

МОНИТОРИНГ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ КАЧЕСТВА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ У ХРАНИЛИЩ ДАННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ И ОРГАНИЗАЦИЙ

Кушников О.В., Гусятников В.Н., Ланкин И.С.

ФГБУНФИЦ «Саратовский научный центр РАН», Саратов, Россия

kushnikoff@yandex.ru, ivan.lankin@yandex.ru

Белова А.С.

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия

belova@ipu.ru

Аннотация. В статье разработана модель для мониторинга и прогнозирования характеристик хранилищ данных. Приведена постановка задачи, сформирована система нелинейных дифференциальных уравнений, позволяющая осуществлять анализ динамики характеристик качества хранилища данных. Результаты данного исследования могут использоваться при мониторинге и прогнозировании эффективности функционирования хранилищ данных крупномасштабных систем.

Ключевые слова: крупномасштабные системы, хранилища данных, качество, программное обеспечение, математическая модель, системная динамика, причинно-следственные связи.

Введение

Цифровая трансформация процессов функционирования крупномасштабных систем приводит к значительному росту информации, хранимой и используемой их органами управления различных уровней иерархии. Важную роль в процессе хранения и упорядочивания больших объемов информации, характеризующих процесс функционирования и развития крупномасштабных систем, играют хранилища данных, типовая схема которого приведена на рисунке 1 [1, 2].

