УДК 005.6+621.81/.85

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КАЧЕСТВА ТЕХНИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ. ЧАСТЬ 1. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СВОЙСТВ НОРМАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИ РАСЧЕТАХ КАЧЕСТВА ТЕХНИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

В.В. Мартишкин, С.А. Зайцев, Ю.А. Сепесева

Разработана методика определения качества технических изделий на основе использования структурной и функциональной моделей изделия (СМ и ФМ). Для расчетов коэффициентов весомостей использованы свойства функций нормального распределения, а для расчетов безотказностей деталей и сборочных единиц использованы СМ и ФМ. Использование функций нормального распределения совместно с СМ и ФМ дает значения весомостей деталей и сборочных единиц более близкие к реальным значениям, вследствие чего показатель качества всего изделия так же становится более близким к реальным значениям. Все это происходит благодаря расчету безотказностей деталей и сборочных единиц на стадии проектирования. Использование предложенной методики повышает объективность оценок качества изделий, так как учитывает их расчетную безотказность и большинство конструктивных и технологических параметров.

Ключевые слова: *качество технических изделий, коэффициенты весомости, надежность, показатели безотказности, закон нормального распределения, дифференциальная функция, интегральная функция.*

QUALITY DETERMINATION OF TECHNICAL PRODUCTS. PART 1: USAGE OF NORMAL DISTRIBUTION CHARACTERISTICS FOR QUALITY ANALYSIS OF TECHNICAL PRODUCTS

V. Martyshkin, S. Zaytsev, Yu. Sepeseva

The technique of determining the quality of technical products through the use of structural and functional models (CM and FM). Properties of Gaussian functions are used for ponderability coefficients calculations. Structural and functional models are used for calculations of the parts and assembly units reliability. The using Gaussian functions together with CM and FM gives ponderabilities of the parts and assembly units that closer to real values. Thanks to this quality index of a whole product becomes closer to real values. This is due to the calculation of reliability of parts and assembly units at designing. The proposed technique increases the objectivity of products quality assessments, because it takes into account their designed reliability and the most of structural and technological parameters.

Keywords: *quality of technical products, ponderability coefficients, reliability, Gaussian law, differencial function, integral function.*

Введение

В машиностроении применяют методы контроля качества изделий, которые основаны на предположении нормальности распределения размеров и их отклонений от номинального размера. Предпочтительное использование функций нормального распределения объясняется тем, что нормальное распределение описано математически строгими методами оценки его статистик (распределения *Хи*-квадрат, Стьюдента, Фишера и др.). Поэтому в данной работе для получения показателей качества изделий, наиболее близких к реальным показателям, применяются методы расчета безотказности деталей и сборочных единиц, связанных со свойствами нормального распределения.

© В.В. Мартишкин, С.А. Зайцев, Ю.А. Сепесева, 2017

При адекватно расчитанных показателях безотказности, что гарантируется свойствами нормального рапределения, получают близкий к реальности уровень качества разработанного изделия, от которого в свою очередь зависит формирование необходимых мероприятий по его совершенствованию.

Использование свойств нормального распределения для расчетов качества технических изделий

Известно, что в машиностроении в 95 % случаев распределение результатов измерений, погрешностей измерений, количества годных изделий описывается нормальным распределением, т.е. распределением Гаусса. На основе ниже приведенных данных построены интегральная функция F_x:

$$F_x = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-3\sigma}^{+3\sigma} e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}}$$

и дифференциальная функция P_x нормального распределения:

$$P_x = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\, e^{-\frac{(x-a)^3}{3\sigma^3}},$$

а также связь этих функций с количеством сигм (σ) в допуске на параметр (σ – среднее квадратическое отклонение от действительного значения параметра).

