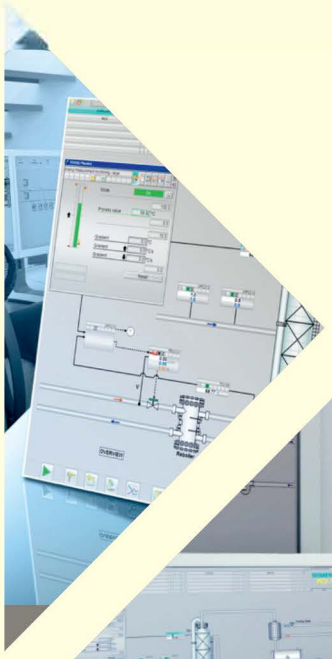
ISSN online 2658-6436

№ 2 (4)
2019



Научно-технический журнал

Автоматизация и моделирование

в проектировании и управлении

АВТОМАТИЗАЦИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ в проектировании и управлении

НАУЧНО – ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Издается с 2018 года **№ 2(04), 2019**

Сетевое издание

Выходит 1 раз в квартал

Учредитель издания – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«Брянский государственный технический университет» (БГТУ)

Председатель редакционного совета - **Сигов А.С.**, *д-р. физ. мат. наук, проф., академик РАН*
Заместитель председателя редакционного совета – **Аверченков А.В.**, *д-р. тех. наук, доц.*
Заместитель председателя редакционного совета – **Федонин О.Н.**, *д-р. тех. наук, проф.*

Бобырь М.В., *д-р. тех. наук, проф. (Курск)*
Бочкарев П.Ю., *д-р. тех. наук, проф. (Саратов)*
Долгов Ю.А., *д-р. тех. наук, проф.(Тирасполь)*
Еременко В.Т., *д-р. тех. наук, проф. (Орел)*
Иващук О.А., *д-р. тех. наук, проф. (Белгород)*
Карпенко А.П., *д-р. физ. мат. наук, проф. (Москва)*
Квятковская И.Ю., *д-р. тех. наук, проф.(Астрахань)*
Кравец А.Г., *д-р. тех. наук, проф. (Волгоград)*
Курейчик В.В., *д-р. тех. наук, проф. (Таганрог)*
Ланцов В.Н., *д-р. тех. наук, проф. (Владимир)*
Носков С.И., *д-р. тех. наук, проф. (Иркутск)*
Пестер А., *д-р. тех. наук, проф. (Австрия)*
Петрешин Д.И., *д-р. тех. наук, проф. (Брянск)*
Подвесовский А.Г., *канд. тех. наук, доц. (Брянск)*
Пылькин А.Н., *д-р. тех. наук, проф. (Рязань)*
Скрыпников А.В., *д-р. тех. наук, проф. (Воронеж)*
Соснин П.И., *д-р. тех. наук, проф. (Ульяновск)*
Феофанов А.Н., *д-р. тех. наук, проф. (Москва)*
Хейфец М.Л., *д-р. тех. наук, проф. (Белорусь)*
Чепчуров М.С., *д-р. тех. наук, проф. (Белгород)*
Шептунов С.А., *д-р. тех. наук, проф. (Москва)*
Ярушкина Н.Г., *д-р. тех. наук, проф. (Ульяновск)*

Редколлегия
Главный редактор – **Аверченков В.И.** *д-р. тех. наук, проф.*
Зам. главного редактора – **Подвесовский А.Г.** *канд. тех. наук, доц.*
Ответственный секретарь – **Кузьменко А.А**. *канд. биол. наук*

Корректор – **Малюкина А.Ю.**

Адрес редакции:
241035, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7
тел.: (4832) 56-49-90
Адрес размещения: http://www.aimpu.ru
E-mail: aim-pu@mail.ru

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство о регистрации средства массовой информации Эл № ФС77-73848 от 05 октября 2018 года

ISSN online: 2658-6436

Журнал включен в специализированный референтный библиографический сервис CrossRef

Журнал публикует основные результаты научных исследований по специальностям:

05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами
05.13.10 – Управление в социальных и экономических системах
05.13.12 – Системы автоматизации проектирования
05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Перепечатка, все виды копирования и воспроизведения материалов, публикуемых в журнале «Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении», допускаются со ссылкой на источник информации и только с разрешения редакции

© Брянский государственный технический университет, 2019

AUTOMATION AND MODELING

in design and managment

SCIENTIFIC TECHNICAL JOURNAL

Issued since 2018 **№ 2(04), 2019**

Online edition

Published once a quarter

The founder of the publication – the Federal state budgetary educational institution of higher education
«Bryansk State Technical University» (BSTU)

Chairman of Editorial Board – **Sigov A.S.**, *D. Phys.-Mat., Professor, Academician of RAS*
Deputy Chairman of Editorial Board – **Averchenkov A.V.**, *D. Eng., Associate professor*
Deputy Chairman of the editorial Board –**Fedonin O.N.,** *D. Eng., Professor*

M.Yu. Bobyr, *D. Eng., Prof., (Kursk)*
P.Yu. Bochkaryov, *D. Eng., Prof., (Saratov)*
Yu.A. Dolgov, *D. Eng., Prof., (Tiraspol)*
V.T. Yeremenko, *D. Eng., Prof., (Orel)*
O.A. Ivashchuk, *D. Eng., Prof., (Belgorod)*
A.P. Karpenko, *D. Phys.-Mat.,Prof., (Moscow)*
I.Yu. Kvyatkovskaya, *D. Eng., Prof., (Astrakhan)*
A.G. Kravets, *D. Eng., Prof., (Volgograd)*
V.V. Kureichik, *D. Eng., Prof., (Taganrog)*
V.N. Lantsov, *D. Eng., Prof., (Vladimir)*
S.Yu. Noskov, *D. Eng., Prof., (Irkutsk)*
A. Pester, *D. Eng., Prof., (Austria)*
D.I. Petreshin, *D. Eng., Prof., (Bryansk)*
A.G. Podvesovskiy, *Can. Eng., Assoc. Prof. (Bryansk)*
A.N. Pylkin, *D. Eng., Prof., (Bryansk)*
A.V. Skrypnikov, *D. Eng., Prof., (Voronezh)*
P.I. Sosnin, *D. Eng., Prof.,(Ulyanovsk)*
A.N. Feofanov, *D. Eng., Prof., (Moscow)*
M.L. Kheifets, *D. Eng., Prof., (Minsk, Belarus)*
M.S. Chepchurov, *D. Eng., Prof., (Belgorod)*
S.A. Sheptunov, *D. Eng., Prof., (Moscow)*
N.G. Yarushkina, *D. Eng., Prof., (Ulyanovsk)*

Editorial board
Editor-in-Chief –**Averchenkov V.I.** *D.Eng., Prof.,*
Deputy Editor-in Chief – **PodvesovskiyA.G.** *Can.Eng., Assoc. Prof.*
Executive Secretary – **Kuzmenko A.A**. *Can.Biol. Sc.*
Corrector – **Maliukina A.Yu.**

*Address of edition*7, 50 Years of October Avenue,
Bryansk, Russia, 241035
Tel.: (4832) 56-49-90
Accommodation address: http://www.aimpu.ru
E-mail: aim-pu@mail.ru

The Journal is registered by the Federal Service for Supervision in the Sphere of Telecom, Information Technologies and Mass Communications of Russian Federation (ROSKOMNADZOR).
Registration certificate Эл № ФС77-73848 of October 05, 2018

ISSN online: 2658-6436

Journal is included in a specialized consultant bibliographical service CrossRef

Reprinting, all kinds of material copying and reproduction of materials published in the journal "Automation and modeling in design and managment" is allowed only with the Editorial Board's permission and a reference to the source of information

© Bryansk StateTechnical University, 2019

СОДЕРЖАНИЕ

Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Никитов И.А., Мельник И.С., Гаврилов Е.П., Ланцов В.Н. Тензоры для моделирования нелинейных схем методом спектрального баланса 4

Управление в социальных и экономических системах

Пономарев К.С., Феофанов А.Н., Гришина Т.Г. Цифровой двойник производства – средство цифровизации деятельности организации 11

Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами, системы автоматизации проектирования

Аршинский В.Л., Аршинский Л.В., Бахвалов С.В. Принципы необходимости и достаточности в систематизации программного обеспечения 18

Горлов А.П., Рытов М.Ю., Лысов Д.А. Автоматизированная система оценки эффективности программно-аппаратных средств защиты информации 25

Игнатьев С.С., Аверченков А.В. Разработка комплекса для автоматизации процесса проектирования систем водоподготовки плавательных бассейнов 33

Шутиков М.А., Феофанов А.Н. Планирование загрузки измерительного оборудования совместно со станочным парком при помощи mes-системы 43

CONTENTS

Mathematical modeling, numerical methods and program complexes

Nikitov I.A., Melnik I.S., Gavrilov E.P., Lantsov V.N. Simulation of nonlinear circuits by spectral balance method using tensors 4

Management in social And economic systems

Ponomarev K.S., Feofanov A.N., Grishina T.G. Enterprise digital twin – instrument of digitalization the activity of the organization 11

Automation and control of technological processes and production, automated design systems

Arshinskiy V.L., Arshinskiy L.V., Bakhvalov S.V. The principles of necessity and sufficiency to systematize software 18

Gorlov A.P., Rytov M.Yu., Lysov D.A. Automated system for estimation-efficiency software means of information protection 25

Ignatev S.S., Averchenkov A.V. Development of system for automation of process of designing of water treatment systems for swimming pools 33

Shutikov M.A., Feofanov A.N. Planning of measuring equipment together with a machine-tool fleet with the help of mes-system 43

УДК: 004.942.001.57
DOI: 10.30987/article_5cf2d111d2d487.29167772

И.А. Никитов, И.С. Мельник, Е.П. Гаврилов, В.Н. Ланцов

ТЕНЗОРЫ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ СХЕМ МЕТОДОМ СПЕКТРАЛЬНОГО БАЛАНСА

Рассмотрен вариант метода гармонического баланса, где линейная и нелинейная части моделируются в частотной области. Решена задача вычисления спектра в нелинейных элементах. В статье представлен обзор методов использования тензоров в задачах моделирования в САПР электроники. Описаны методы декомпозиции тензоров. Представлен возможный вариант использования тензорного исчисления в задачах спектрального баланса для САПР электроники.

