УПРАВЛЯЮЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ) в зафиксированном (ДОКУМЕНТ) или незафиксированном виде, определяю-

щая ход ПРОЦЕССА (т.е. последовательность изменения его СОСТОЯНИЙ)».

На основе анализа известных стратегий предложено определение понятия «стратегия реализации этапа жизненного цикла изделия», далее «стратегия».

Стратегия – упорядоченный набор процессов, обеспечивающих достижение или сохранение заданных состояний изделия, связанных с возможными событиями, вызванными воздействиями среды, при допустимых управлениях и с учетом ресурсных ограничений.

Под упорядоченным набором процессов понимается структура их связей, например структура с последовательными связями между процессами, структура с параллельными связями и структура с последовательно-параллельными связями.

На основе приведенного выше определения понятия «состояние» можно дать альтернативное определение стратегии реализации жизненного цикла изделия.

Стратегия – упорядоченный набор процессов, обеспечивающих достижение или сохранение заданных значений свойств изделия, связанных с возможными событиями, вызванными воздействиями среды, при допустимых управлениях и с учетом ресурсных ограничений.

Отметим важное обстоятельство: возможные события вызываются воздействиями среды, т.е. внешними воздействиями по отношению к изделию. Внутренние воздействия рассматриваются как результат внешних воздействий среды, изменивших состояние изделия при предшествующих процессах, в том числе и на предыдущих этапах жизненного цикла. Например, источниками колебаний шпиндельного узла на опорах качения во время обработки детали могут быть:

- изменение твердости заготовки в различных сечениях, погрешности размера и формы заготовки (внешние воздействия, определенные ходом предыдущих процессов – получения заготовки и ее предварительной обработки);

- колебания от работающего рядом оборудования, передающиеся через фундамент (внешние воздействия в течение данного процесса).

Данное определение стратегии реализации основано на рассмотрении этапа жизненного цикла изделия как последовательности смены процессов, вызванных событиями. На рис. 1 представлена временная развертка стратегии реализации этапа жизненного цикла.

Исходя из приведенных выше определений переход от процесса «эксплуатация» к процессу «плановый ремонт» является детерминированным событием – переходом в заранее известное состояние в заранее известный момент времени. А вот переход от процесса «эксплуатация» к

процессу «внеплановый ремонт» является случайным событием – переходом в заранее известное состояние в случайный момент времени. В работе [1] приведены отношения между сущностями реального мира, которые связывают все или только некоторые из перечисленных ранее объектов:

- 1) отношения классификации;
- 2) структурные отношения (отношения входимости);
- 3) отношения преобразования;
- 4) ресурсные отношения;
- 5) отношения принадлежности;
- 6) отношения прямой связи (ассоциативные);
- 7) отношения влияния;
- 8) отношения, связанные с событиями;
- 9) отношения сравнения;
- 10) отношения заменяемости и взаимозаменяемости;
- 11) отношения управления.