Функция нормального распределения, построенная из условия ее нормирования

x	-3 s	-2 s	-1σ	0	+1σ	+2s	+3s
F_x	0,013	0,023	0,159	0,5	0,841	0,977	0,998
P_x	0, 0	0, 16	0, 33	0, 49	0, 33	0, 16	0,0

В машиностроении ожидаемое количество годных изделий в ограниченной партии находят по дифференциальной функции. Так, если в допуске на параметр содержится 6σ, то вероятность наличия годных изделий (изделий с допустимыми показателями надежности) среди проверенных составляет P_t = 0,997, при 5σ – 0,975, при 4σ – 0,960 [5]. При количестве сигм меньше 4-х вероятность существования годных изделий резко снижается (P_t = 0,95…0,67), поэтому данная область для определения количества годных изделий не рассматривается.

Детали, из которых состоят все технические изделия, не равнозначны по назначению и функциональности. Поэтому все детали, кроме классификации, указанной в работе [3], можно разделить на три группы, различающиеся своим назначением и функциональностью:

1-я группа – детали тяжелонагруженные;

2-я группа – детали основные;

3-я группа – детали вспомогательные.

К этой классификации относятся только оригинальные детали и изделия. К деталям 1-й группы относятся детали, рабочая функция которых состоит в создании и передаче работы и мощности. В процессе работы детали этой группы подвергаются интенсивному износу. К деталям данной группы относятся поршни двигателей и компрессоров, подшипники скольжения, детали зубчатых, червячных и фрикционных передач, детали механизмов движения и подобные детали.

К деталям 2-й группы относятся детали, которые служат опорами для движущихся нагруженных деталей 1-й группы и обеспечивают правильное их расположение и взаимодействие. Эти детали называются основными или опорными. Примерами деталей данной группы могут быть шатуны, коленчатые валы, оси, крейцкопфы и подобные детали.

К деталям 3-й группы относятся детали вспомогательного назначения, служащие для обеспечения нормальной работы деталей первых двух групп. Примерами деталей этой группы могут быть блоки цилиндров, станины, рамы, кронштейны, стойки и другие детали подобных типов.

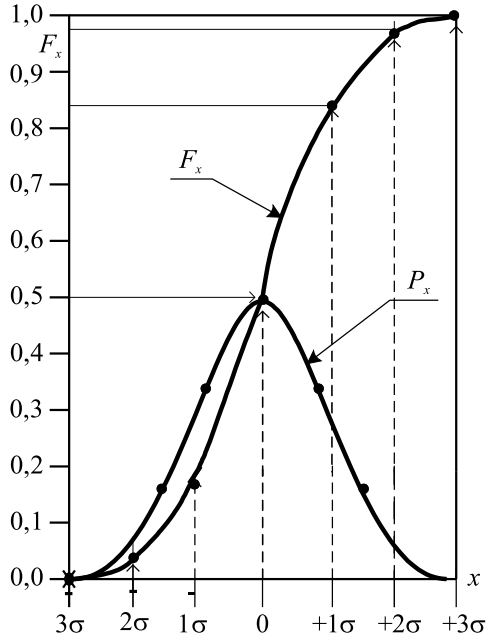


Рис. 1. Функции нормального распределения, построенные из условия их нормированности относительно среднего квадратического отклонения

Описанные группы деталей различаются между собой не только назначением и функциональностью, но и соответствующими показателями надежности. Самые ответственные детали (1-я группа) должны обладать наибольшей надежностью, детали групп 2 и 3 относительно статичны и меньше подвержены износу, поэтому вероятность выхода их из строя также может быть ниже. Надежность – комплексный показатель, но в данной методике используется один из единичных показателей надежности – безотказность ($P_{tб}$).

В машиностроении надежность деталей определяют в зависимости от времени эксплуатации по экспотенциальным функциям. Одним из видов этих функций является интегральная функция нормального распределения. Надежность деталей в машиностроении описывается моделью $P_t \geq 0{,}95$, поэтому надежность описанных групп деталей должна находиться в интервале 0,950…0,997. Количество годных деталей (дифференциальная функция) и надежность деталей (интегральная функция) тесно связаны графиком нормального распределения в координатах $P_{t(0\ldots1{,}0)} \times 6\sigma_{(0\ldots6\sigma)}$ (см. рис. 1), поэтому надежность для выделенных нами групп деталей должна быть не ниже следующих значений:

1-я группа – детали тяжело нагруженные и изнашивающиеся, $P_{tб1} = 0{,}997$;

2-я группа – детали основные, $P_{tб2} = 0{,}975$;

3-я группа – детали вспомогательные, $P_{tб3} = 0{,}960$.

