

## КРИТЕРИЙ КАЧЕСТВА ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ, ОСНОВАННЫЙ НА ЕЁ АДЕКВАТНОСТИ

© 2024 Д.Н. Журавлёв

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия

Статья поступила в редакцию 25.11.2024

В настоящей статье приведены критерии качества, применимые как для программного обеспечения, так и для оценки качества цифровых моделей. В роли специфической метрики качества цифровых моделей рассматривается понятие адекватности согласно определению ГОСТ Р 57700.37-2021. Приводится математическое выражение для количественного определения уровня адекватности цифровой модели. На примере изменений, вносимых в цифровую модель изнашивания осесимметричной пары трения, показан процесс повышения адекватности цифровой модели. Предложенный подход к количественному определению уровня адекватности цифровой модели позволяет сравнивать между собой различные вариации одной модели, и при учете затрат, необходимых на реализацию тех или иных изменений, может помочь определить оптимальный уровень адекватности, превышение которого будет требовать слишком большое количество ресурсов.

*Ключевые слова:* повышение качества, адекватность, цифровая модель, осесимметричная пара трения.

DOI: 10.37313/1990-5378-2024-26-6-20-26

EDN: FHCTSR

### ВВЕДЕНИЕ

Согласно ГОСТ Р 57700.37-2021, цифровой моделью является система математических и компьютерных моделей, а также электронных документов изделия, описывающих структуру, функциональность и поведение вновь разрабатываемого или эксплуатируемого изделия на различных стадиях жизненного цикла.

Компьютерной моделью называют модель, выполненную в компьютерной (вычислительной) среде и представляющую собой совокупность данных и программного кода, необходимого для работы с данными.

Математической моделью является такая модель, в которой сведения об объекте моделирования представлены в виде математических символов и выражений.

Таким образом, цифровые модели могут быть рассмотрены как особая категория программного обеспечения.

Стандарт ISO/IEC 25000 определяет модель качества как множество характеристик и взаимосвязей между ними, которые обеспечивают основу для задания требований к качеству и оценки качества, а оценку качества как систематическое исследование степени, с которой программная продукция способна удовлетворять установленным и подразумеваемым потребностям.

Наряду с общими критериями оценки качества программного обеспечения, для отдельных классов, очевидно, существуют специфические метрики качества. В данной работе приведен

обзор критериев качества, применимых для программного обеспечения в целом, выделена специфическая метрика качества, применимая для цифровых моделей, определена методика её подсчета и приведены примеры повышения качества цифровой модели на основе выделенной метрики.

### ФАКТОРЫ КАЧЕСТВА ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ

Предложенная МакКоллом [1] модель качества программного обеспечения являлась первой в своей области и предназначена для оценки качества программного продукта с помощью его характеристик. Она состоит из трех основных направлений определения качества:

- использование (факторы: корректность, надежность, эффективность, целостность, практичность);
- модификация (факторы: тестируемость, гибкость, сопровождаемость);
- переносимость (факторы: мобильность, возможность многократного использования, функциональная совместимость).

Для объективной оценки факторов вводятся критерии (метрики), причем один критерий может влиять на несколько факторов.

Иерархическая модель качества Бёма [2] схожа с моделью МакКолла, однако основана на более широком диапазоне характеристик, например, она учитывает характеристики оборудования, отсутствующие в модели МакКолла.

Наивысший уровень модели Бёма также состоит из трех направлений:

- полезность (факторы: надежность, эффективность, удобство использования);

*Журавлёв Дмитрий Николаевич, аспирант.  
E-mail: zhuravlev@compmechlab.ru*

- ремонтпригодность (факторы: тестируемость, понятность, модифицируемость);
- переносимость.

Модель качества Гецци [3] предполагает следующие факторы качества: целостность, надежность и устойчивость, производительность, практичность, верифицируемость, сопровождаемость, возможность многократного использования, мобильность, понятность, возможность взаимодействия, эффективность, своевременность реагирования, видимость процесса разработки.