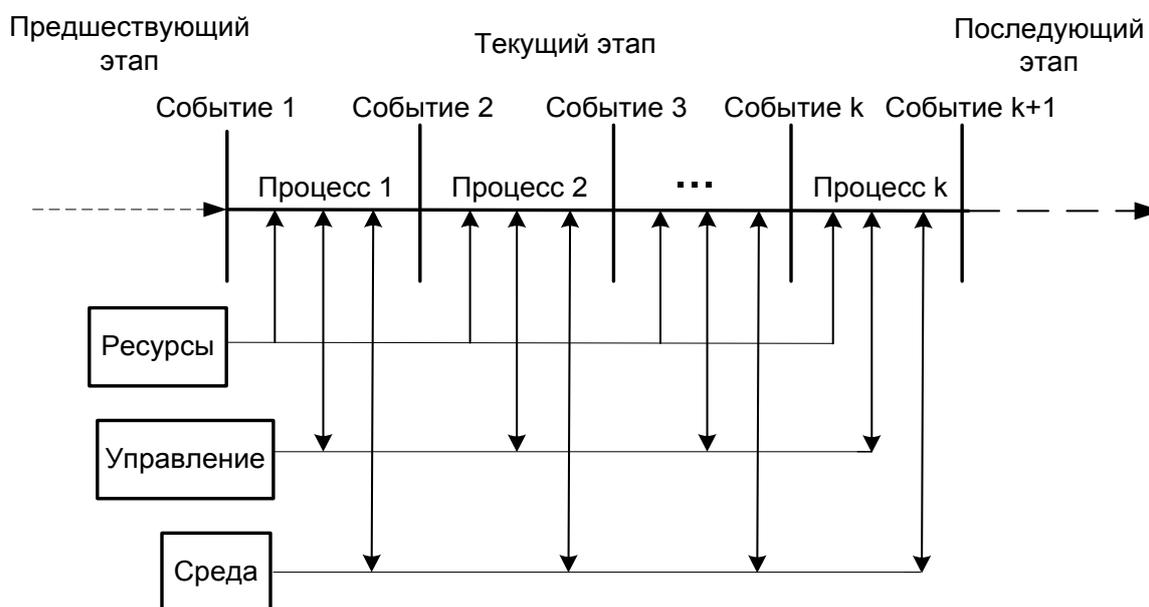


Рис. 1. Временная развертка стратегии реализации этапа жизненного цикла изделия

Информационная модель стратегии реализации этапа «Эксплуатация, ремонт и техническое обслуживание»

На основе представленных сущностей и отношений между ними создана информационная модель стратегии реализации этапа «Эксплуатация, ремонт и тех-

ническое обслуживание», последовательность процессов которой приведена на рис. 2.



Рис. 2. Последовательность процессов стратегии реализации этапа «Эксплуатация, ремонт и техническое обслуживание»

Информационная модель стратегии реализации этого этапа представляет собой следующую последовательность смены процессов, вызванных событиями:

I. *Начало эксплуатации* (событие):

$$P_0 : A_1 \updownarrow P_0, \quad (1)$$

где P_0 – предшествующий процесс (доставка потребителю или монтаж и пусконаладочные работы); A_1 – событие (начало эксплуатации); \updownarrow – отношение порождения события.

Выражение (1) означает, что событие A_1 возникает в процессе P_0 , или процесс P_0 порождает событие A_1 .

$$I \in (C_1, C_2, \dots), \quad (2)$$

где I – изделие; C_1, C_2, \dots – свойства; \in – отношение принадлежности.

Выражение (2) означает, что изделие I в начале эксплуатации имеет свойства C_1, C_2, \dots .

$$\begin{aligned} C_1 \in (m_1 \hat{I} M_1), \\ C_2 \in (m_2 \hat{I} M_2), \\ \dots \end{aligned} \quad (3)$$

Выражения (3) означают, что свойства C_1, C_2 и т.д. имеют значения m_1, m_2, \dots из соответствующих множеств M_1, M_2 и т.д., при этом

$$\begin{aligned} a_1 \leq m_1 I \leq b_1, \\ a_2 \leq m_2 I \leq b_2, \\ \dots \end{aligned} \quad (4)$$

т.е. значения свойств изделия m_1, m_2, \dots находятся в пределах допустимых значений a_1 и b_1, a_2 и b_2 и т.д.

II. *Эксплуатация* (процесс):

$$\sigma_1(I) [P_1(P_1, U_1)] \sigma_2(I), \quad (5)$$

где $\sigma_1(I)$ и $\sigma_2(I)$ – состояния изделия в моменты времени, соответствующие началу эксплуатации и отказу.

Выражение (5) означает, что работоспособное состояние $\sigma_1(I)$ изделия I пре-

образуется в неработоспособное состояние изделия $\sigma_2(I)$ в процессе эксплуатации P_1 , в ходе которого потребляется ресурс P_1 , под управлением U_1 . Неработоспособное состояние $\sigma_2(I)$ характеризуется нарушением хотя бы одного из условий (4).

К ресурсам P_1 относятся: энергия, обслуживающий персонал, сырье и полуфабрикаты, средства на заработную плату обслуживающего персонала, время эксплуатации.

К управлениям U_1 относятся: технологический процесс, реализуемый машиной, руководство по эксплуатации машины, график работы и загрузки машины.

Воздействие окружающей среды в ходе выполнения всех процессов можно охарактеризовать через: температуру, влажность, давление, скорость ветра и т.п.

III. *Отказ* (событие):

$$P_1 : A_2 \updownarrow P_1,$$

где P_1 – предшествующий процесс (эксплуатация); A_2 – событие (отказ).

IV. *Ремонт* (процесс):

$$\sigma_2(I) [P_2(P_2, U_2)] \sigma_3(I),$$

где $\sigma_3(I)$ – состояние изделия в момент времени, соответствующий завершению ремонта.

К ресурсам P_2 относятся: запасные части, расходные материалы, инструменты, приспособления, ремонтный персонал, заработная плата ремонтного персонала, время на выполнение ремонта.

К управлениям U_2 относятся: технологический процесс ремонта, график ремонта.

V. *Продолжение эксплуатации* (событие):

$$P_2 : A_3 \updownarrow P_2,$$

где A_3 – событие (продолжение эксплуатации).