Качество технических изделий определяют по формуле [2]

$$Q_{изд.} = P_{tб}\left(\Sigma\beta_{сб.i} \cdot Q_{сб.i}\right), \qquad (1)$$

где $P_{tб}$ – проектная (необходимая) безотказность изделия; $\beta_{сб.i}$ – весомости сборочных единиц; $Q_{сб.i}$ – качества сборочных единиц.

Из формулы (1) следует, что значение безотказности $P_{tб}$ определяет значение показателя качества изделия. Однако, при расчетах качества технических изделий безотказность не является конечной целью, а является средством обеспечения проявления свойств, ради которых изделие создавалось, т.е. свойств функциональности и работоспособности. Таким образом, безотказность $P_{tб}$ представляет собой коэффициент сохранения качества изделия в течение установленного времени.

При отсутствии в конструкторской документации данных о безотказности деталей их среднюю наработку до отказа определяют по справочным данным. Если и таких данных нет, то при наличии информации о законах распределения параметров качества деталей изделия, безотказность различных по значимости деталей можно определять с помощью классификации деталей технических изделий, описанных выше.

Расчет качества технического изделия

Технические изделия содержат в своем составе детали, сборочные единицы, стандартные изделия и различные материалы. Определив качество отдельных деталей, можно определить качество сборочных единиц, а затем и качество всего изделия. Качество изделия является относительной величиной, так как качество определяется в сравнении с качеством базового изделия (уровень качества изделия). Для определения уровня качества изделия сначала строят структурную модель изделия. Она должна соответствовать спецификации и порядку сборки изделия при его изготовлении. На структурной модели обозначают уровни, на которых находятся детали и сборочные единицы. Расчет качества изделий начинают с деталей. Заканчивают расчет качества изделия путем сложения качеств сборочных единиц с учетом их весомостей по формулам средних взвешенных арифметических или средних взвешенных геометрических. Качество изделия, рассчитанное по формуле среднего взвешенного арифметического, описывается формулой (1).

Исходя из описанного принципа расчета качества технических изделий, расчет показателей качества изделия можно свести к следующему алгоритму:

1) изучение конструкции и спецификации технического изделия;

2) построение структурной модели изделия, отражающей устройство изделия и определяющей порядок сборки/разборки изделия;

3) построение функциональной модели технического изделия;

4) расчет безотказности деталей, сборочных единиц и изделия в соответствии с ФМ;

5) определение весомостей деталей и сборочных единиц;

6) нанесение на структурную модель изделия полученных значений весомостей деталей и сборочных единиц;

7) определение качества деталей, сборочных единиц и всего изделия по формуле (1).

В данной работе в качестве примера расчета качества технического изделия использована конструкция двигателя внутреннего сгорания.

1.2.1. Изучение конструкции и спецификации технического изделия

Конструкция изделия изучается по его принципиальной схеме, и в соответствии с конструкцией составляется спецификация изделия. На рисунке 2 представлена принципиальная (упрощенная) схема устройства двигателя внутреннего сгорания, которой соответствует спецификация двигателя, показанная в табл. 1.