Предложенная Дроми [4] модель качества является продукто-ориентированной, основная ее идея заключается в различии оценивания качества для разных продуктов. Тем не менее, могут быть выделены факторы, отвечающие за функциональность, надежность, ремонтпригодность, эффективность, возможность повторного использования, переносимость и удобство использования.

Межгосударственный стандарт «Оценка качества программных средств» [5] определяет следующую номенклатуру показателей качества программных средств: надежность, сопровождаемость, удобство применения, эффективность, универсальность, корректность.

Межгосударственный стандарт «Оценка программной продукции» [6] предлагает схожую модель оценки качества, содержащую следующие факторы качества: функциональность, надежность, практичность, эффективность, сопровождаемость, мобильность.

Наиболее современным межгосударственным стандартом «Модели качества систем и программных продуктов» [7] определяется модель качества продукта, сводящая качество к восьми характеристикам, которыми являются: функциональная пригодность, уровень производительности, совместимость, удобство пользования, надежность, защищенность, сопровождаемость и переносимость.

Многие из рассмотренных выше аспектов качества, присущих программным средствам, применимы и для компьютерных моделей [8]. Так, можно выделить следующие общие критерии качества: корректность, надежность, эффективность, удобство пользования, ремонтпригодность, тестируемость, модифицируемость, переносимость, возможность повторного использования, функциональная совместимость, целостность.

Основные факторы качества, обозначенные в рассмотренных моделях, и применимые к оцениванию качества цифровых моделей, сведены в таблицу 1.

Стоит отметить, что под корректностью понимается степень соответствия спецификациям и функциональная полнота. Между тем, ГОСТ Р 57700.37-2021 содержит ещё одно важное определение, применимое к оценке качества цифровой модели, а именно её адекватность – соответствие модели изделию (процессу, явлению) по обоснованному перечню характеристик.

Адекватность модели чаще всего напрямую связана с вычислительной эффективностью – объемом вычислительных ресурсов и кода, требуемых моделью для выполнения своей функции, причем чем выше адекватность, тем ниже вычислительная эффективность. Увеличение адекватности модели также требует затрат ресурсов, прежде всего временных и финансовых.

#### МЕРА АДЕКВАТНОСТИ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ

Основываясь на приведенном определении адекватности модели сформируем численный критерий для её вычисления. Пусть рассматривается цифровая модель, имеющая  $N$  характеристик, которым она должна соответствовать. Для каждой характеристики должна быть оценена степень соответствия  $\chi_i$ , которая в первом приближении может принимать дискретные

Таблица 1. Сравнение моделей качества цифровых моделей

	McCall	Boehm	Ghezzi	Dromey	ГОСТ 28195	ISO/IEC 9126	ISO/IEC 25010	Schölten
корректность	+				+		+	+
надежность	+	+	+	+	+	+	+	+
эффективность	+	+	+	+	+	+	+	+
целостность	+		+			+	+	+
удобство использования	+	+		+	+	+	+	+
тестируемость	+	+				+	+	+
модифицируемость	+	+	+	+	+	+	+	+
переносимость	+	+	+	+	+	+	+	+
возможность многократного использования	+		+	+			+	+
функциональная совместимость	+					+		+

значения 0 («не соответствует») и 1 («соответствует»), или же оценка может назначаться из диапазона  $\chi_i \in [0; 1]$  на основании экспертного мнения. Кроме того, каждая характеристика может иметь весовой коэффициент  $\alpha_i$ , показывающий степень важности её учета в цифровой модели. Численное значение величины адекватности модели при учете  $J$  характеристик из  $N$  в таком случае может быть получено как:

$$Q_{adq}^{(J)} = \frac{\sum_{i=1}^J \alpha_i \chi_i}{\sum_{i=1}^N \alpha_i}, \quad (1)$$

### ХАРАКТЕРИСТИКИ, ВЛИЯЮЩИЕ НА АДЕКВАТНОСТЬ

На примере процесса повышения качества цифровой модели изнашивания осесимметричной пары трения, приведенного в публикациях [9, 10], приведем количественную оценку изменения адекватности модели при производимых модификациях.