VI. *Эксплуатация* (процесс):

$$\sigma_3(I) [P_3(P_3, U_3)] \sigma_4(I),$$

где $\sigma_3(I)$ и $\sigma_4(I)$ – состояния изделия в моменты времени, соответствующие возобновлению эксплуатации и повторному отказу; P_3 – процесс эксплуатации; R_3 – ресурсы, потребляемые в процессе P_3 ; U_3 – управление процессом P_3 .

Ресурсы P_3 и управления U_3 идентичны перечисленным выше для этапа эксплуатации (P_1 и U_1).

VII. *Завершение эксплуатации* (событие):

$$P_3 : A_4 \updownarrow P_3,$$

где A_4 – событие (завершение эксплуатации).

Завершение эксплуатации (при схемном или параметрическом отказе) связано с невозможностью или нецелесообразностью восстановления работоспособности изделия.

Необходимые для реализации этапа жизненного цикла ресурсы R можно определить как

$$R = \sum_{i=1}^k P_i,$$

где P_i – ресурсы для выполнения i -го процесса; k – количество процессов.

Необходимые для реализации этапа жизненного цикла управления U можно определить как

$$U = \bigcup_{i=1}^k U_i,$$

где U_i – управления для выполнения i -го процесса.

Тогда единичный показатель экономичности можно определить через сумму затрат на все виды ресурсов и управлений в течение этапа жизненного цикла, а комплексный показатель экономичности – через сумму затрат на все виды ресурсов и управлений в течение всех этапов жизненного цикла.

Анализ информационной модели стратегии реализации рассмотренного этапа жизненного цикла изделия и временной развертки этой стратегии позволил определить следующие условия формирования системы показателей качества:

1) отсутствия дублирования при учете свойств на этапах жизненного цикла в различных показателях;

2) непротиворечивости показателей качества;

3) учета стратегий реализации этапов жизненного цикла.

В данном случае рассматривается дублирование при задании функционально связанных показателей качества.

Для пояснения первого и второго условий рассмотрим следующий пример. Пусть для обеспечения эффективности сложного изделия задается требование на вероятность безотказной работы $P(t) = 0,98$ в течение 1000 ч, а для обеспечения долговечности – средний ресурс $T = 4000$ ч.

Данное изделие классифицируется по ГОСТ 27.003 [9] как объект:

- конкретного назначения;
- непрерывного длительного применения;
- невосстанавливаемый;
- обслуживаемый и необслуживаемый;
- выполняющий ответственные функции;
- переход которого в предельное состояние при применении по назначению не ведет к катастрофическим последствиям;
- основным процессом, определяющим переход в предельное состояние которого, являются изнашивание и старение;
- неремонтируемый.

Однако эти показатели качества связаны зависимостью $T = \int_0^{\infty} P(t)dt$, т.е. при

задании численного значения вероятности безотказной работы величина наработки на отказ уже будет однозначно определена. Одновременное получение заданных значений вероятности безотказной работы и наработки на отказ возможно только в том случае, когда заранее известен закон распределения $P(t)$ и параметры этого распределения, что на начальном этапе проектирования машины представляется маловероятным. Так, если вероятность безотказной работы имеет экспоненциальный закон распределения $P(t) = e^{-\lambda t}$ с параметром $\lambda = 0,00002$ ч, то $P(t) = 0,98$, а $T = 50000$ ч.

Выполнение третьего условия характеризуют примеры, представленные на рис. 3.

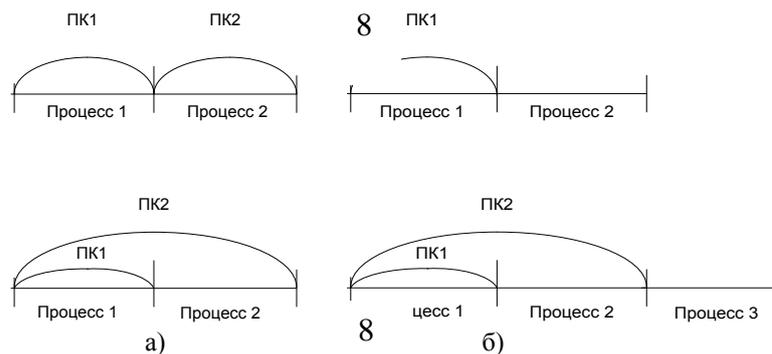


Рис. 3. Учет стратегий при формировании и системы показателей качества (ПК): а - учтены все процессы этапа (правильно); б - не учтены все процессы этапа (неправильно)

На рис. 3 показано, что включаемые в систему показатели качества должны характеризовать *все* процессы этапа. Например, если имеется два процесса - «эксплуатация» и «ремонт», то недопустимо в показателях надежности задавать только установленную безотказную наработку, поскольку этот показатель не учитывает

свойства процесса «ремонт». При этом единичные показатели качества могут характеризовать процесс или его элементы (операции и др.), но не могут характеризовать последовательность процессов (эксплуатация и ремонт и т.п.) или этапов (доставка потребителю и эксплуатация и т.п.).