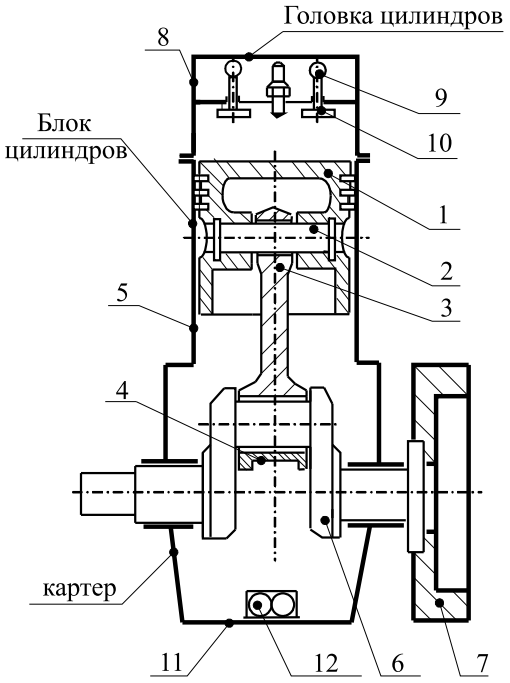


Рис. 2. Упрощенная схема устройства двигателя внутреннего сгорания

1.2.2. Построение структурной модели изделия

В соответствии со спецификацией строится структурная модель изделия, которая отражает порядок его сборки/разборки. На рисунке 3 представлена структурная модель двигателя внутреннего сгорания, соответствующая спецификации двигателя и определяющая порядок сборки/разборки. В соответствии с этой СМ сначала собирают сборочную единицу «блок цилиндров», затем собирают последовательно сборочные единицы «головку цилиндров» и «картер». На последнем этапе все эти сборочные единицы соединяют между собой и получают изделие «двигатель внутреннего сгорания».

1.2.3. Построение функциональной модели технического изделия

Функциональную модель составляют на основе конструктивной схемы изделия и критериев отказа деталей или сборочных единиц. На рисунке 4 показана ФМ двигателя внутреннего сгорания, совмещенная со схемой расчета надежности.

Расчет надежности на стадии проектирования выполняют с целью обеспечения соответствия предъявляемых требований к показателям надежности сборочных единиц и деталей в процессе работы изделия. Если действительные значения безотказности не соответствуют проектным показателям, то производится корректировка конструкции деталей и сборочных единиц с целью достижения проектной (требуемой) надежности изделия.

Таблица 1

Спецификация двигателя внутреннего сгорания

Сборочная единица	Детали	Состав автомобильного двигателя (сокращенный вариант)	Количество
1) Блок цилиндров	1	Поршень	4
	2	Поршневой палец	4
	3	Шатун	4
	4	Крышка шатуна	4
	5	Корпус цилиндров	1
	6	Коленчатый вал	1
	7	Маховик	1
2) Головка цилиндров	8	Крышка головки цилиндров	1
	9	Кулачковый вал	2
	10	Клапаны	8
3) Картер	11	Поддон	1
	12	Масляный насос	1

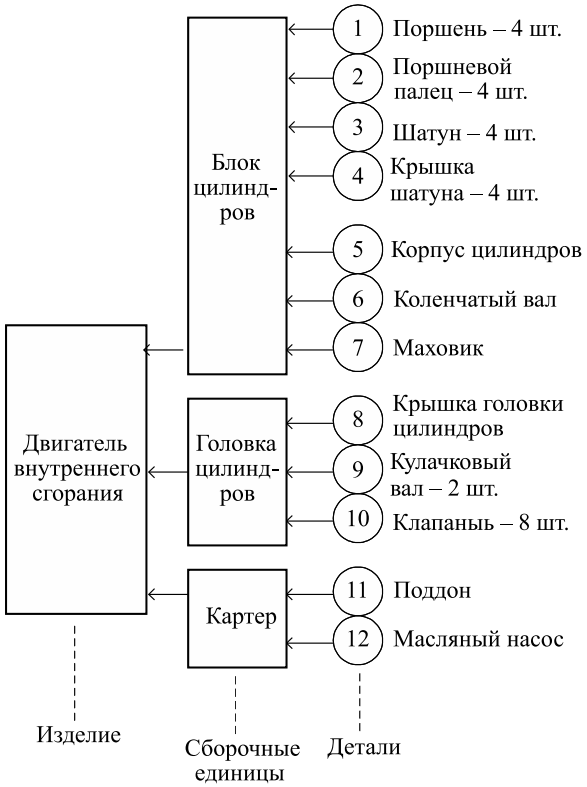


Рис. 3. Структурная модель двигателя

ФМ учитывает принцип, в соответствии с которым функциональность (работоспособность) изделия обеспечивается при исправности всех сборочных единиц, находящихся в последовательной схеме расчета надежности. Однако надежность сложных сборочных единиц (например, блок цилиндров и головка цилиндров) рассчитывают по смешанным схемам расчета надежности.