Ключевые слова: *спектральный баланс, нелинейные элементы, расчет спектра, тензоры, разложения.*

I.A. Nikitov, I.S. Melnik, E.P. Gavrilov, V.N. Lantsov

SIMULATION OF NONLINEAR CIRCUITS BY SPECTRAL BALANCE METHOD USING TENSORS

The version of harmonic balance method where the linear and nonlinear parts are modeled in frequency domain is described. The task of spectra calculation in nonlinear elements is solved. In this paper the review of methods for tensor usage at simulation tasks into electronic CAD systems are discussed. The methods of tensor decomposition are described. The possible version of tensors usage in the tasks of spectral balance method for electronic CAD systems is presented.

Keywords: *spectral balance, nonlinear elements, spectral calculation, tensors, decompositions.*

Введение

В связи с трудностью и длительностью проектирования электронных систем разработчиками программного обеспечения САПР постоянно совершенствуются методы и алгоритмы численных методов решения задач анализа нелинейных схем, особенно в интегральном исполнении, при воздействии сложных входных сигналов [1].

Объектом исследований в данной работе являются нелинейные электронные схемы, модель которых относится к сложным интегро-дифференциальных уравнениям высокой размерности.

Предмет исследования – методы спектрального баланса для решения нелинейных уравнений с использованием тензорных разложений.

Целью данной работы является разработка новых методов, алгоритмов, а в конечном итоге, инженерных программ для численного решения уравнений математических моделей электронных схем на основе методов спектрального баланса и тензорных декомпозиций.

1. Метод спектрального баланса

Пусть нелинейная схема описывается системой нелинейных итегро-дифференциальных уравнений (СНИДУ) общего вида

$$f(v(t),t) = i(v(t)) + \frac{dq(v(t))}{dt} + \int_{-\infty}^{t} y(t-\tau)v(\tau)d\tau + i_E(t) = 0. \quad (1)$$

Здесь $v(t)$ – вектор узловых напряжений размерностью N; $i(v(t))$ – вектор тока резистивных элементов; $q(v(t))$ - заряд конденсаторов; $u(t)$ – токи входных источников; $y(t)$ – импульсная характеристика линейной части схемы; i и q представляют только нелинейные элементы [1].

Метод спектрального баланса является разновидностью метода гармонического баланса (ГБ), когда и линейная и нелинейная части модели схемы описываются в частотной области [2, 3]. Система уравнений модели в этом случае будут иметь вид

$$f(V) = I(V) + \Omega Q(V) + Y(\omega)V - I_E = 0. \quad (2)$$

Здесь $F(V)$, $I(V)$, $Q(V)$, V – векторы размерностью $[(2K+1)*N]$, содержащие спектр в каждом узле схемы. Матрица Y - является блочной, матрица Ω, – блочно-диагональной, $\Omega_{nn} = diag\{-j\omega_K,...,0,...,j\omega_K\}$, K – число учитываемых гармоник частоты ω, $V = \Gamma u$ и $u = \Gamma^{-1}V$ – связь между представлением сигнала во временной и частотной областях, Γ и Γ^{-1} прямое и обратное преобразование Фурье [1].

Метод спектрального баланса имеет преимущества перед методом ГБ по скорости расчетов, так как нет необходимости использовать преобразование Фурье дважды для перехода из частотной области во временную область и обратно [1, 3]. Но возникают ряд других проблем, одна из которых, это разработка методов и алгоритмов расчета спектра в нелинейных элементах (НЭ) схемы.

2. Расчет спектра в нелинейных элементах

Для характеристик НЭ описываемых зависимостями тока от напряжения во временной области $i(t) = f[v(t)]$ или более упрощенно $i = f(v)$ или $i(v)$ необходимо найти связь амплитуд гармоник тока и напряжения в частотной области $I(\omega) = f[V(\omega)]$ или $I(V)$.

При аппроксимации нелинейных зависимостей во временной области степенным рядом имеем [2]

$$i(t) = f[v(t)] = \sum_{k=0}^{N} g_k v^k(t) = i_0 + g_1 v(t) + g_2 v^2(t) + ..., \quad (3)$$

где $i_0 = i(t)|_{v(t)=v_0} = v_{DC}$, $g_k = \frac{1}{k!}\frac{\partial^k i(t)}{\partial v^k(t)}|_{v(t)=v_0=v_{DC}}$ - ток по постоянному току в рабочей точке и производные тока по напряжению на НЭ.

Для нелинейных зависимостей емкостей НЭ имеем

$$i(t) = \frac{d}{dt}\sum_{k=0}^{N} c_k v^k(t) = \frac{d}{dt}q(v_0) + \frac{d}{dt}[c_1 v(t) + c_2 v^2(t) + ...], \quad (4)$$

где $c_k = \frac{1}{k!}\frac{\partial^k q(t)}{\partial v^k(t)}|_{v(t)=v_0=v_{DC}}$.

Если в выражение ряда (3) подставим гармоническое напряжение, например для трех гармоник типа, $u(t) = \sum_{k=-3}^{3} V_k \exp(jk\omega t)$, то можно получить необходимую связь амплитуд гармоник тока и напряжений $I_n = f(V_m)$ следующим способом.

Представим хотя бы две гармоники экспоненциального сигнала (опустим время и другие элементы) в виде следующей упрощенной записи

$$u(t) = V_{-2}e^{-2\omega} + V_{-1}e^{-\omega} + V_0 + V_1e^{\omega} + V_2e^{2\omega} + ... \quad (5)$$

Рассмотрим квадратичный элемент ряда с $u^2(t)$ по классической формуле

$$(a+b+c)^2 = a^2 + b^2 + c^2 + 2ab + 2ac + 2bc\,. \quad (6)$$

Тогда

$$\begin{aligned} u^2(t) = {} & V_{-2}^2e^{-4\omega} + V_{-1}^2e^{-3\omega} + V_0^2 + V_1^2e^{3\omega} + V_2^2e^{4\omega} + 2V_{-2}V_{-1}e^{-3\omega} + \\ & 2V_{-2}V_0e^{-2\omega} + 2V_{-2}V_1e^{-\omega} + 2V_{-2}V_2 + 2V_{-1}V_0e^{-\omega} + 2V_{-1}V_1 + 2V_{-1}V_2e^{\omega} + \\ & + 2V_0V_1e^{\omega} + V_0V_2e^{2\omega} + V_1V_2e^{3\omega} \end{aligned} \quad (7)$$

Аналогично можно расписать элемент $u^3(t)$. Подставив $u^2(t)$ и $u^3(t)$ в формулу ряда, можно собрать все слагаемые на частотах $\omega = 0$, например это слагаемые из $u^2(t)$ - $V_0^2 + 2V_{-2}V_2 + 2V_{-1}V_1$. Далее собираем слагаемые с частотой 1ω, 2ω и 3ω. Получим следующие соотношения для амплитуд гармоник тока и гармоник напряжений на НЭ

$$\begin{aligned} I_0 &= i(u_{DC}) + g_1V_0 + g_2V_0V_0 + 2g_2[V_1V_1^* + V_2V_2^* + V_3V_3^*] + 3g_3[V_1^*V_1^*V_2 + V_1^2V_2^*]... \\ I_1 &= g_1V_1 + 2g_2[V_0V_1 + V_2V_1^* + V_3V_2^*] + 3g_3[V_3V_1^*V_1^* + V_0^2V_1 + V_2^2V_3^*]... \\ I_2 &= g_1V_2 + g_2V_1^2 + 2g_2[V_0V_2 + V_3V_1^*] + 3g_3[V_0^2V_2 + V_1^2V_0 + V_2^2V_2^*]... \\ I_3 &= g_1V_3 + 2g_2[V_0V_3 + V_1V_2] + 3g_3[V_1^3 + V_0^2V_3 + V_2^2V_1^* + V_3^2V_3^*]... \\ I_1^* &= g_1V_1^* + 2g_2[V_0V_1^* + V_1V_2^* + V_2V_3^*] + 3g_3[V_1^2V_3^* + V_0^2V_1^* + V_3V_2^*V_2^*]... \\ I_2^* &= g_1V_2^* + g_2V_1^*V_1^* + 2g_2[V_0V_2^* + V_1V_3^*] + 3g_3[V_0^2V_2^* + V_1^*V_1^*V_0 + V_2^*V_2^*V_2]... \\ I_3^* &= g_1V_3^* + 2g_2[V_0V_3^* + V_1^*V_2^*] + 3g_3[V_1^*V_1^*V_1^* + V_0^2V_3^* + V_2^*V_2^*V_1 + V_3^*V_3V_3^*]... \end{aligned} \quad (8)$$

Эти соотношения легко программируются, не требуют дополнительных операций с матрицами, легко прослеживаются определенные закономерности в слагаемых на разных частотах.