Процессы стратегий реализации этапов жизненного цикла изделий машиностроения

На рис. 4 представлены процессы, характеризующие стратегии реализации различных этапов жизненного цикла (доставка потребителю, эксплуатация и распоряжение).

Представленная стратегия реализации этапа доставки потребителю (рис. 4а) относится к изделиям, поставляемым в полностью собранном виде. Стратегия реализации этапа эксплуатации (рис. 4б) применяется в методе *TPM (Total Productive Maintenance)*, в котором за счет процесса планового технического обслуживания, обеспечивающего выполнение усло-

вий (4), исключен процесс ремонта [10]. Стратегия распоряжения изделием после завершения его эксплуатации (рис. 4в) является смешанной и предусматривает возможность повторного использования годных компонентов изделия в других машинах, а также использования материалов вышедших из строя компонентов для изготовления деталей для новых машин и замыкания, таким образом, петли жизненного цикла изделия.

В таблице выделены основные процессы различных этапов жизненного цикла машин.



Рис. 4. Процессы стратегий реализации этапов: а - доставка потребителю; б - эксплуатация; в - распоряжение

Таблица

Основные процессы этап ⁹ жизненного цикла изделий

Этапы жизненного цикла	Процессы
1. Проектирование	Разработка технического задания, разработка технического предложения, разработка эскизного проекта, разработка технического проекта, разработка технической документации, разработка опытного образца, нормоконтроль
2. Изготовление	Получение заготовок (литье, ковка, штамповка), механическая обработка, физико-химическая обработка, поверхностно-пластическое деформирование, сборка, контроль
3. Испытания	Ускоренные испытания, испытания под рабочей нагрузкой, экстремальные испытания, неразрушающие испытания, разрушающие испытания
4. Реализация и доставка потребителю	Консервация, упаковка в тару, погрузка, перевозка, разгрузка, распаковка, монтаж
5. Эксплуатация, ремонт и техническое обслуживание	Эксплуатация, ремонт, техническое обслуживание, модернизация, диагностирование, консервация и хранение
6. Распоряжение	Разборка, контроль, измельчение, сортировка, переработка, захоронение, сжигание, ремонт

Определение стратегий реализации основных этапов жизненного цикла (создание, доставка потребителю, эксплуатация и распоряжение) при разработке концепции изделия дает необходимую информацию для последующих этапов проектирования. Так, для ремонтируемых (восстанавливаемых) изделий целесообразно применять разъемные соединения тех компонентов, которые будут заменяться при

ремонте. Напротив, для невосстанавливаемых изделий допустимо применение неразъемных соединений, обеспечивающих большую герметичность. Если для изделия принята стратегия завершения жизненного цикла – «переработка без разборки», то материалы компонентов изделия должны позволять их сортировку с использованием существующих технологий и оборудования [11; 12].

Заключение

Таким образом, на основании изложенного можно утверждать, что определение стратегий реализации основных этапов жизненного цикла машин на начальном этапе проектирования позволяет обеспе-

чить соответствие конструкции изделия принятым стратегиям, уточнить служебное назначение и обоснованно выбрать показатели качества.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Судов, Е.В. Интегрированная информационная поддержка жизненного цикла машиностроительной продукции. Принципы. Технологии. Методы. Модели / Е.В. Судов. - М.: МВМ, 2003. - 264 с.
2. Шептунов, С.А. Жизненный цикл продукции / С.А. Шептунов. - М.: Янус-К, 2003. - 244 с.
3. Allenby, B.R. Design for Environment: A tool whose time has come / B.R. Allenby // SSA Journal. - 1991. - Vol. 12. - № 9.
4. Burke, D. Life-cycle Design for Recyclability / D. Burke, K. Beiter, K. Ishii // Proceedings of the ASME Design Theory and Methodology Conference. - Scottsdale, AZ, 1992. - Vol. 42. - P. 325-332.