Для расчета безотказности изделия на стадии проектирования используют следующие исходные данные [6]:

– показатели надежности элементов аналога, эксплуатируемого в таких же условиях;

– технические требования на разрабатываемое изделие;

– показатели безотказности комплектующих изделий, включенных в техническую документацию (технические условия, стандарты).

Правила составления функциональных моделей, совмещенных со схемами расчетов надежности сборочных единиц и изделий:

– при расчетах показателей надежности сборочных единиц (не зависимо от схемы расчета – последовательная, параллельная или смешанная) детали в расчетной цепи расставляют в порядке уменьшения значимости для функционирования сборочной единицы;

– значение безотказности самой значимой детали в сборочной единице (первая деталь в расчетной цепи, составленной в направлении слева направо) должна быть наибольшей;

– при определении коэффициентов весомости деталей значения безотказности заменяют ранговыми оценками r_i = от 0,1 до 1. При этом ранговой оценкой является только изменяющаяся часть показателя безотказности.

Рассмотрим пример. Имеются четыре детали в сборочной единице, безотказность которой рассчитывают по последовательной схеме. Детали имеют показатели безотказности: $P_{т\text{б}1} = 0{,}997$, $P_{т\text{б}2} = 0{,}975$, $P_{т\text{б}3} = 0{,}975$, $P_4 = 0{,}960$. Эти значения безотказности заменяют ранговыми оценками, отражающими только изменяемую часть значений безотказности: $r_1 = 0{,}97$, $r_2 = 0{,}75$, $r_3 = 0{,}75$, $r_4 = 0{,}60$. Нормированные коэффициенты весомости рассчитывают по известной формуле [3]:

$$\beta_i = \frac{r_i}{\sum r_i}, \qquad (2)$$

где r_i – балльная оценка показателя. Условие нормированности коэффициентов весомостей – $\Sigma\beta_i = 1{,}0$.

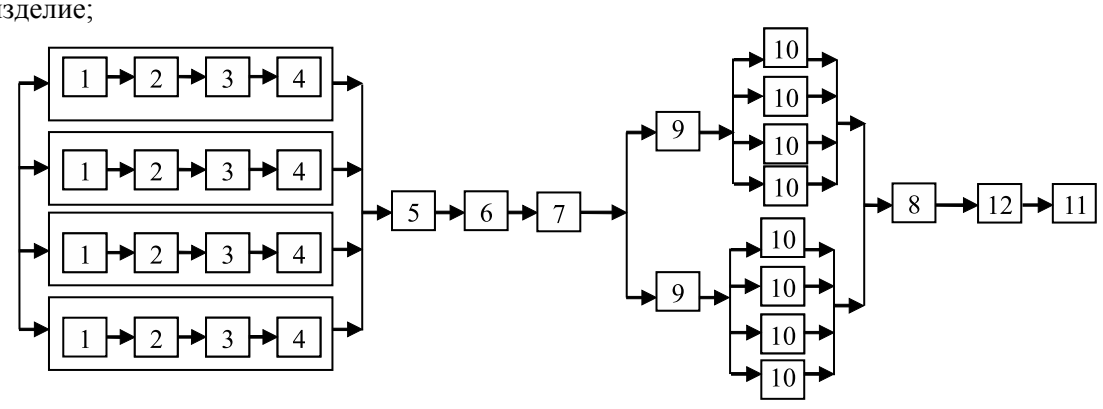


Рис. 4. Функциональная модель двигателя, совмещенная со схемой расчета надежности сборочных единиц двигателя:
а) блок цилиндров; б) головка блоков цилиндра; в) картер