Modern Data Warehouse

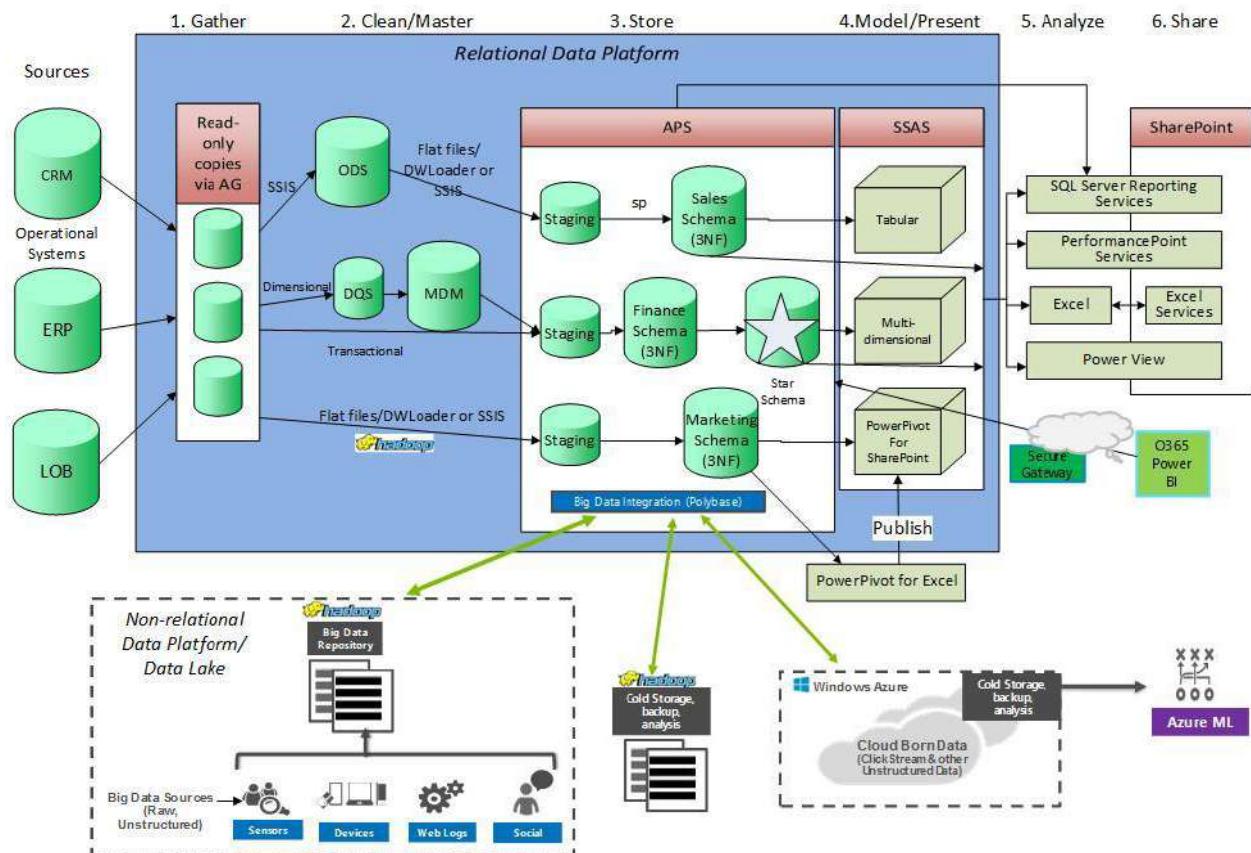


Рис. 1. Структурная схема современного типового хранилища данных

Сложной задачей, возникающей в процессе разработки и эксплуатации хранилища данных крупномасштабной системы, является сохранения требуемого уровня качества используемого программного обеспечения. Для решения этой задачи часто используются математические модели, позволяющие определить характеристики хранилищ данных, влияющие на качество используемого программного обеспечения, как функцию времени и возмущений внешней среды.

1. Постановка задачи

Установить релевантные характеристики программного обеспечения хранилища данных, влияющие на качество его функционирования. Разработать математическую модель, позволяющую определить величину этих характеристик как функцию времени и возмущений окружающей среды.

2. Математическая модель

Для решения поставленной задачи предварительно необходимо выбрать базовую модель качества программного продукта, например, модель Боэма [3], МакКола [4], FURPS/FURPS+, Гецци [5], Дроми [6] или модель качества ISO 9126 [7]. По выбранной модели определяются характеристики программного продукта, влияющие на качество функционирования хранилища данных. В статье для этой цели используется модель МакКола, получившая распространение при мониторинге и управлении качеством программного обеспечения (ПО) хранилищ данных.

В статье для решения задачи используются модели МакКола и системной динамики, позволяющие при различных значениях вектора окружающей среды построить зависимости изменения во времени релевантных характеристик хранилища данных, влияющих на качество его функционирования.

С помощью системно-динамического подхода может быть описаны процессы и объекты управления, для которых характерно наличие большого количества обратных связей между переменными модели [8, 9]. Данное обстоятельство обуславливает целесообразность использования аппарата системной динамики при моделировании характеристик хранилищ данных, влияющих на качество его программного обеспечения.

В соответствии с моделью [4] выбраны следующие характеристики качества программного обеспечения хранилища данных: $Ch_0^{MC}(t)$ – качество программного обеспечения; $Ch_1^{MC}(t)$ – корректность; $Ch_2^{MC}(t)$ – надежность; $Ch_3^{MC}(t)$ – возможность интенсивного использования; $Ch_4^{MC}(t)$ – прослеживаемость; $Ch_5^{MC}(t)$ – функциональная полнота; $Ch_6^{MC}(t)$ – последовательность проектирования; $Ch_7^{MC}(t)$ – практичность; $Ch_8^{MC}(t)$ – устойчивость к ошибкам; $Ch_9^{MC}(t)$ – эффективность выполнения. Причинно-следственные связи между этими характеристиками хранилища данных изображены рисунке 2 в виде ориентированного графа.