3. Тензоры в САПР

Достижения в последние годы в области методов декомпозиции (разложении) тензоров позволили значительно сократить память для хранения высоко размерных задач и сократить вычислительные затраты. Это, в свою очередь, привело к резкому увеличению интереса к тензорам в различных приложениях, в том числе и САПР [4].

Так в статье [5] был представлен метод расчета нелинейных схем с применением алгоритмов понижения порядка моделей (model order reduction, MOR [6]) на основе тензорного анализа, который в отличие от существующих методов на основе традиционных методов MOR для нелинейных схем (методы близкие к рядам Вольтерра) позволил использовать нелинейности высокого порядка. В данном случае модель очень высокой размерности, легко была представлена тензором, и используя современные подходы к декомпозиции тензоров, была решена задача моделирования с более высокой точностью при сокращении времени расчета и сокращении необходимой памяти ЭВМ [5].

В работе [4] представлена тензорная теория как основа для САПР при решении проблем высокой размерности (с большим числом неизвестных). До недавних пор в

программном обеспечении САПР использовались операции с векторами и матрицами [4]. Тензорное исчисление является обобщением матричного исчисления, оно более эффективно для проблем высокой размерности, как для памяти хранения, так и скорости решения уравнений. Отмечается, что тензоры уже эффективно применялись, в первую очередь, в физике. Благодаря высокой эффективности для работы с данными большой размерности тензоры стали успешно применяться во многих инженерных задачах: обработки сигналов и задач больших данных.

Тензор *d*-го ранга (иногда вместо слова «ранг» используют слова «валентность», «порядок», «мода») это массив данных с *d* направлениями (число измерений, число индексов, directions, dimensions), определяемый как $\mathrm{A} \in R^{n_1 \times n_2 \times \ldots \times n_d}$ [5]**.** Отметим, что вектор $\mathrm{a} \in R^{n}$ это тензор 1-го ранга. Матрица $A \in R^{n_1 \times n_2}$ это массив данных (тензор) 2-го ранга. Продолжая эту идею для более высоких рангов ($d \geq 3$), тензор $\mathrm{A} \in R^{n_1 \times n_2 \times \ldots \times n_d}$ представляет массив данных *d*-го ранга. Рисунок 1 иллюстрирует пример тензора третьего ранга для $3 \times 4 \times 2$ [4].

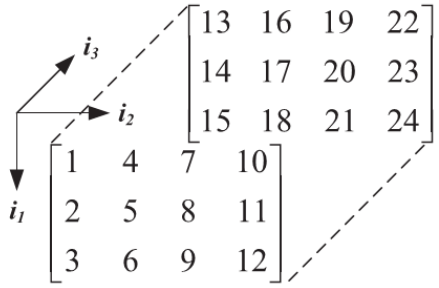


Рис. 1. Пример тензора третьего ранга ($3 \times 4 \times 2$)[4].

Размерность тензора быстро растет с увеличением *d* (экспоненциальный рост от *d*), число элементов определяется как n^d. Если $n = 2$, $d = 100$, то получим $2^{100} > 10^{30}$. Это очень много, что делает практически невозможным использование стандартных подходов.

4. Методы декомпозиции (разложения) тензоров

Методы декомпозиции позволяют аппроксимировать (сжать) высокоразмерный тензор небольшим числом элементов. В результате, можно решать высокоразмерные проблемы с малыми затратами памяти и вычислений [4].

Каноническая декомпозиция. Каноническая декомпозиция (КД, CANDECOMP/PARAFAC decomposition [5], CPD) аппроксимирует тензор A конечной суммой тензоров первого ранга, что можно записать в следующем виде

$$\mathrm{A} \approx \sum_{\mathrm{r}=1}^{\mathrm{R}} a_r^{(1)} \circ a_r^{(2)} \circ \ldots \circ a_r^{(d)}, a_r^{(k)} \in R^{n_k} \tag{9}$$

Здесь $\mathrm{A}^{(\mathrm{k})} \equiv [a_1^{(k)}, a_2^{(k)}, \ldots, a_R^{(k)}] \in R^{n_k \times R}$ так называемые факторные матрицы. Иллюстрация метода для тензора третьего порядка приведена на рис. 2 [5].

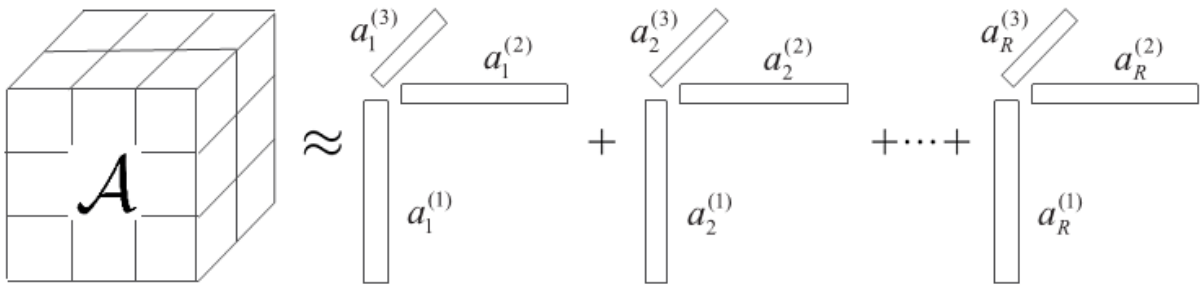


Рис. 2. Каноническая декомпозиция тензора третьего порядка [5].

Декомпозиция Такера (Tucker). Здесь Тензор $\mathrm{A} \in R^{n_1 \times n_2 \times \ldots \times n_d}$ аппроксимируется базовым тензором $\mathrm{S} \in R^{r_1 \times r_2 \times \ldots \times r_d}$ и рядом факторных матриц $U \in R^{n_k \times r_k}$ [4]

$$\mathrm{A} = S \times_1 U^{(1)} \times_2 U^{(2)} \ldots \times_d U^{(d)} \tag{10}$$

Декомпозиция Такера сокращает необходимую память, когда r_k значительно меньше n_k. Декомпозиция иллюстрируется на рис. 3 [4].

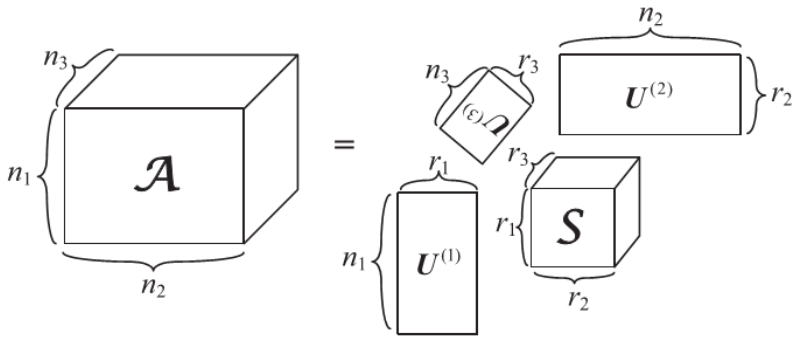


Рис. 3. Декомпозиция Такера преобразование тензора третьего порядка в базовый тензор *S* и факторные матрицы $U \in R^{n_k \times r_k}$ [4].

Декомпозиция «тензорного поезда» (*Tensor Train Decomposition, TT).* В данном методе тензор порядка *d* аппроксимируется двумя тензорами второго порядка (матрицами) и *(d* − 2*)* 3-х мерными тензорами, соединенными каскадно или в виде поезда [4]. Математически элементы тензора $\mathrm{A} \in R^{n_1 \times n_2 \times \ldots \times n_d}$ заменяется как $\mathrm{A} = G_{i1}^{(1)} G_{i2}^{(2)} \ldots G_{id}^{(d)}$. На рис. 4 приведен пример TT декомпозиции для тензора третьего порядка [4].