Весомости деталей в сборочной единице с учетом их рангов будут следующие:

$$\beta_1 = \frac{0,97}{3,07} = 0,316,$$

$$\beta_2 = \frac{0,75}{3,07} = 0,24,$$

$$\beta_3 = \frac{0,75}{3,07} = 0,24,$$

$$\beta_4 = \frac{0,60}{3,07} = 0,20,$$

$$\Sigma\beta_i = 1,0.$$

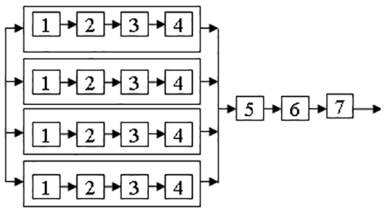
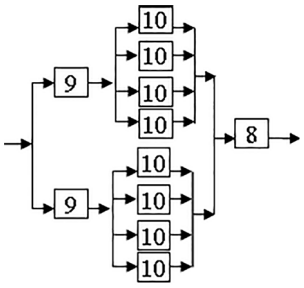
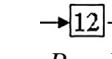
1.2.4. Расчет безотказности деталей, сборочных единиц и изделия

Безотказность деталей, сборочных единиц и изделия рассчитывается в соответствии с функциональной моделью. В таблице 2 показаны расчеты безотказности деталей, сборочных единиц и самого двигателя внутреннего сгорания.

Расчет безотказности деталей и сборочных единиц производится известными методами [6], но определение качества технических изделий (при определенной расчетной надежности) осуществляется на основе структурной модели

Таблица 2

Расчет безотказности сборочных единиц и изделия в соответствии с ФМ

Сборочная единица	**Детали**	**Детали сборочных единиц**	**Группа деталей**	**Безотказность деталей $P_{тбд.i}$**	**Схемы расчетов надежности с результатами расчетов**
Блок цилиндров	1	поршень	1	0,997	 Смешанная (параллельно/последовательная) $P_{тбб.ц.} = \left\{\left[1 - \prod_{i=1}^{m}\left(1 - \prod_{i=1}^{n} P_{1,2,3,4}\right)\right]\right\}^4 \times$ $\times\left(P_5 \cdot P_6 \cdot P_7\right) = 0,969,$ где $n = 4$ – количество элементов в последовательной схеме; $m = 4$ – количество параллельных цепей
	2	поршневой палец	2	0,975	
	3	шатун	2	0,975	
	4	крышка шатуна	3	0,960	
	5	корпус цилиндров	1	0,997	
	6	коленчатый вал	1	0,997	
	7	маховик	2	0,975	
Головка цилиндров	8	крышка головки цилиндров	2	0,975	 Смешанная (параллельно/последовательная) $P_{тбг.ц.} = \{P_9 \cdot [1 - (1 - P_{10})^4]\}^2 \cdot P_8 = 0,950$ Количество элементов в последовательной схеме – 1, количество параллельных цепей – 4
	9	кулачковый вал	2	0,975	
	10	клапаны	1	0,997	
Картер	11	поддон	3	0,960	 $P_{тбк.} = P_{11} \cdot P_{12} = 0,892$
	12	масляный насос	1	0,997	
Безотказность двигателя, $P_{тбдв}$			$P_{тбдв} = P_{тбб.ц.} \cdot P_{тбг.ц.} \cdot P_{тбк} = 0,821$		

изделия. Данная модель включает в себя сведения, необходимые для корректного определения качества технического изделия – надежности сборочных единиц, весомости сборочных единиц и надежность изделия (рис. 5).

1.2.5. Определение весомостей деталей и сборочных единиц

Как отмечалось ранее, для определения качества технического изделия необходимо рассчитать безотказность изделия, весомости сборочных единиц и качества сборочных единиц. В данной части статьи («Определение качества технических изделий. Часть 1») описана методика расчета безотказности технических изделий и весомостей сборочных единиц. Расчет качества сборочных единиц из-за большого объема материала будет описан во второй части данной статьи. Что касается определения весомостей деталей и сборочных единиц, то в основе методики лежит принцип представления показателей безотказности в виде балльных оценок (см. пример в 1.2.3).