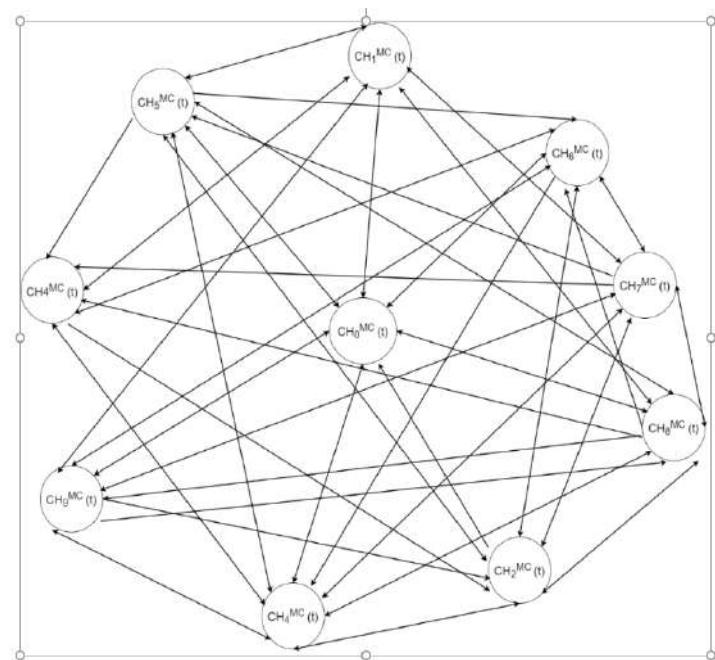


Рис. 2. Причинно-следственные связи между характеристиками качества программного обеспечения хранилища данных

Анализ опыта разработки и эксплуатации хранилищ данных показал, что на характеристики качества $Ch_i^{MC}(t)$ значительно влияют следующие возмущения $\zeta_i(t) \in [0,1], i = \overline{1,5}$:

- ζ_1 – опыт коллектива разработчиков интеллектуальной информационной системы;
- ζ_2 – наличие известных аналогов разрабатываемой системы;
- ζ_3 – сжатые сроки разработки информационной системы;
- ζ_4 – отсутствие квалифицированных пользователей разрабатываемой системы;
- ζ_5 – слаженность коллектива разработчиков системы.