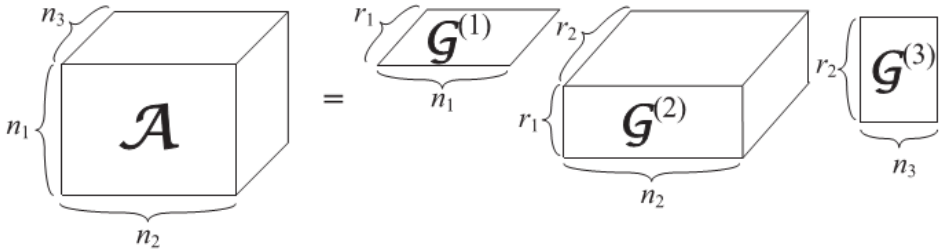


Рис. 4. Иллюстрация метода «тензорного поезда», где исходный трехмерный тензор преобразуется в две матрицы $G_{i1}^{(1)}, G_{id}^{(d)}$ и трехмерный тензор $G^{(2)}$ [4].

5. Спектральный баланс и тензоры

Уравнения модели электронной схемы имеют очень большую размерность, число уравнений (неизвестных) может достигать сотен тысяч и более. Поэтому методы решения таких уравнений относятся к сложным подходам и высоко размерным. Далее рассмотрим возможность применения тензорных разложений для метода спектрального баланса.

Одной из основных проблем метода спектрального баланса является необходимость учета большого числа членов аппроксимирующего полинома, для обеспечения достаточной точности расчетов, что приводит к увеличению вычислительных затрат [3].

Решение проблемы учета большого числа членов полинома возможно путем применения тензорного описания и тензорного разложения. В этом случае в качестве измерений при описании тензора будут:

- число уравнений (переменных) *N* в (2) (обычно *N* очень велико);

- число учитываемых спектральных составляющих $2M+1$, где M номер наивысшей гармоники спектра (обычно десятки или сотни);

- число членов ряда или полинома (больше трех-пяти).

Данный подход позволит увеличить число членов ряда (полинома), повысить точность при сокращении вычислительных затрат.

Заключение

В работе представлен метод спектрального баланса, являющемся частным случаем метода гармонического баланса, В методе спектрального баланса линейная и нелинейная части схемы моделируются в частотной области, что не требует применения преобразования Фурье из временной области в частотную область и обратно. Для метода спектрального баланса решена задача вычисления спектра в нелинейных элементах. В статье представлен обзор методов использования тензоров в задачах моделирования в САПР электроники. Описаны методы декомпозиции тензоров. Представлен возможный вариант использования тензорного исчисления в задачах спектрального баланса для САПР электроники.

Исследования поддержаны грантом Министерства образования и науки Российской Федерации, проект № 1.3270.2017/4.6.

Список литературы:

1. Ланцов В.Н. Состояние в области методов моделирования нелинейных ВЧ электронных устройств связи (обзор). Часть 2 // Проектирование и технология электронных средств, 2013, № 1, с. 16 - 23.

2. Ланцов В.Н., Куванов А.В., Никитов И.А. Реализация метода гармонического баланса в инженерной системе MATLAB // Перспективные технологии в средствах передачи информации. Материалы XII международной научно-технической конференции ПТСПИ”2017. Владимир-Суздаль, 5-7 июля 2017, т. 2, с. 54-55.

3. Ланцов В.Н., Иванов В.А. Анализ нелинейных устройств методом спектрального баланса // Современные технологии в науке и образовании. Труды Международной научно-технической конференции, СТНО-2016, РГРУ, Рязань, 2016, с. 158-160.

4. Zhang Z., Batselier K., Liu H., Daniel L., Wong N. Tensor computation: a new framework for high-dimensional problems in EDA // *IEEE Trans. on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, 2017, v. 36, No. 4, pp. 521-536.

5. Liu H., Daniel L., Wong N. Model reduction and simulation of nonlinear circuits via Tensor decomposition // *IEEE Trans. on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, 2015, v. 34, No. 7, pp. 1059–1069.

6. Долинина А.А., Ланцов В.Н. Метод понижения порядка моделей на основе рядов Вольтерра // *Динамика сложных систем - XXI век*. – Радиотехника. - 2016. - №3. - С. 50-54.

References:

1. Lantsov V.N. The state of the art into the area of simulation methods for nonlinear RF electronic communication. Part 2. Design and technology of electronic devices, 2013, No. 1. Pp. 16-23. [in Russian language]

2. Lantsov V.N., Kuvanov A.V., Nikitov I.A. Harmonic balance method realization in engineering system MATLAB. Perspective technologies into information transfer systems. XII International scientific conference PTSPI’2017. Vladimir-Suzdal, 5-7 June, 2017, v. 2, pp. 54-55. [in Russian language]

3. Lantsov V.N., Ivanov V.A. Nonlinear circuits analysis by spectral balance method. New technologies in science and education. Proc. of International conference, STNO-2016, Ryazan, 2016, pp. 158-160. [in Russian language]

4. Zhang Z., Batselier K., Liu H., Daniel L., Wong N. Tensor computation: a new framework for high-dimensional problems in EDA // *IEEE Trans. on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, 2017, v. 36, No. 4, pp. 521-536.

5. Liu H., Daniel L., Wong N. Model reduction and simulation of nonlinear circuits via Tensor decomposition // *IEEE Trans. on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, 2015, v. 34, No. 7, pp. 1059–1069.

6. Dolinina A.A., Lantsov V.N. Model order reduction method on the base of Volterra series. Complex Systems Dynamics. Radiotecnics. 2016, No. 3, pp. 50-54. [in Russian language]

Статья поступила в редколлегию 26.03.19.
Рецензент: к.т.н., доцент Брянского государственного технического университета Подвесовский А.Г.
Статья принята к публикации 29.04.19.

Сведения об авторах

Никитов Илья Александрович
Магистрант,
Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых
тел.: +7 (915) 772-38-39
E-mail: ioprst_0904@mail.ru

Мельник Иван Сергеевич
Студент,
Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых
тел.: +7 (920) 626-14-14
E-mail: ism14111998@yandex.ru

Гаврилов Евгений Павлович
Студент,
Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых
тел.: +7 (905) 105-66-87
E-mail: gep1998@mail.ru

Ланцов Владимир Николаевич
Д.т.н., профессор,
зав.кафедрой Вычислительной техники и систем управления, Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых
тел.: +7 (915) 777-87-07
E-mail: lantsov@vlsu.ru

Information about authors:

Nikitov Ilya Alexandrovich
Master degree student,
Vladimir state university named after Alexander and Nicolay Stoletovs
tel.: +7 (915) 772-38-39
E-mail: ioprst_0904@mail.ru

Melnik Ivan Sergeevich
Student,
Vladimir state university named after Alexander and Nicolay Stoletovs
tel.: +7 (920) 626-14-14
E-mail: ism14111998@yandex.ru

Gavrilov Evgenii Pavlovich
Student,
Vladimir state university named after Alexander and Nicolay Stoletovs
tel.: +7 (905) 105-66-87
E-mail: gep1998@mail.ru

Lantsov Vladimir Nikolaevich,
Doctor of Engineering, Professor,
Chief of Computer Engineering and System Control Department, Vladimir state university named after Alexander and Nicolay Stoletovs
tel.: +7 (915) 777-87-07
E-mail: lantsov@vlsu.ru

УДК: 681.5
DOI: 10.30987/article_5cf2d1c56f8944.09486334

К.С. Пономарев, А.Н. Феофанов, Т.Г. Гришина

ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК ПРОИЗВОДСТВА – СРЕДСТВО ЦИФРОВИЗАЦИИ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ

В статье рассматриваются аспекты применения на предприятиях цифровых двойников производства. Указанно, что цифровой двойник – это представленная в виде математических зависимостей цифровая модель реального объекта или системы. Выявлен принцип функционирования цифрового двойника производства. Сформулировано, что применение цифрового двойника позволяет добиться повышения эффективности функционирования предприятия, а так же снижения рисков, связанных с возможными отклонениями функционирования технологических процессов производства.

Ключевые слова: *цифровой двойник, Индустрия 4.0., деятельность организации, автоматизация, безлюдное производство, цифровизация, идентификация изделий.*

K.S. Ponomarev, A.N. Feofanov, T.G. Grishina

ENTERPRISE DIGITAL TWIN – INSTRUMENT OF DIGITALIZATION THE ACTIVITY OF THE ORGANIZATION

The article discusses aspects of the use of digital twins of enterprises in manufacturing. It is indicated that a digital twin is a digital model of a real object or system presented in the form of mathematical dependencies. The principle of operation of enterprise's digital twin is revealed. It is formulated that the use of the digital twin allows increasing the efficiency of the enterprise, as well as reducing the risks associated with possible deviations in the functioning of technological processes of production.

Keywords: *digital twin, Industry 4.0., organization's activities, automation, manless manufacturing, digitalization, product identification.*

Введение

В связи с растущей сложностью технологических процессов, процессов управления предприятием, постоянно растущим объемом данных, которые необходимо подвергать интерпретации, обработке и анализу в настоящий момент уже практически невозможно осуществлять эффективное функционирование предприятия без использования инструментов новой цифровой эры – эры Индустрии 4.0. К таким инструментам можно отнести различные системы автоматизации управления предприятием, такие как *MES, ERP, SCADA*, системы автоматизированного проектирования *CAD,CAM,CAE*, системы класса *PLM, PDM*, а так же цифровизацию деятельности предприятия, в том числе его технологических процессов, с помощью виртуальных моделей процессов, работ, изделий – цифровых двойников.