Осесимметричные пары трения «игла-подпятник» (см. рис. 1) применяются в качестве опор высокоскоростных роторных систем, основные потребительские характеристики которых зависят от массы и квадрата угловой скорости вращения ротора [11]. Условия функционирования, в свою очередь, будут определять необходимый набор процессов и явлений, которые необходимо учесть при построении цифровой модели.

Перечень характеристик, которым должна соответствовать цифровая модель изнашивания осесимметричной пары трения можно разделить на три группы: учет зависимостей свойств материалов, учет действующих нагрузок, учет особенностей геометрии.

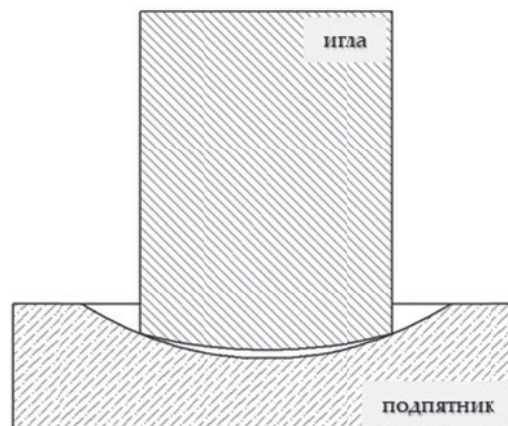


Рис. 1. Типичная геометрическая конфигурация пары трения «игла-подпятник»

Отсчитывать уровень адекватности будем от базовой модели изнашивания, в которой все параметры являются постоянными величинами:

$$\Delta w_j = \frac{K}{H} p_j^n (r \tilde{\omega}_j)^m \Delta t_j, \quad (2)$$

где  $\Delta w_j$  – приращение величины износа на  $j$ -й итерации;

$K$  – безразмерный коэффициент износа;

$H$  – поверхностная твердость;

$p$  – контактное давление;

$r$  – расстояние от оси вращения до точки на контактной поверхности;

$\tilde{\omega}_j$  – условная угловая скорость, соответствующая  $j$ -й итерации;

$\Delta t_j$  – инкремент  $j$ -й итерации;

$n, m$  – безразмерные коэффициенты.

Добавление в модель возможности учета изменения твердости по глубине материала позволяет учитывать процессы истирания защитных напылений и разнородность материала, вызванную термической обработкой (см. рис. 2).

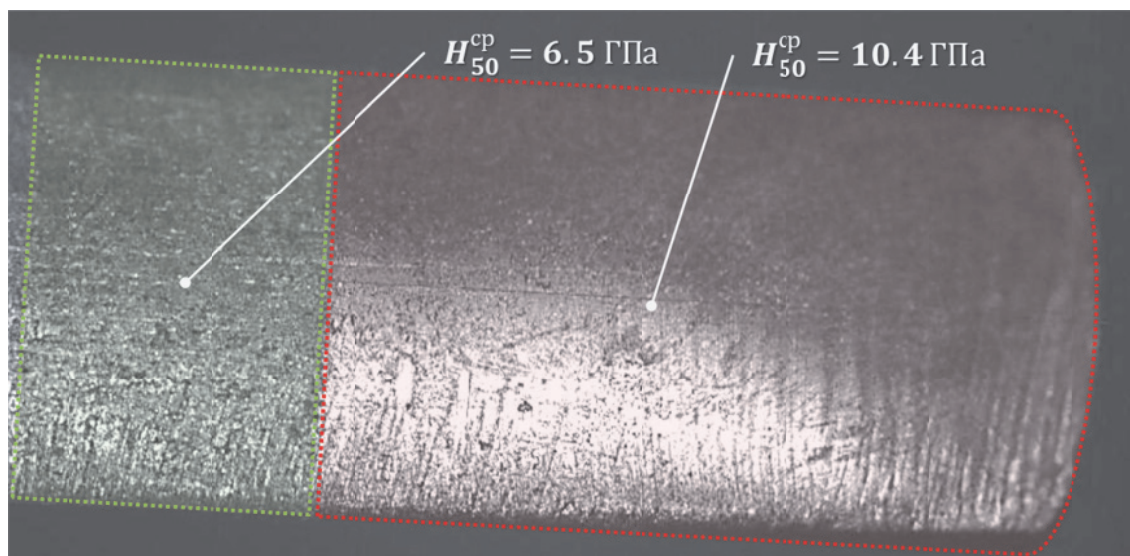


Рис. 2. Вид концевой части иглы на продольном шлифе (x50) [12]