В статье указанные возмущения заданы гармоническими и линейными функциями времени. Система дифференциальных уравнений, описывающая изменение во времени характеристик качества программного обеспечения хранилища данных, имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{dCh_0^{MC}(t)}{dt} = & \frac{1}{maxCh_0^{MC}} \left(f_1 \left(Ch_1^{MC}(t) \right) * f_2 \left(Ch_2^{MC}(t) \right) * f_3 \left(Ch_3^{MC}(t) \right) * f_4 \left(Ch_5^{MC}(t) \right) * \right. \\ & * f_5 \left(Ch_6^{MC}(t) \right) * f_6 \left(Ch_8^{MC}(t) \right) * f_7 \left(Ch_9^{MC}(t) \right) * \\ & \left. * (\zeta_1(t) + \zeta_2(t) + \zeta_5(t)) - \zeta_3(t) \right) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{dCh_1^{MC}(t)}{dt} = & \frac{1}{maxCh_1^{MC}} \left(f_8 \left(Ch_0^{MC}(t) \right) * f_9 \left(Ch_5^{MC}(t) \right) * f_{10} \left(Ch_7^{MC}(t) \right) * (\zeta_1(t) + \zeta_2(t) + \zeta_5(t)) - \right. \\ & \left. - f_{11} \left(Ch_4^{MC}(t) \right) * f_{12} \left(Ch_8^{MC}(t) \right) * f_{13} \left(Ch_9^{MC}(t) \right) * \zeta_3(t) \right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{dCh_2^{MC}(t)}{dt} = & \frac{1}{maxCh_2^{MC}} \left(f_{14} \left(Ch_4^{MC}(t) \right) * f_{15} \left(Ch_7^{MC}(t) \right) * (\zeta_1(t) + \zeta_2(t) + \zeta_5(t)) - \right. \\ & \left. - f_{16} \left(Ch_3^{MC}(t) \right) * f_{17} \left(Ch_5^{MC}(t) \right) * f_{18} \left(Ch_6^{MC}(t) \right) * \right. \\ & \left. * f_{19} \left(Ch_8^{MC}(t) \right) * f_{20} \left(Ch_9^{MC}(t) \right) * (\zeta_3(t) + \zeta_4(t)) \right) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{dCh_3^{MC}(t)}{dt} = & \frac{1}{maxCh_3^{MC}} \left(f_{21} \left(Ch_2^{MC}(t) \right) * f_{22} \left(Ch_5^{MC}(t) \right) * f_{23} \left(Ch_8^{MC}(t) \right) * f_{24} \left(Ch_9^{MC}(t) \right) * \right. \\ & * (\zeta_1(t) + \zeta_2(t) + \zeta_5(t)) - f_{25} \left(Ch_0^{MC}(t) \right) * f_{26} \left(Ch_4^{MC}(t) \right) * \\ & \left. * f_{27} \left(Ch_6^{MC}(t) \right) * f_{28} \left(Ch_7^{MC}(t) \right) \right) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{dCh_4^{MC}(t)}{dt} = & \frac{1}{maxCh_4^{MC}} \left(f_{29} \left(Ch_1^{MC}(t) \right) * f_{30} \left(Ch_6^{MC}(t) \right) * f_{31} \left(Ch_7^{MC}(t) \right) * (\zeta_1(t) + \zeta_5(t)) - \right. \\ & \left. - f_{32} \left(Ch_3^{MC}(t) \right) * f_{33} \left(Ch_5^{MC}(t) \right) * f_{34} \left(Ch_8^{MC}(t) \right) * \zeta_4(t) \right) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{dCh_5^{MC}(t)}{dt} = & \frac{1}{maxCh_5^{MC}} \left(f_{35} \left(Ch_0^{MC}(t) \right) * f_{36} \left(Ch_3^{MC}(t) \right) * f_{37} \left(Ch_7^{MC}(t) \right) * (\zeta_1(t) + \zeta_2(t) + \zeta_5(t)) - \right. \\ & \left. - f_{38} \left(Ch_1^{MC}(t) \right) * f_{39} \left(Ch_2^{MC}(t) \right) * f_{40} \left(Ch_8^{MC}(t) \right) * \zeta_3(t) \right) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{dCh_6^{MC}(t)}{dt} = & \frac{1}{maxCh_6^{MC}} \left(f_{41} \left(Ch_0^{MC}(t) \right) * f_{42} \left(Ch_2^{MC}(t) \right) * f_{43} \left(Ch_4^{MC}(t) \right) * \right. \\ & * f_{44} \left(Ch_9^{MC}(t) \right) * (\zeta_1(t) + \zeta_5(t)) - f_{45} \left(Ch_5^{MC}(t) \right) * \\ & \left. * f_{46} \left(Ch_7^{MC}(t) \right) * f_{47} \left(Ch_8^{MC}(t) \right) * \zeta_3(t) \right) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{dCh_7^{MC}(t)}{dt} = & \frac{1}{maxCh_7^{MC}} \left(f_{48} \left(Ch_1^{MC}(t) \right) * f_{49} \left(Ch_2^{MC}(t) \right) * f_{50} \left(Ch_8^{MC}(t) \right) * (\zeta_1(t) + \zeta_2(t) + \zeta_5(t)) - \right. \\ & \left. - f_{51} \left(Ch_3^{MC}(t) \right) * f_{52} \left(Ch_6^{MC}(t) \right) * f_{53} \left(Ch_9^{MC}(t) \right) \right) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \frac{dCh_8^{MC}(t)}{dt} = & \frac{1}{maxCh_8^{MC}} \left(f_{54} \left(Ch_0^{MC}(t) \right) * f_{55} \left(Ch_1^{MC}(t) \right) * f_{56} \left(Ch_2^{MC}(t) \right) * f_{57} \left(Ch_7^{MC}(t) \right) * \right. \\ & * \left(\zeta_1(t) + \zeta_2(t) + \zeta_5(t) \right) - f_{58} \left(Ch_3^{MC}(t) \right) * \\ & * f_{59} \left(Ch_5^{MC}(t) \right) * f_{60} \left(Ch_9^{MC}(t) \right) * \zeta_3(t) \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \frac{dCh_9^{MC}(t)}{dt} = & \frac{1}{maxCh_9^{MC}} \left(f_{61} \left(Ch_0^{MC}(t) \right) * f_{61} \left(Ch_3^{MC}(t) \right) * f_{62} \left(Ch_6^{MC}(t) \right) * \left(\zeta_1(t) + \zeta_2(t) + \zeta_5(t) \right) - \right. \\ & - f_{63} \left(Ch_1^{MC}(t) \right) * f_{64} \left(Ch_7^{MC}(t) \right) * f_{65} \left(Ch_8^{MC}(t) \right) * \zeta_3(t) \end{aligned} \quad (10)$$