1. Преимущества применения технологии цифрового двойника на предприятии

Цифровой двойник представляет собой виртуальную копию физического мира, виртуальную модель реального объекта или ситуации, которая на микро- и макроуровне с помощью набора математических моделей описывает состояние объекта и всех его элементов [1]. То есть цифровой двойник – это представленный в цифровой среде двойник физического объекта, системы или процесса. Цифровой двойник позволяет в виртуальном

пространстве смоделировать изменение состояния и характеристик всего изделия при изменении характеристик любого из его элементов благодаря тому, что созданная виртуальная трехмерная модель изделия связана с информационной базой данных, в которой каждому элементу можно присвоить дополнительные атрибуты[2]. Это позволяет оперативно отслеживать изменения, происходящие в реальном процессе, и адекватно реагировать на них. Кроме того, появляется возможность проводить определенные производственно-технологические эксперименты не на дорогостоящем оборудовании, жертвуя при этом драгоценными временными ресурсами, а в виртуальной цифровой среде, сведя на нет риски, связанные с порчей и простоем оборудования, угрозой человеческому здоровью и окружающей среде. Так же, в процессе накопления информации о функционировании технологических, логистических, информационных процессов предприятия, цифровой двойник повышает предиктивность управления, то есть с его помощью можно отслеживать и во время принять меры по потенциальным отклонениям и несоответствиям в тех или иных процессах деятельности организации.

Благодаря использованию методов цифрового двойника, можно на порядок сократить количество натурных испытаний, число попыток отработки техпроцессов, всех тех действий, которые связаны с изготовлением реальной материальной части и её испытаниями, стоимость которых значительно выше, чем стоимость математического моделирования[3].В качестве условий функционирования предприятия, можно задать необходимые ограничения, условия, критерии производительности того или иного оборудования, и провести моделирование деятельности организации при выполнении поставленных условий с высокой степенью адекватности реальнойпроизводственнойситуации. Цифровой двойник даст возможность повысить предиктивность функционирования организации. На основе получаемых данных, а также учитывая процессы, происходящие на предприятии, и находя взаимосвязь между ними, в том числе благодаря решению уравнений физики, механики, термо- и электродинамики, тепломассообмена, цифровой двойник позволяет моделировать и «предсказывать» некоторые нештатные, непредвиденные ситуации и режимы, а также предоставлять наиболее эффективный вариант их предотвращения.Также,благодаря накоплению статистической информации, появляется возможность более рационально проводить ремонт технологического оборудования. Можно осуществлять получение информации о методах и процедурах технического обслуживания согласно принятым государственным или внутренним стандартам на техническое обслуживание того или иного средства производства. По результатам проведенного технического обслуживания составленный отчет также можно передать в информационную среду цифрового двойника предприятия.На основе получаемых в оперативном режиме данных, а также опытных данных за предыдущие периоды времени, цифровой двойник может отследить тенденции выхода из строя элементов технологического оборудования, и дать сигнал о необходимости его ремонта. Таким образом, появляется возможность проводить ремонт по текущему состоянию оборудования, тем самым снизив затраты на его плановый и профилактический ремонт. Благодаря этому, можно более эффективно распоряжаться тем временем, которое ушло бы на вынужденный простой оборудования, и, возможно, всей технологической линии, в случае поломки оборудования.

2. Принцип функционирования цифрового двойника в контексте стратегии Industrial Internet of Things

Цифровой двойник получает необходимую информацию с датчиков, сенсоров, установленных непосредственно на оборудовании, технологической линии, в цехе. Датчики фиксируют текущее состояние оборудования, окружающей среды, различные параметры технологического процесса, наличие сырья, идентифицируют этапы прохождения изделия по производственным стадиям. Интеграция с реальными производственными операциями создает каналы ценной обратной связи [4]. Получаемая информация с датчиков передается

посредством проводной, или, что более актуально с точки зрения безопасности и минимизации количества непроизводственных элементов цеха, беспроводной связи (сети *WiFi, LTE, ZigBee*) в единую цифровую среду предприятия, которая, по сути, и является основой цифрового двойника. Далее происходит обработка полученной информации, ее анализ и визуализация в приемлемом виде (рис. 1). По мере накопления информации о работе датчиков, появляется возможность актуализировать их количество и места расположения на предприятии, чтобы исключить избыточную или неверную информацию (например, вследствие влияния на показания датчика электрических наводок, температуры, влажности т.д.), а так же повысить скорость обработки и внесения информации в среду цифрового двойника. Такое взаимодействие датчиков, фиксирующих информацию, цифровой среды, где происходит ее обработка, накопление и анализ, производственных объектов (оборудования), где информация генерируется и каналов передачи такой информации носит название Индустриального Интернета Вещей(*Industrial Internet of Things, IIoT*), который также является одним из инструментов концепции Индустрии 4.0.

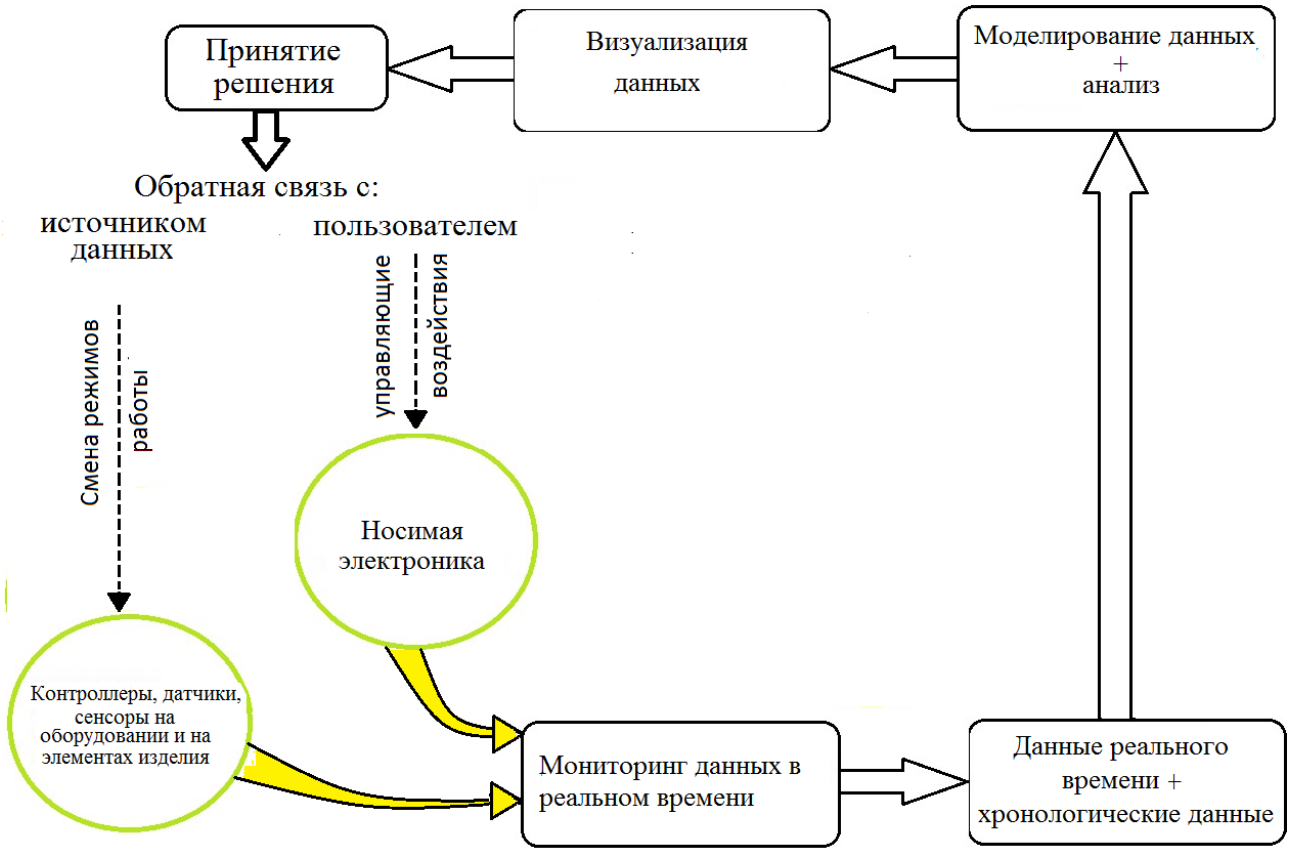


Рис. 1. Процесс функционирования цифрового двойника в рамках производственной системы предприятия

3. Роли цифрового двойника в процессах функционирования предприятия

Стоит отметить, что цифровой двойник может выступать в качестве одного из инструментов предотвращения нештатных ситуации на предприятии. Датчики, установленные на территории предприятия, могут регистрировать различные параметры, такие как уровень задымленности, радиационного фона, температуры, освещённости. При превышении определенных значений, информация об этом будет передана в соответствующие отделы, и в автоматическом режиме будут приняты определенные меры (остановка оборудования, активация пожарной тревоги, оповещение специальных служб). В

этой связи исключительно важно обеспечить защиту передачи информации, так как ее искажение может обернуться непредвиденными последствиями для функционирования всего предприятия.