Реализация решения задачи теплопроводности и учет изменения твердости вследствие фрикционного нагрева (см. рис. 3) контактирующих тел позволяет точнее прогнозировать расчетный ресурс изделий. Особенно актуально это для контактных пар, работающих в условиях сухого трения.

Добавление в модель возможности учета зависимости твердости от радиальной координаты позволяет моделировать неоднородности материала, получать нетипичные профили износа (см. рис. 4), которые, тем не менее, встречаются в условиях реальной эксплуатации.

Известно, что коэффициент трения в подобных трибологических системах зависит от скорости вращения [14]. Также выявлены зависимости между значением коэффициента трения и величиной коэффициента износа для различных материалов [15, 16]. Таким образом, учет зависимости коэффициента износа от скорости позволит точнее прогнозировать расчетный ресурс изделий, особенно при переменных значениях скоростей вращения.

Колебательные процессы, происходящие в роторных системах, могут являться причинами переменной квазипериодической нагрузки

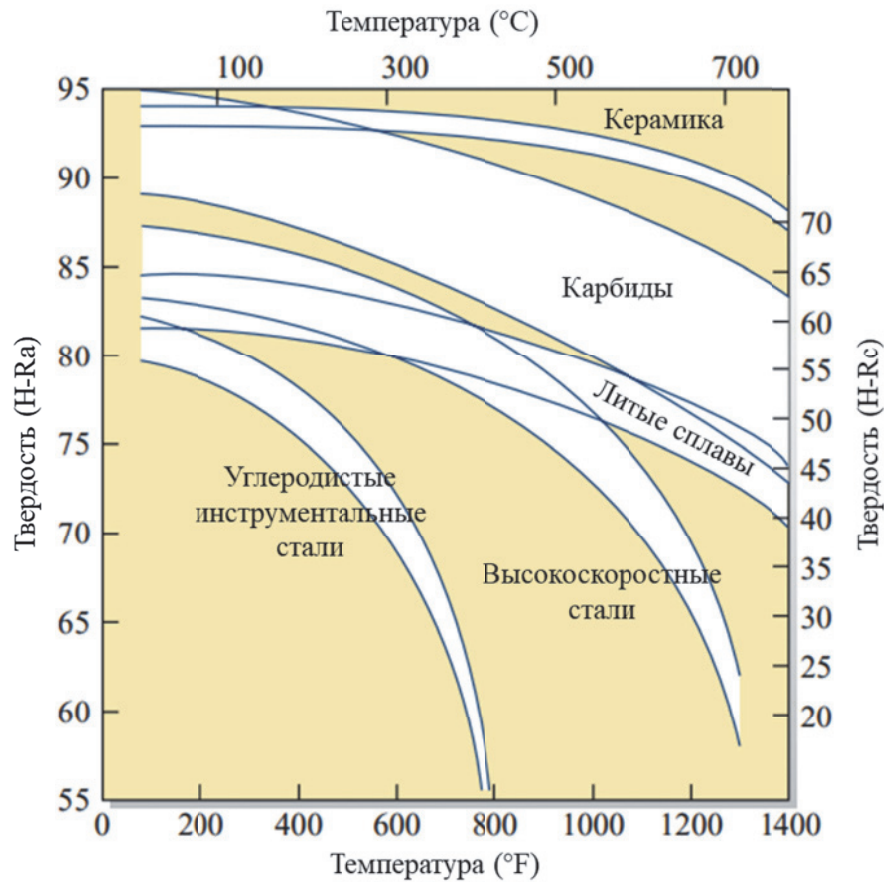


Рис. 3. Изменение твердости материалов при повышении температуры [13]