$(f_i, i = \overline{1,65})$ – внутренние функции модели, характеризующие силу причинно-следственных связей между соответствующими ее переменными; $\frac{1}{maxCh_i^{MC}}$ – нормировочные коэффициенты).

3. Метод решения задачи

При построении формальной модели используются системно-динамический подход, позволяющий перейти от формальной модели динамической системы

$$\frac{dI_j}{dt} = F_j(I_1, \dots, I_n), j = \overline{1, n} \quad (11)$$

к модели:

$$\frac{dI_j}{dt} = \alpha_{j,0} k + \sum_{k=1}^n \alpha_{j,k} \prod_l^n \omega_{j,k,l}(I_l) I_k, j = \overline{1, n} \quad (12)$$

Условия выполнения данного перехода для различных объектов управления подробно рассмотрены в специальной литературе [10-15]

С использованием метода системной динамики задача решается следующим образом.

Затем для каждого плана мероприятий решается система уравнений

$$\begin{aligned} \frac{dX_i}{dt} = & f_i(t, X_1(t), \dots, X_n(t), p(t)), i = \overline{1, n} \\ t_0 = 1, X_i(t_0) = & X_{i0}, i = \overline{1, n} \\ t > 0, X_i > & 0, i = \overline{1, n} \end{aligned} \quad (13)$$

При этом правая часть уравнений системы должна удовлетворять условию

$$\frac{dX_i(t, p(t))}{dt} = X_i(t, p(t))^+ - X_i(t, p(t))^-, i = \overline{1, n} \quad (14)$$

$(X_i(t, p(t))^+$ – положительный темп скорости переменной $X_i(t, p(t))$, учитывающий влияние на данную переменную тех причинно-следственных связей, которые вызывают ее рост; $X_i(t, p(t))^-$ – отрицательный темп скорости переменной $X_i(t, p(t))$, учитывающий причинно-следственные связи, вызывающие убывание данной переменной).

В отношении $X_i(t, p(t))$ выполняется:

$$\begin{aligned} X_i(t, p(t))^{+/-} = & X_i^{+/-}(y(t)_1, y(t)_2, \dots, y(t)_{n1}) = f(\varphi_1(t), \varphi_2(t), \dots, \varphi_k(t)) = \\ = & f_1(\varphi_1(t))f_2(\varphi_2(t)) \dots f_k(\varphi_k(t)) \end{aligned} \quad (15)$$

$\varphi_{j=\varphi_j}(y(t)|1, y(t)_2, \dots, y(t)_S)$ – факторы, $S = S(j) < n_1$ – число уровней, влияющих на $\varphi_{j=\varphi_j}(y(t)|1, y(t)_2, \dots, y(t)_S)$.

Для каждого плана мероприятий система уравнений (13) решается численным методом Рунге-Кутты четвертого порядка точности с использованием библиотеки Python, результатом являются зависимости $X_i(t, p(t)), i = \overline{1, n}$, изменяющиеся на интервале машинного времени $[t_0, t_1]$.