Важнейшим аспектом применения цифрового двойника является возможность дистанционной обработки, анализа и управления данными предприятия. Например, в случае, если производственные цеха географически распределены, поступающая от них в цифровой двойник информация позволяет управлять всем предприятием дистанционно, что повышает эффективность, оперативность и прозрачность функционирования. С точки зрения логистики в таком случае цифровой двойник позволяет координировать поставку сырья, отгрузку продукции, перемещение средств производства между цехами. Становится возможным применение стратегии *Just in Time* (*JIT*), согласно которой минимизируются складские запасы, а материальные единицы поступают в необходимом количестве на определенный этап производства точно в срок. Благодаря этому снижаются временные и финансовые потери, связанные с накоплением большого количества продукции или сырья на складах, транспортировкой материальных единиц, исключаются возможные логистические простои, связанные с отсутствием необходимых материальных активов к определенному сроку. Для обеспечения подобных преимуществ в цифровой двойник вносится информация о времени и месте нахождения определенной партии продукции, сырья, транспортных средств путем их цифровой идентификации. Данные по многим параметрам: марке и типу сырья, номеру технологического участка обработки, применяемому при этом оборудованию и оператору, работающему на этом оборудовании, времени и типам операций заносятся в интегрированную цифровую среду цифрового двойника. В случае, если для изготовления изделия применяются комплектующие, изготовленные на других предприятиях, в цифровой двойник передается также информация об организации-изготовителе конкретного компонента, времени прибытия на предприятие, номере партии, контролере или сотруднике отдела технического контроля, принявшего данную партию и т.д. Цифровой двойник отслеживает каждый элемент изделия при помощи присвоения ему уникального идентификационного номера, который заносится в объектно-ориентированную базу данных, и постоянно присваивает этому номеру определенные атрибуты, исходя из процесса прохождения элемента по технологическим этапам производства. Таким образом, обеспечивается контроль жизненного цикла изготовления изделия, начиная с этапа отливки или механической обработки заготовки, и заканчивая процессом отгрузки изготовленного изделия потребителю. В случае обнаружения брака, обеспечивается возможность получить исчерпывающую информацию о технологической операции, приведшей к появлению несоответствия, использовавшемуся при этом оборудовании, дате и времени выполнения операции и о других параметрах технологического процесса. Благодаря этому, повышается однозначность идентификации брака, сокращаются временные затраты на поиск причин появления брака и повышается оперативность принятия корректирующих мер.

Для целей идентификации конкретного элемента или изделия могут использоваться различные средства автоматизации учета, например, штрих-коды или радио-метки. В начале цикла изготовления, на каждый элемент будущего изделия наносится штрих-код. В процессе прохождения по этапам технологического процесса, на каждой технологической операции, штрих-код сканируется специальным сканером. Таким образом, информация о месте нахождения конкретной материальной единицы, и, как следствие, о выполняемой над ней технологической операции (вместе со сведениями от регистрирующих датчиках об использующемся оборудовании, его параметрах, температуре, влажности, освещенности на конкретном рабочем месте, ответственном операторе) передается в режиме реального времени в информационную среду цифрового двойника, где происходит её обработка и анализ. В этой связи, становится возможным в каждый момент времени идентифицировать каждый конкретный элемент, и получить исчерпывающую информацию о складывающейся ситуации его изготовления.

В случае, если нанести на элемент штрих-код является затруднительным, или у сканера нет возможности «увидеть» штрих-код и считать его, можно воспользоваться методами радиочастотной идентификации. В элемент встраивается метка, которая, при подаче на неё сканирующего радиосигнала определенной частоты и модуляции, передает уникальный сигнал в ответ.

Говоря о возможностях координации функционирования географически распределенных цехов или даже отдельных предприятий (например, входящих в холдинг), отметим, что цифровой двойник дает возможность повысить уровень координации работ между производственными системами цехов или предприятий. Например, в случае выхода из строя какого-либо оборудования в одном из цехов, цифровой двойник, получая данные из *ERP/MES*-систем всего предприятия, поможет провести имитационное моделирование складывающейся ситуации и оперативно провести эксперимент, связанный с перераспределением материальных потоков между цехами и технологическими линиями. По результатам такого эксперимента появляется возможность принять наиболее рациональное решение с учетом всех влияющих факторов. В рассматриваемой ситуации, например, может быть принято решение о переносе части работ на оборудование смежного цеха с последующим перерасчетом производственного расписания.

4. Предпосылки развития концепций безлюдного производства на основе применения стратегии цифрового двойника

Вообще, корреляция систем кластера *CALS*-технологий (*CAD/CAM/CAE, ERP, MES, SCADA, PLM, PDM*) с информационной средой цифрового двойника и применением промышленных роботов при производстве продукции создает предпосылки для развития безлюдного производства, когда от момента создания *3D* модели изделия до момента его изготовления человеческое вмешательство будет сведено к минимуму или полностью исключено. К тому же, использование технологий дополненной реальности в контексте применения цифрового двойника может служить средством визуализации производственной деятельности предприятия. Возможно, в скором будущем, технолог, используя *VR*-очки, сможет «увидеть» полномасштабную виртуальную *3D* модель технологического процесса, внести в него изменения и тут же получить измененный процесс в цифровой форме, при этом, никак не влияя негативно на реальное производство.Цифровой двойник производства, на основе статистических данных, сможет предложить наиболее рациональный путь усовершенствования технологического процесса, и тут же визуализировать его в цифровом виде дополненной реальности.

Еще 10 – 15 лет назад существовали теоретические предпосылки для создания цифрового двойника, однако средства аппаратного и программного обеспечения на тот момент не соответствовали уровню непосредственной реализации концепции цифрового двойника. Теперь, в том числе благодаря применению облачных технологий, применение стратегий цифрового двойника является важным шагом развития предприятий.

Говоря об использовании цифрового двойника производства, отметим тот факт, что существует возможность передачи данных от готового изделия в цифровую среду предприятия, в том числе его цифровому двойнику. Если оснастить изделие регистрирующими датчиками, и снимать с них показания (как в режиме реального времени, так и например, при прохождении ремонтных работ или технического обслуживания изделий), то можно добиться получения ценной обратной связи, которая станет ключом к различного рода усовершенствованиям. Например, датчик, установленный в изделии, фиксирует утечку жидкости, и либо посылает информацию через беспроводные сети в режиме онлайн на производство, либо записывает эти данные в специально предусмотренное информационное хранилище, входящее в состав изделия. При диагностике или техническом обслуживании изделия информация из хранилища передается в информационную среду цифрового двойника. Цифровой двойник, в свою очередь, анализирует полученную

информацию, находит потенциальные причины проблемы (например, утечка вследствие коррозии металла резервуара, где хранится жидкость) и предлагает возможные варианты ее решения (напыление антикоррозийного слоя, изменение условий изготовления резервуара и т.д.). Далее, проводится виртуальный эксперимент, и из множества предложенных решений выбирается наиболее эффективное. Такое свойство цифрового двойника позволяет экономить временные и финансовые ресурсы, которые уходят на поиск причины определенного несоответствия и проверку предложенных решений путем натурных испытаний.

Конечно, внедрение цифровых двойников пока что связанно с определенными трудностями. По оценкам экспертов, к таким трудностям можно отнести и сложность математического моделирования, и нехватку специалистов в области цифровизации предприятий, и высокую стоимость разработки и внедрения цифрового двойника производства на предприятии. Однако, развитие технологий Индустрии 4.0., растущая сложность производств изделий, повышение технической и компьютерной грамотности специалистов, вызовы, стоящие перед предприятиями любой сферы экономики по всему миру – все это является признаком того, что без применения передовых информационных инструментов развития предприятиям станет все труднее соответствовать требованиям современного мира. В этой связи, внедрение цифрового двойника производства является актуальной задачей, решение которой позволит повысить конкурентоспособность и занять лидирующие позиции в отрасли деятельности организации.

Выводы

Таким образом, применение цифрового двойника в полной мере соответствует переходу к использованию кибернетических систем, что, в свою очередь,является одним из аспектов стратегий Индустрии 4.0. Несмотря на определенные трудности имплементации цифрового двойника в деятельность предприятия, эффект от его применения позволит значительно повысить эффективность, результативность и конкурентоспособность организации. В условиях повсеместной цифровизации и автоматизации внедрение цифровых технологий является важным шагом к развитию предприятия, сохранению и увеличению его влияния на рынке.

Список литературы:

1. Пономарев К.С. Цифровой двойник производства как инструмент цифровизации технологических процессов предприятия / К.С. Пономарев, А.Н. Феофанов // Актуальные тренды и перспективы развития науки, техники, технологий: сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции / Под общ. ред. Е. П. Ткачевой. – Белгород: ООО Агентство перспективных научных исследований (АПНИ), 2019. – С. 141 – 144.

2. http://www.rbcplus.ru (дата обращения 28.02.2019). Экономика двойников: как роботы приходят в менеджмент – URL: http://www.rbcplus.ru/news/5b5e4f2f7a8aa92e8c50df14.