Рис. 4. Профиль износа:  
(а) – при постоянной твердости, (б) – при твердости, зависящей от радиальной координаты

[17...19], действующей на пару трения «игла-подпятник». Показано, что для произвольной геометрической конфигурации осесимметричной пары трения для расчета изнашивания достаточно знать среднее значение действующей нагрузки, что повышает такие показатели качества данной цифровой модели, как тестируемость и уровень удобства использования. Тем не менее, при низкопериодических воздействиях может наблюдаться заметное различие между получаемым решением и тем результатом, который был бы получен при полном учете изменения нагрузки во времени. Поэтому в данном случае величина степени соответствия должна быть снижена.

Возможность вычисления износа при нулевой радиальной координате очевидным образом расширяет границы применимости данной цифровой модели на случаи наличия контакта на оси вращения (см. рис. 5) – при длительном интенсивном изнашивании такой контакт рано или поздно установится даже при начальном его отсутствии и первоначальной кольцевой форме поверхности контакта. Сделанные предположения о сохранении линейной зависимости напряжений от деформаций в материале, однако, не позволяют поставить максимальный балл.

После внесения всех модификаций, определяющее соотношение (2) приобретает следующий вид:

$$\Delta w_j = \frac{K(\tilde{\omega}_j)}{H(w_{j-1}, r, \Theta)} p_j^n (\bar{v}(r, \tilde{\omega}_j))^m \Delta t_j, \quad (3)$$

где  $w_{j-1}$  – суммарный накопленный на предыдущих итерациях износ;

$\Theta$  – температура контактной поверхности;

$\bar{v}$  – эффективная сдвиговая скорость.

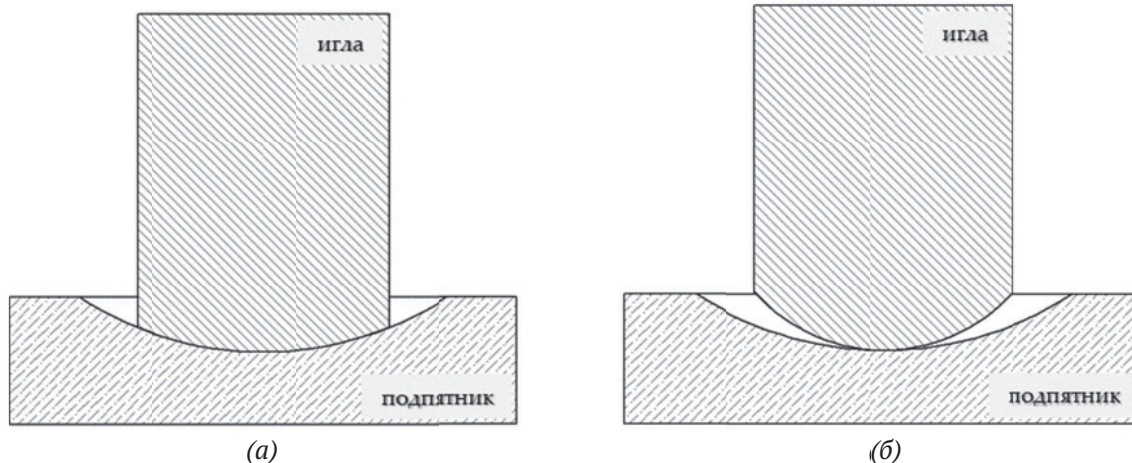
Для каждой из характеристик, учет которых был добавлен в цифровую модель изнашивания осесимметричной пары трения, определена степень соответствия и назначен весовой коэффициент (см. табл. 2).

На рисунке 6 графически продемонстрировано увеличение адекватности цифровой модели изнашивания осесимметричной пары трения вследствие вносимых в неё изменений.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье приведен обзор моделей качества, применимых к цифровым моделям изделий. Рассмотрены применяемые для оценки качества метрики, введен в рассмотрение критерий адекватности цифровой модели.