При решении системы нелинейных дифференциальных уравнений в статье была использована статистическая информация, полученная в процессе эксплуатации хранилища данных на предприятии ОАО «Трансмаш».

Результаты решения в виде диаграммы изменения средних значений характеристик качества программного обеспечения хранилища данных машиностроительного предприятия на интервале 1 год представлены на рисунке 3.

4. Обсуждение результатов

Разработанная математическая модель была использована при анализе динамики характеристик хранилища данных машиностроительного предприятия ОАО «Трансмаш» (г. Энгельс) на временном интервале 1 год. Результаты анализа приведены в виде диаграммы на рисунке 3.

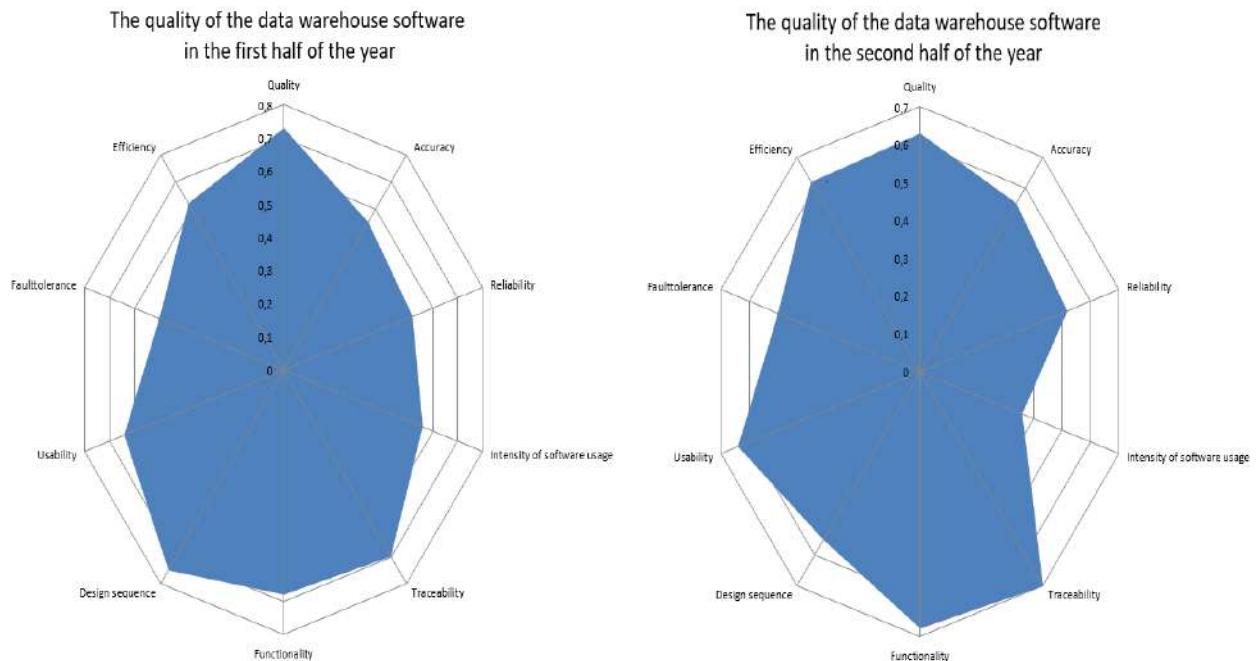


Рис. 3. Диаграмма изменения средних значений характеристик качества программного обеспечения хранилища данных машиностроительного предприятия на интервале 1 год

Из диаграммы следует, что на выбранном временном интервале средние значения характеристик качества изменяются, что свидетельствует о необходимости мониторинга и прогнозирования их значений.