3. https://cheremuha.com (дата обращения 28.02.2019) Цифровой двойник: зачем создавать в виртуальной среде симуляторы деталей, двигателей и целых цехов – URL: https://cheremuha.com/2018/04/13/digital-twin.html

4. Фюер Ц. Преимущества “цифрового двойника” / Ц. Фюер, Ц. Вейсманн // CAD/CAM/CAE Observer. 2017. - №5 (113) - стр. 50-53 // Радио-промышленность. 2015. № 4. С. 56-64..

References:

1. Ponomarev K.S. (2019). Digital twin of enterprise as a tool of digitalization of technological processes of enterprise // K.S. Ponomarev, A.N. Feofanov // Actual trends and prospects for the development of science, engineering and technology: collection of scientific papers on the materials of the International scientific-practical conference / edited by E.P. Tkacheva. Belgorod : LLC Agency of perspective scientific researches (APNI). pp. 141 – 144.[in Russian language]

2. Economy of twins: how robots come to management. Available at:http://www.rbcplus.ru (Accessed: 28.02.2019).[in Russian language]

3. Digital twin: why to create simulators of parts, engines and entire workshops in a virtual environment. Available at: https://cheremuha.com (Accessed:28.02.2019).[in Russian language]

4. Feuer Z., Weissman Z. (2017). Advantages of digital twin. CAD/CAM/CAE Observer. No5 (113), pp. 50-53.

Статья поступила в редколлегию 13.03.19.
Рецензент: к.т.н., доцент Брянского государственного технического университета Терехов М.В
Статья принята к публикации 27.04.19.

Сведения об авторах

Пономарев Кирилл Сергеевич
аспирант кафедры автоматизированных систем обработки информации и управления,
ФГБОУ ВО Образования «Московский Государственный Технологический Университет «СТАНКИН», Россия, г. Москва
тел.: +7 (909) 666 43 80,
E-mail: sergej.ponomarev@bk.ru

Феофанов Александр Николаевич
профессор кафедры инженерной графики, д-р технических наук ,
ФГБОУ ВО «Московский Государственный Технологический Университет «СТАНКИН», Россия, г. Москва
тел.: +7 (903) 724 24 91,
E-mail: feofanov.fan1@yandex.ru

Гришина Татьяна Геннадьевна
профессор кафедры автоматизированных систем обработки информации и управления, кандидат технических наук
ФГБОУ ВО «Московский Государственный Технологический Университет «СТАНКИН», Россия, г. Москва
тел.: +7 (905) 511 99 37,
E-mail: grishena@mail.ru

Information about authors:

Ponomarev Kirill Sergeevich
Postgraduate of department of automated data processing systems and management, Federal State Educational Institution of Higher Education "Moscow State Technological University " STANKIN ", Russia, Moscow
tel.: 7 (909) 666 43 80,
E-mail: sergej.ponomarev@bk.ru

Feofanov Alexander Nikolaevich
Professor of engineering graphics department, PhD in Engineering,
Federal State Educational Institution of Higher Education "Moscow State Technological University " STANKIN ", Russia, Moscow
tel.: +7 (903) 724 24 91,
E-mail: feofanov.fan1@yandex.ru

Grishina Tatyana Gennadyevna
Professor of department of automated data processing systems and management, Federal State Educational Institution of Higher Education "Moscow State Technological University " STANKIN ", Russia, Moscow
tel.: +7 (905) 511 99 37,
E-mail: grishena@mail.ru

УДК: 004.031
DOI: 10.30987/article_5cf2d1f855d980.40342469

В.Л. Аршинский, Л.В. Аршинский, С.В. Бахвалов

ПРИНЦИПЫ НЕОБХОДИМОСТИ И ДОСТАТОЧНОСТИ В СИСТЕМАТИЗАЦИИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Статья содержит описание подхода к систематизации программного обеспечения (ПО) на основе принципа необходимости. Традиционный подход неявно опирается на принцип достаточности: что может делать программа. Принцип необходимости кладет в основу необходимость программы для решения какой-либо задачи, а также взаимную необходимость ПО в информационно-вычислительной системе. Вводятся три типа необходимости: экзистенциальная, функциональная и целевая со своей внутренней иерархией, что позволяет разделять программные объекты по слоям.

Ключевые слова: *программное обеспечение, вид программного обеспечения, необходимость, ценность, классификация.*

V.L. Arshinskiy, L.V. Arshinskiy, S.V. Bakhvalov

THE PRINCIPLES OF NECESSITY AND SUFFICIENCY TO SYSTEMATIZE SOFTWARE

The article describes the approach to systematization of software based on the principle of necessity. The traditional approach implicitly relies on the principle of sufficiency: what a program can do. The principle of necessity underlies the need for a program to solve any problem, as well as the mutual need for software in the information and computer system. Three types of necessity are introduced: existential, functional and target with its own internal hierarchy, which allows separating program objects by layers.

Keywords: *software, type of software, necessity, value, classification.*

Введение

Одним из небезынтересных вопросов теории программного обеспечения является его классификация. Разделяя многообразие изучаемых объектов на классы, систематизируя их, удается внести порядок в кажущиеся случайными предметы и явления, оказывается возможным разработать методы, применимые к данному классу или группе классов, упорядочить объекты в том или ином отношении, выявить генетические связи, и так далее. Важность и нужность классификации вопросов не вызывает. Классическим примером выступает биологическая классификация.

В сфере программного обеспечения (ПО) классификация присутствует тоже. Однако уже первое знакомство с ним показывает, что единого подхода здесь нет. Одни авторы разбивают его на системное, прикладное и инструментальное, с последующим разбиением на более мелкие классы [1-5], другие – на базовое и специальное, объединяя в базовом системное и инструментальное, а также сервисные программы (антивирусное ПО, утилиты, оболочки ОС) и ПО технического обслуживания, а в специальном – прикладное ПО [5, 6], третьи – базовое, системное, служебное (утилиты) и прикладное ПО [7, 8]. И так далее.

ПО классифицируют по назначению, платформе, способу взаимодействия с аппаратными средствами, способу распространения, переносимости, сфере применения и т.п. Многообразие классификаций. Причем и способы классификации, и наименования классов зачастую разнятся от автора к автору и даже в одних и тех же материалах может излагаться сразу несколько взглядов на классификацию (см. напр. [1, 5]).

Непросто выглядят и таксономические связи, иерархия ПО. В одних случаях разбиение, к примеру, на системное, прикладное и специальное ПО является плоским – все множество компьютерных программ членится как однородное целое. В других – устанавливается приоритетность программ, например, по степени близости к аппаратной части [5, 7].

Создается впечатление, что многие авторы исходят из интуитивных представлений о классификации программных объектов или из сложившихся традиций. Порой нарушается и базовые принципы классификации: один элемент – один класс, принцип полноты разбиения (соразмерность) и т.д. [9]. Все это существенно усложняет вопрос. Не стремясь выяснять правоту тех или иных взглядов, попробуем изучить его с, условно говоря, формально-логических позиций.

1. Необходимость и достаточность

В основу классификации положим не задачи, решаемые той или иной программой, а ее *необходимость* для решения этих задач, а также взаимную необходимость программ внутри информационно-вычислительно системы (ИВС) в целом.

Рассуждая о тех или иных объектах, включая программные объекты, выделяем три аспекта их существования:

1) базовый (экзистенциальный) – объект существует;
2) функциональный – объект (существуя) функционирует, хотя бы частично работоспособен;
3) целевой – объект (функционируя) достигает поставленных перед ним целей.

Вообще говоря, с этих позиций можно рассматривать любые объекты. В том числе, входящие в такое сложное образование, как информационно – вычислительные системы (ИВС): оборудование, программное обеспечение, пользователей ИВС, обслуживающий персонал, разработчиков, документацию и т.д. При этом объекты могут вступать в отношения необходимости и достаточности.

Определение 1. Будем говорить, что объект A *необходим* для объекта B, если существование, функционирование или достижение цели объектом B невозможно в полной мере вне объекта A, когда утрата объекта A либо части его функциональности означает хотя бы частичный ущерб для B.

В этом случае говорим также, что объект A представляет *ценность* для B. Записывать отношение необходимости будем как:

$$\neg A \to \neg B. \quad (1)$$

Необходимость может существовать в любом из трёх вышеуказанных смыслов или их комбинации. Например, существование аппаратной часть ЭВМ необходимо для функционирования и целедостижения любого программного продукта. Там, где это важно разные типы необходимости обозначаем, соответственно, как $\to_e$, $\to_f$, $\to_g$.

Заметим, что между аспектами существования объектов также существует отношение необходимости: 1 необходим для 2; 2 необходим для 3. Это важно.

Определение 2. Будем говорить, что объект A *достаточен* для объекта B, если существование, функционирование или достижение цели объектом A означает также существования, функционирование или достижение цели (хотя бы частично) объектом B. Характер достаточности можно оговаривать отдельно.