Предложено математическое выражение для численного вычисления уровня адекватности цифровой модели в соответствии с определением ГОСТ Р 57700.37-2021.



**Рис. 5.** Дополнительные геометрические конфигурации пары трения «игла-подпятник»: (а) – сплошной контакт, (б) – центральный контакт

**Таблица 2.** Степени соответствия и весовые коэффициенты рассмотренных характеристик

	Характеристика	Степень соответствия	Весовой коэффициент
0.1	Базовая модель	1.0	4.0
1.1	Учет изменения твердости по глубине материала	1.0	2.0
1.2	Учет зависимости твердости от температуры	1.0	3.0
1.3	Учет изменения твердости по радиусу	1.0	1.0
1.4	Учет зависимости коэффициента износа от скорости	1.0	1.0
2.1	Учет действия квазипериодической нагрузки	0.9	2.0
3.1	Учет изнашивания на оси вращения	0.8	3.0

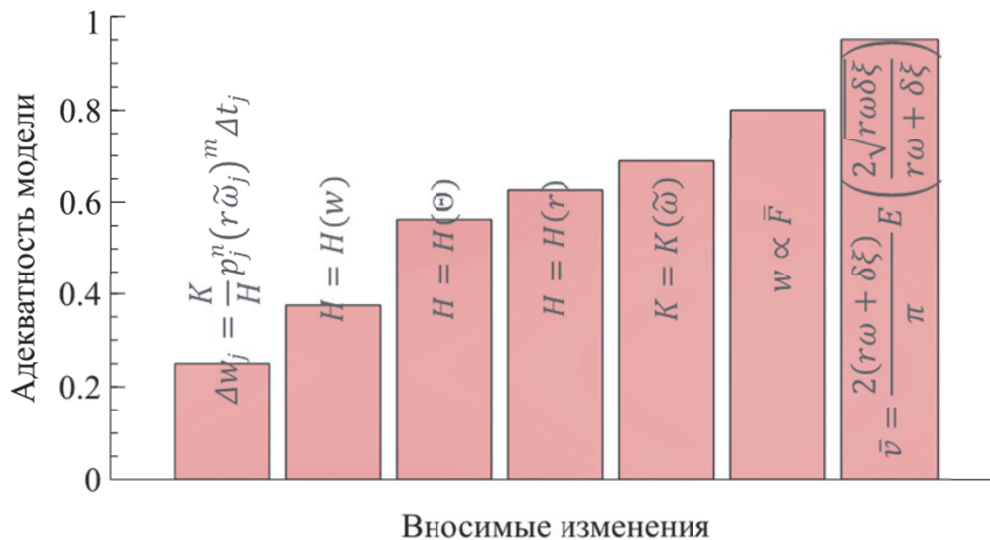


Рис. 6. Изменение уровня адекватности модели в зависимости от вносимых изменений

На примере цифровой модели изнашивания осесимметричной пары трения показан процесс повышения уровня адекватности модели путем внесения в неё возможности учёта новых процессов и явлений.

Таким образом, появляется возможность определять численные значения уровня адекватности цифровой модели, и по этому показателю количественно сравнивать между собой разные вариации моделей при внесении изменений.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. J.A. McCall, P.K. Richards, G.F. Walters. Factors in software quality. Rome Air Development Center, Rome, 1977
2. B.W. Boehm et al. Characteristics of software quality. North-Holland Publishing Company, 1978
3. C. Ghezzi, M. Jazayeri, D. Mandrioli. Fundamental of Software Engineering, Prentice-Hall, NJ, USA. 1991
4. R.G. Dromey, "A model for software product quality," IEEE Transactions on Software Engineering, vol. 21, no. 2, pp. 146–162, Jan. 1995, doi: 10.1109/32.345830.
5. ГОСТ 28195-89 Оценка качества программных средств. Общие положения.
6. ISO/IEC 9126 Оценка программной продукции. Характеристики качества и руководства по их применению.
7. ISO/IEC 25010 Системная и программная инженерия. Требования и оценка качества систем и программного обеспечения. Модели качества систем и программных продуктов.
8. H. Schölten and A. J. U. T. Cate, "Quality assessment of the simulation modeling process," Computers and Electronics in Agriculture, vol. 22, no. 2–3, pp. 199–208, Apr. 1999, doi: 10.1016/s0168-1699(99)00018-6
9. Журавлев, Д.Н. Повышение качества компьютерной модели изнашивания осесимметричной пары трения путем увеличения её адекватности / Д.Н. Журавлев, А.И. Боровков // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2024. – Т. 26, № 3(119). – С. 84-92. –