5. Заключение

Разработана математическая модель, позволяющая определить значения характеристик качества программного обеспечения хранилищ данных на различных временных интервалах. Установлено, что характеристики качества целесообразно выбрать в соответствии с базовой моделью качества программного продукта МакКола. При описании изменений характеристик на различных временных интервалах предложено использовать аппарат системной динамики. Построена система нелинейных дифференциальных уравнений, позволяющая определить значения характеристик качества при заданных возмущениях среды. Анализ характеристик программного обеспечения хранилища данных машиностроительного предприятия ОАО «Трансмаш» (г. Энгельс) на интервале 1 год показал высокое качество использованного программного обеспечения. Разработанные модели и методы могут быть применены при проектировании и модернизации хранилищ данных промышленных предприятий и организаций, а также для мониторинга и прогнозирования качества их программного обеспечения

Литература

1. *Inmon W.H. Building the data warehouse.* – New York: Wiley, 1993. – 298 p.
2. Modern Data Warehouse. <https://io.wp.com/www.jamesserra.com/wp> (дата обращения 15.08.2025).
3. *Boehm B.W., Brown J.R., Kaspar H., Lipow M., MacLeod G.J., Merritt M.J. Characteristics of Software Quality,* TRW Series of Software Technology. – Amsterdam: North Holland, 1978. – 166 p.
4. *McCall J.A., Richards P.K., Walters G.F. Factors in Software Quality: Concept and Definitions of Software Quality.* FinalTechnicalReport. – Vol. 1. – National Technical Information Service, Springfield, 1977.
5. *Ghezzi C., Jazayeri M., Mandrioli D. Fundamental of Software Engineering.* – NJ, USA, Prentice-Hall, 1991.

6. *Dromey G.R.* A model for software product quality // *Transactions of Software Engineering*. –1995. – Vol. 21, № 2. – P. 146–162.
7. ISO/IEC TR 9126-4:2004 Software engineering – Product quality – Part 4: Quality in use metrics.
8. *Dranko O.I., HollayA.V.* The mechanisms of smart management for industrial enterprises // *Applied Mathematics and Control Sciences*. – 2020. – № 1. – P. 59–73.
9. *Khamutova M.V., Kushnikov V.A., Dranko O.I.* A mathematical model for choosing an action plan for the prevention and elimination of flood effects // *IFAC-PapersOnLine*. – 2022. – Vol. 55, № 3. – P. 113–118.
10. *Резчиков А.Ф., Кушников В.А., Яндыбаева Н.В., Иващенко В.А., Богомолов А.С., Филимонюк Л.Ю.* Модель для оценки состояния национальной безопасности россии на основе теории системной динамики // *Прикладная информатика*. – 2017. – Т. 12, № 2 (68). – С. 106–117.
11. *Rezchikov A.F., Kushnikov V.A., Ivashchenko V.A., Bogomolov A.S., Filimonuk L., Kachur K.P.* Control of the air transportation system with flight safety as a criterion // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. – 2016. – Vol. 466. – P. 423–432.
12. *Яндыбаева Н.В., Кожанова Е.Р., Кушников В.А.* Разработка программного продукта для определения эффективности деятельности высшего учебного заведения // *Вестник Саратовского государственного технического университета*. – 2014. – Т. 2, № 1(75). – С. 214–219.
13. *Резчиков А.Ф., Кушников В.А., Евсеев П.Л., Кабанов И.А.* Задачи и модели оперативного управления компрессорным хозяйством промышленного предприятия // *Мехатроника, автоматизация, управление*. – 2004. – № 3. – С. 45–50.
14. *Кушников О.В., Гусятников В.Н., Кушников В.А.* Разработка графовой модели системной динамики для управления хранилищем данных // *Проблемы управления в социально-экономических и технических системах: материалы XXI междунар. научно-практической конф.* – Саратов, 2025. – С. 389–393.
15. *Кушников О.В., Гусятников В.Н., Кушников В.А.* Управление хранилищами данных по скалярному критерию эффективности функционирования программного обеспечения. // *Проблемы управления в социально-экономических и технических системах: материалы XXI междунар. научно-практической конф.* – Саратов, 2025. – С. 393–398.