Безотказность деталей на основе описанных представлений о связях надежности деталей с количеством сигм (σ) в допуске на параметр определены в подразделе 1.2.4.

В таблице 3 приведен расчет коэффициентов весомости деталей и сборочных единиц на основе их безотказности.

Таблица 3

Расчет коэффициентов весомости деталей и сборочных единиц на основе их безотказности

Сборочная единица	Детали	Детали сборочных единиц	Безотказность деталей, $P_{\text{бд}.i}$	Балльные оценки детали, r_i	Сумма балльных оценок деталей, Σr_i	Весомости деталей в соответствии с правилами составления ФМ	Безотказность сборочных единиц в соответствии с ФМ, $P_{\text{бсб}.i}$	Сумма безотказностей сборочных единиц, $\Sigma P_{\text{бсб}.i}$	Весомости сборочных единиц $\beta_{\text{сб}.i} = \frac{P_{\text{бсб}.i}}{\sum_{i=1}^{n} P_{\text{бсб}.i}}$
Блок цилиндров	1	поршень	0,997	0,97	5,76	0,168	0,969	2,811	0,346
	2	поршневой палец	0,975	0,75		0,130			
	3	шатун	0,975	0,75		0,130			
	4	крышка шатуна	0,960	0,60		0,104			
	5	корпус цилиндров	0,997	0,97		0,168			
	6	коленчатый вал	0,997	0,97		0,168			
	7	маховик	0,975	0,75		0,130			
Головка цилиндров	8	крышка головки цилиндров	0,975	0,75	2,47	0,304	0,950		0,337
	9	кулачковый вал	0,975	0,75		0,304			
	10	клапаны	0,997	0,97		0,392			
Картер	11	поддон	0,960	0,60	1,57	0,38	0,892		0,317
	12	масляный насос	0,997	0,97		0,62			