DOI 10.37313/1990-5378-2024-26-3-84-92. – EDN CJMYPN.

10. Журавлев, Д.Н. Моделирование изнашивания камневой опоры при действии переменной вертикальной нагрузки / Д.Н. Журавлев, А.И. Боровков // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2024. – № 1(363). – С. 9-16. – DOI 10.33979/2073-7408-2024-363-1-9-16. – EDN ENCBSR.
11. R.S. Kemp. Gas centrifuge theory and development: a review of U.S. programs. Science and Global Security, vol. 17, 2009, pp. 1-19
12. Кривина, Л.А. Повышение прочности и трибологических характеристик металлических деталей пар трения методами ионно-плазменного воздействия. Дисс. ... канд. техн. наук / Л.А. Кривина. Нижний Новгород, 2019
13. I. Hutchings, Ph. Shipway. Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials. 2nd Edition. Butterworth-Heinemann, 2017
14. X.-J. Dai, C.-L. Tang, S.-Q. Yu. Measuring friction coefficient of the high speed pivot bearing in oil-bath lubrication by a varying load method. Tribology, Volume 31, Issue 1, 2011, Pages 7-11
15. X. Xu, Z. Zhang, X. Wang, B. Huang, H. Qin, X. Zhao. Experimental Study on Friction Coefficients of Miter Gate Bottom Pivot with Different Solid Lubrication. Tribology, Volume 42, No 5, 2022, Pages 1044-1052
16. K. Friderich, A.K. Schlarb. Tribology of Polymeric Nanocomposites. 2nd edition (2013)
17. H. Wang, S. Jiang, Z. Shen. The Dynamic Analysis of an Energy Storage Flywheel System with Hybrid Bearing Support. Journal of Vibration and Acoustics, vol. 131, issue 5, 2009, 051006. https://doi.org/10.1115/1.3147128.
18. C. Tang, X. Dai, X. Zhang, L. Jiang. Rotor dynamics analysis and experiment study of the flywheel spin test system. Journal of Mechanical Science and Technology, 26 (9), 2012, pp.2669-2677. https://doi.org/10.1007/s12206-012-0717-8.
19. C. Tang, D. Han, J. Yang. Rubbing dynamics behavior of a flywheel shafting with a single point flexible support. Journal of vibroengineering, 19 (6), 2017, pp.4138-4154. https://doi.org/10.21595/jve.2017.18480.

## QUALITY CRITERION OF A DIGITAL MODEL BASED ON ITS ADEQUACY

© 2024 D.N. Zhuravlyov

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

This article presents quality criteria applicable both for software and for evaluating the quality of digital models. In the role of a specific metric of the quality of digital models, the concept of adequacy is considered according to the definition of GOST R 57700.37-2021. A mathematical expression is given to quantify the level of adequacy of the digital model. Using the example of changes made to the digital model of wear of an axisymmetric friction pair, the process of increasing the adequacy of the digital model is shown. The proposed approach to quantifying the level of adequacy of a digital model allows to compare different variations of one model with each other, and taking into account the costs required to implement certain changes, it can help determine the optimal level of adequacy, exceeding which will require too many resources.