5. Campbell, J.D. Maintenance Excellence: Optimizing Equipment Life Cycle Decisions / J.D. Campbell, A.K.S. Jardine. - Marcel Dekker, 2001.
6. Hay, D.C. A Different Kind of Life Cycle: The Zachman Framework / David C. Hay. - Essential Strategies, Inc., 2000.
7. Chena, Jia-Lin. Technological Innovation and Strategy Adaptation in the Product Life Cycle / Jia-Lin Chena, Shang-Jyh Liuband, Ching-Huan Tseng // Technology Management-Strategies & Applications. - Vol. 5. - P. 183-202.
8. Kelly, A. Maintenance Strateg / A. Kelly. - Butterworth-Heinemann, 1997.
9. ГОСТ 27.003-2016. Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности.
10. Кеннеди, Р. Развитие системы ТРМ: от истоков до новейшей версии / Росс Кеннеди // Методы менеджмента качества. - 2005. - № 2. - С. 4-11.
11. Олейник, А.В. Создание конкурентоспособных изделий машиностроения: экологический аспект / А.В. Олейник. - Курск: Изд-во КурскГТУ, 2005. - 284 с.
12. Шубов, Л.Я. Технология твердых бытовых отходов: учебник / Л.Я. Шубов, М.Е. Ставровский, А.В. Олейник; НП «Уником Сервис». - М.: Альфа-М, 2011. - 400 с.
1. Sudov, E.V. *Integrated Information Support of Engineering Product Life Cycle. Principles. Technologies. Methods. Models.* / E.V. Sudov. - М.: MVM, 2003. - pp. 264.
2. Sheptunov, S.A. *Produce Life Cycle* / S.A. Sheptunov. - М.: Janus-K, 2003. - pp. 244.
3. Allenby, B.R. Design for Environment: A tool whose time has come / B.R. Allenby // SSA Journal. - 1991. - Vol. 12. - № 9.
4. Burke, D. Life-cycle Design for Recyclability / D. Burke, K. Beiter, K. Ishii // Proceedings of the ASME Design Theory and Methodology Conference. - Scottsdale, AZ, 1992. - Vol. 42. - P. 325-332.
5. Campbell, J.D. Maintenance Excellence: Optimizing Equipment Life Cycle Decisions / J.D. Campbell, A.K.S. Jardine. - Marcel Dekker, 2001.
6. Hay, D.C. A Different Kind of Life Cycle: The Zachman Framework / David C. Hay. - Essential Strategies, Inc., 2000.
7. Chena, Jia-Lin. Technological Innovation and Strategy Adaptation in the Product Life Cycle / Jia-Lin Chena, Shang-Jyh Liuband, Ching-Huan Tseng // Technology Management-Strategies & Applications. - Vol. 5. - P. 183-202.
8. Kelly, A. Maintenance Strateg / A. Kelly. - Butterworth-Heinemann, 1997.
9. RSS 27.003-2016. Reliability in Engineering. Structure and General Rules for Setting Reliability Requirements.
10. Kennedy, R. Development of TRM system: from sources to latest version / Ross Kennedy // *Methods of Quality Management*. - 2005. - No.2. - pp. 4 - 11.
11. Oleynik, A.V. *Formation of Competitive Engineering Products: Ecological Aspect* / A.V. Oleynik. - Курск: KurskSTU Publishers, 2005. - pp. 284.
12. Shubov, L.Ya. *Technology of Solid Waste: textbook* / L.Ya. Shubov, M.E. Stavrovsky, A.V. Oleynik; SE "Unicom Service". - М.: Alpha-M, 2011. - pp. 400.

Статья поступила в редакцию 20.08.18.

Рецензент: д.т.н., профессор Воронежского государственного
технического университета

Кириллов В.Н.

Статья принята к публикации 10.10.18.

Сведения об авторах:

Ивахненко Евгений Александрович, аспирант кафедры УКМиС Юго-Западного государственного университета, e-mail: neutralterritory@mail.ru.

Зотов Игорь Валерьевич, д.т.н., профессор кафедры ИСиТ Юго-Западного государственного университета, e-mail: kafedra.ist2015@yandex.ru.

Ivakhnenko Evgeny Alexandrovich, Post graduate student of the Dep. UKM&S, South-Western State University, e-mail: neutralterritory@mail.ru.

Zotov Ogor Valerievich, Dr. Sc. Tech, Prof. of the Dep. IS&T, South-Western State University, e-mail: kafedra.ist2015@yandex.ru.

Червяков Леонид Михайлович, д.т.н., профессор кафедры УКМиС Юго-Западного государственного университета, e-mail: chlm@mail.ru.

Chervyakov Leonid Mikhailovich, Dr. Sc. Tech., Prof. of the Dep. UKM&S, South-Western State University, e-mail: chlm@mail.ru.