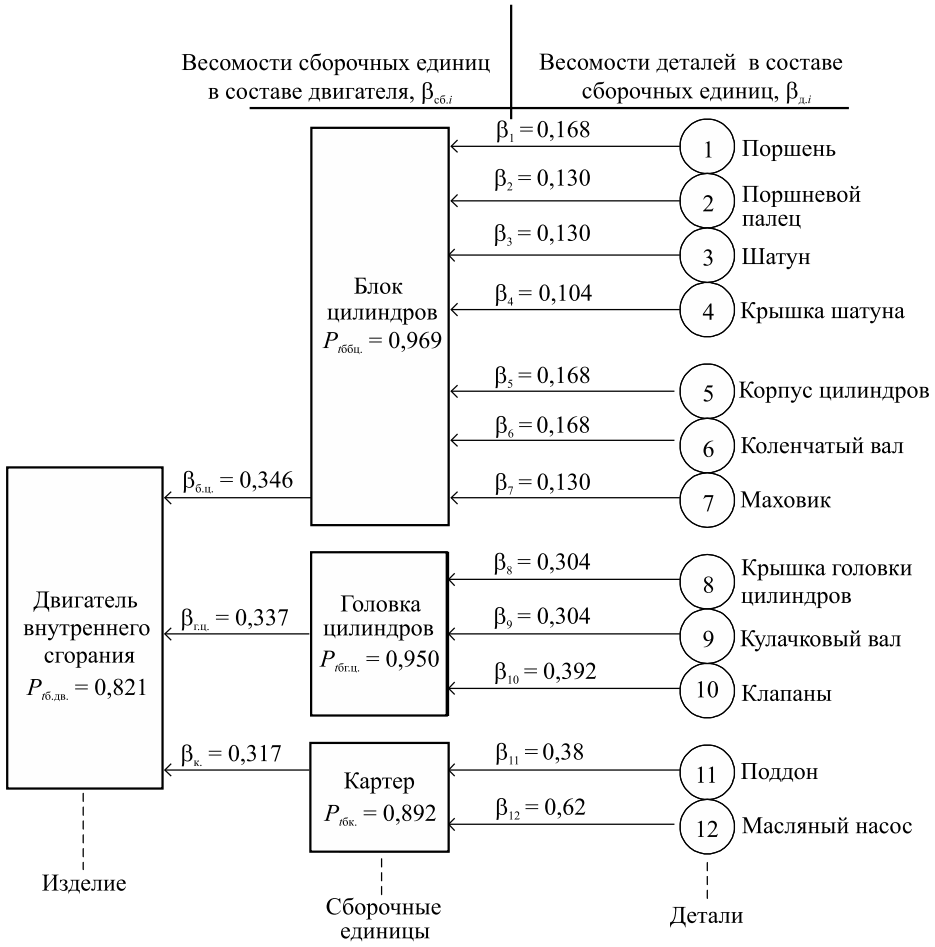


Рис. 5. Структурная модель двигателя, с указанием коэффициентов весомостей деталей и сборочных единиц

1.2.6. Нанесение на структурную модель изделия полученных значений весомостей деталей и сборочных единиц

На рисунке 5 показана СМ двигателя с результатами расчетов коэффициентов весомости деталей и сборочных единиц, определенные по описанной методике. Особенность методики заключается в соблюдении принципа нормированности коэффициентов весомости (β_i = 1...0) на всех уровнях СМ.

Заключение

Разработанная методика определения коэффициентов весомости (значимости) деталей и сборочных единиц позволяет получить значения показателей качества, более близких к реальному качеству технических изделий. Близкие к реальным значениям коэффициенты весомости получаются за счет использования показателей безотказности деталей и сборочных единиц, заложенных на стадии проектирования и подтвержденных на стадии контрольных испытаний.

От адекватно рассчитанных коэффициентов весомостей деталей и сборочных единиц при расчетах качества технических изделий зависит реальное значение показателя качества изделия.

При подтвержденных показателях безотказности определяют уровень качества разработанного изделия и соответствующие необходимые мероприятия по его совершенствованию.

Список литературы

1. *Гаусс К.Ф.* Избранные геодезические сочинения. М., 1957. С. 89–109.
2. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, 2nd ed., Geneva, International Organization for Standardization, 1995. – 101 p.
3. ОК 021-95. Общероссийский классификатор деталей машиностроения и приборостроения.
4. *Мартишкин В.В.* Управление качеством технических изделий на стадии разработки рабочей документации // Известия МГТУ МАМИ. 2013. № 2 (16). С. 348–354.

5. Управление качеством продукции машиностроения / *М.М. Кане и др.* М. «Машиностроение», 2010. – 415 с.

6. Надежность и эффективность в технике. Справочник в 10 томах. Т. 5. М., «Машиностроение», 1988. – 320 с.

Материал поступил в редакцию 05.12.2017

МАРТИШКИН
Владимир Васильевич

E-mail: **vmartishkin@mail.ru**
Тел.: **(495) 276-37-55**

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Стандартизация, метрология и сертификация» Московского политехнического университета. Сфера научных интересов: управление качеством автотракторной продукции на стадиях жизненного цикла. Автор 76 научных публикаций, в том числе пять изобретений и 71 научная статья.

ЗАЙЦЕВ
Сергей Алексеевич

E-mail: **saz@mami.ru**
Тел.: **(495) 276-37-55**

Кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Стандартизация, метрология и сертификация» Московского политехнического университета. Сфера научных интересов: методы и средства измерений и контроля геометрических параметров поверхности деталей машин, влияние финишных методов обработки поверхностей деталей на качество поверхностного слоя деталей машин. Автор более 80 учебно-методических изданий, 50 научных трудов, в т.ч. более 20 учебников с грифом Министерства образования и учебно-методических объединений для студентов вузов, среднеспециальных и начальных учебных заведений профессионального образования, опубликованных массовыми тиражами, 4 монографий.

СЕПЕСЕВА
Юлия Анатольевна

E-mail: **sepeseva15@mail.ru**
Тел.: **(495) 276-37-55**

Аспирант кафедры «Стандартизация, метрология и сертификация» Московского политехнического университета. Сфера научных интересов: управление качеством продукции. Автор пяти статей.