**Keywords:** quality improvement, adequacy, digital model, axisymmetric friction pair.

DOI: 10.37313/1990-5378-2024-26-6-20-26

EDN: FHCTSR

### REFERENCES

1. J.A. McCall, P.K. Richards, G.F. Walters. Factors in software quality. Rome Air Development Center, Rome, 1977
2. B.W. Boehm et al. Characteristics of software quality. North-Holland Publishing Company, 1978
3. C. Ghezzi, M. Jazayeri, D. Mandrioli. Fundamental of Software Engineering, Prentice-Hall, NJ, USA, 1991
4. R.G. Dromey, "A model for software product quality", IEEE Transactions on Software Engineering, vol. 21, no. 2, pp. 146-162, Jan. 1995, doi: 10.1109/32.345830.
5. GOST 28195-89 Ocenka kachestva programmnyh sredstv. Obshchie polozheniya.
6. ISO/IEC 9126 Ocenka programmnoj produkcii. Karakteristiki kachestva i rukovodstva po ih primeneniyu.
7. ISO/IEC 25010 Sistemnaya i programmaya inzheneriya. Trebovaniya i ocenka kachestva sistem i programmogo obespecheniya. Modeli kachestva sistem i programmnyh produktov.
8. H. Schölten and A. J. U. T. Cate, "Quality assessment of the simulation modeling process", Computers and Electronics in Agriculture, vol. 22, no. 2-3, pp. 199-208, Apr. 1999, doi: 10.1016/s0168-1699(99)00018-6
9. Zhuravlev, D.N. Povyshenie kachestva komp'yuternoj modeli iznashivaniya osesimmetrichnoj pary treniya putem uvelicheniya eyo adekvatnosti / D.N. Zhuravlev, A.I. Borovkov // Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk. – 2024. – T. 26, № 3(119). – S. 84-92. – DOI 10.37313/1990-5378-2024-26-3-84-92. – EDN CJMYPN.
10. Zhuravlev, D.N. Modelirovanie iznashivaniya kamnevoj opory pri dejstvii peremennoj vertikal'noj nagruzki / D.N. Zhuravlev, A.I. Borovkov // Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2024. – № 1(363). – S. 9-16. – DOI 10.33979/2073-7408-2024-363-1-9-16. – EDN ENCBSR.
11. R.S. Kemp. Gas centrifuge theory and development: a review of U.S. programs. Science and Global Security, vol. 17, 2009, pp. 1-19
12. Krivina, L.A. Povyshenie prochnosti i tribologicheskikh karakteristik metallicheskih detalej par treniya metodami ionno-plazmennogo vozdejstviya. Diss. ... kand. tekhn. nauk / L.A. Krivina. Nizhnij Novgorod, 2019
13. I. Hutchings, Ph. Shipway. Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials. 2nd Edition. Butterworth-Heinemann, 2017
14. X.-J. Dai, C.-L. Tang, S.-Q. Yu. Measuring friction coefficient of the high speed pivot bearing in oil-bath lubrication by a varying load method. Tribology, Volume 31, Issue 1, 2011, Pages 7-11
15. X. Xu, Z. Zhang, X. Wang, B. Huang, H. Qin, X. Zhao. Experimental Study on Friction Coefficients of Miter Gate Bottom Pivot with Different Solid Lubrication. Tribology, Volume 42, No 5, 2022, Pages 1044-1052
16. K. Friderich, A.K. Schlarb. Tribology of Polymeric Nanocomposites. 2nd edition (2013)
17. H. Wang, S. Jiang, Z. Shen. The Dynamic Analysis of an Energy Storage Flywheel System with Hybrid Bearing Support. Journal of Vibration and Acoustics, vol. 131, issue 5, 2009, 051006. <https://doi.org/10.1115/1.3147128>.
18. C. Tang, X. Dai, X. Zhang, L. Jiang. Rotor dynamics analysis and experiment study of the flywheel spin test system. Journal of Mechanical Science and Technology, 26 (9), 2012, pp.2669-2677. <https://doi.org/10.1007/s12206-012-0717-8>.
19. C. Tang, D. Han, J. Yang. Rubbing dynamics behavior of a flywheel shafting with a single point flexible support. Journal of vibroengineering, 19 (6), 2017, pp.4138-4154. <https://doi.org/10.21595/jve.2017.18480>.