В случае достаточности говорим также, что объект A *полезен* для B. Записываем это как:

$$A \to B. \quad (2)$$

Например, использование любой из программ-редакторов текстов достаточно для создания пользователем текстового файла. Соответствующая программа полезна для пользователя.

Сразу заметим, что в общем случае ценность A для B не означает его полезности и наоборот. Например, если в системе имеется две равнозначных по функциональности программы A_1 и A_2, то каждая по отдельности ценности не имеет, так как удаление, снижение или утрата работоспособности, либо не достижение цели программой A_1 при сохранении A_2 (и наоборот) не скажется на B. В то же время каждая из них может обладать полезностью.

Аналогично, если A_1 и A_2 необходимы для B только совместно, полезность каждой отдельной отсутствует.

Рассмотрим, как эти понятия работают при классификации ПО.

2. Систематизация ПО

Основой функционирования ЭВМ является аппаратные средства (АС), которые принимаем во внимание. Также принимаем во внимание пользователя. Это две крайние точки предлагаемой систематизации. Все объекты, участвующие в этом процессе, делим на слои. АС отнесём к слою S_0.

Существование АС является необходимым условием существования и функционирования первого слоя программного обеспечения, который обозначим S_1. Речь идет о программах, обеспечивающих работу периферийных устройств, устройств ввода-вывода информации, программах, необходимых для функционирования ядра ИВС. Например, материнской платы ПК с установленными на ней процессором, памятью и иными основными архитектурными компонентами ЭВМ. Утрата любой из таких программ приведет к частичной или полной неработоспособности ИВС. Эти программы создаются разработчиками соответствующих АС и часто являются уникальными для каждого устройства. При этом АС (физически) могут существовать без программных объектов из S_1, однако S_1 вне АС невозможен.

Отношение необходимости между S_1 и S_0 взаимно. АС необходимо для S_1 экзистенциально, S_1 для АС – функционально. Учитывая, что экзистенциальная необходимость более фундаментальная, считаем, что отношение необходимости между S_0 и S_1 следующее:

$$\neg S_0 \to \neg S_1. \quad (3)$$

При этом программные объекты слоя S_1 необходимы для решения задачи управления отдельными составляющими АС.

Следующий слой ПО – S_2, необходимым для которого является слой S_1. ПО данного слоя применяется для управления комплексом АС как системой. К нему можно отнести операционные системы (ОС) в традиционном понимании этого термина (UNIX, DOS, Windows, Linux и т.п.). Отсутствие ОС не влияет на работоспособность отдельных АС в ИВС. ОС не является необходимым ПО для конкретного узла, но без нее невозможно связать АС в единую систему, способную решать поставленные задачи. ОС необходима для решения задачи управления ЭВМ как системой. Функционально ОС опирается на S_1, обращаясь к нему при работе с памятью, процессором, другими компонентами АС. В каких-то аспектах ОС может работать с АС минуя S_1. Однако полностью от этого слоя отказаться не может. Задавая правило:

Если для некоторого объекта O необходимы объекты слоев i_1 ,… i_k, где $i_1 <\ldots< i_k$,

то O принадлежит слою $i_k + 1$,

относим ОС к слою S_2.

Далее рассмотрим прикладное и инструментальное ПО (ППО и ИПО). Кто-то относят их к разным группам ПО, кто-то объединяет вместе. С точки зрения решаемых задач это

действительно разные классы программных объектов. Посмотрим на них в свете обсуждаемого подхода.

Необходимым условием функционирования ИПО является ОС, т.е. слой S_2. С этих позиций оно относится к слою S_3.

ППО также не способно функционировать без ОС. При этом ИПО не является для него функционально-необходимым. Однако если целью существования ППО является качественное предоставление информационно-вычислительных услуг, то ИПО необходимо для ППО в целевом смысле (качество ППО, написанного с помощью инструментальных средств, полагаем выше написанного без его помощи). Т.е. присутствует третий – целевой тип необходимости. Это дает основания размещать ППО в слое S_4.

Следует заметить, что ОС также могут разрабатываться с помощью ИПО. Т.е. в дополнение к функциональной необходимости

$$\neg\text{ОС} \rightarrow_f \neg\text{ИПО}, \quad (5)$$

существует отношение целевой необходимости:

$$\neg\text{ИПО} \rightarrow_g \neg\text{ОС}. \quad (6)$$

Более приоритетна функциональная необходимость, поэтому относим ИПО к слою, следующему за ОС, т.е. к S_3.

Есть еще одна группа программных объектов, называемых интерпретаторами. Их тоже можно рассматривать как своего рода ИПО. Но в отличие от ИПО, включающих компиляторы, ИПО в форме интерпретаторов функционально необходимо для работы прикладного ПО. Программные объекты, получающееся после компиляции, в соответствующем ИПО не нуждается. Интерпретируемое ПО работает только при наличии интерпретатора. Если инструментальная система интерпретирующего типа (ИПОИ) получена с помощью компилирующего ИПО (ИПОК), можно записать отношение:

$$\neg\text{ИПОК} \rightarrow_g \neg\text{ИПОИ}. \quad (7)$$

В этом же слое находится ППО компилируемого типа (ППОК):

$$\neg\text{ИПОК} \rightarrow_g \neg\text{ППОК}. \quad (8)$$

Т.е. ИПОИ попадает в один слой с ППО, транслированном на основе компиляции – S_4. В свою очередь ППО интерпретируемого типа оказывается в слое S_5:

$$\neg\text{ИПОИ} \rightarrow_f \neg\text{ППОИ}. \quad (9)$$

Отсюда следует вывод, что хотя ППОК и ППОИ выполняют одну и целевую ту же задачу – удовлетворение потребностей пользователя в информационно-вычислительных услугах, структурно они относятся к разным слоям. К слою S_5, в частности, относятся программы-макросы, работающие в составе некоторых офисных пакетов, скрипты и иные аналоги.

Замыкающим компонентом всей этой иерархии выступает пользователь (П). Ему для работы с ЭВМ необходимы программные объекты любого из указанных слоев. Наибольшим из них выступает слой S_5. Исходя из ранее приведенного правила делаем вывод, что пользователь, как объект, относится к слою S_6.

В случае более подробного деления ПО по слоям, пользователя относим к слою S_{N+1}, где N номер наивысшего слоя ПО.

Принцип необходимости можно применить и для классификации ПО по решаемым задачам. Вопрос не праздный, поскольку программные объекты часто классифицируются по их *возможностям*: что может делать та или иная программа. В этом виден *принцип достаточности*: если программная система способна решать некую задачу, её можно зачислить в соответствующий класс. Например редактор изображений можно причислить к классу программ обработки изображений и к классу досуговых программ. Какую-то полезную утилиту, в которую внедрены вредоносные функции, отнести и к сервисным, и к вредоносным программам. Табличный процессор рассматривать как средство работы с электронными таблицами и как вариант СУБД. И так далее. Таких примеров много. Если опираться на принцип достаточности, одна и та же программа может попасть более чем в

одну группу.

Прикладное ПО предназначено для решения задач пользователя, к числу которых чаще всего относятся:

1) выполнение профессиональных функций;
2) досуг;
3) обслуживание ЭВМ и повышение удобства работы на компьютере (утилиты);

Отдельно следует упомянуть вредоносное ПО, группа 4), где пользователями выступают его разработчики.

Как уже говорилось, при систематизации по принципу достаточности классификация размывается. Один и тот же объект может попасть в разные классы. К примеру, Adobe Photoshop может являться и профессиональной и досуговой. Вредоносное ПО становится профессиональным, если с его помощью кем-то достигаются профессиональные цели. Экспертные системы, офисные приложения, СУБД, если они используется в профессиональных целях – профессиональное ПО, однако какие-то из этих продуктов могут использоваться в целях досуга, или для иных задач. Классификация по необходимости выглядит более последовательной. Например, по необходимости (ценности) для осуществления конкретных видов деятельности (обработка изображений, обработка текстов, организованное хранение данных, работа с числовыми таблицами, и т.п.). Так, если программа А необходима пользователю (представляет ценность) для решения его профессиональных задач, она относится к группе 1). Если для отдыха и досуга вне профессиональных обязанностей – к группе 2). Если без неё снижается качество, удобство работы на компьютере – к группе 3). Наконец, если она необходима для несанкционированного вмешательства в работу ЭВМ – к группе 4).

Принцип необходимости кладет в основу те функции, для которых программа необходим пользователю, что она *необходимо должна делать*. Тогда табличный процессор – это средство работы с электронными таблицами, утилита с заложенными в нее вредоносными функциями – вредоносная программа (основной пользователь – получатель несанкционированных возможностей), программа обработки изображений, необходимая для решения именно этих задач, – редактор изображений. И так далее. Это позволяет уточнять систематизацию в каждом слое, вводя в них классы ПО, например, деля драйверы по обслуживаемым устройствам, ОС по аппаратным платформам, прикладные программы по задачам, для решения которых они необходимы. Для этого следует разделять главные и второстепенные функции ПО, выполняя классификацию по главным (необходимым) задачам. Классификация по достаточным (что может делать программа) размывает границы классов. Более формально, если декларируются отношения:

$$\begin{aligned} O_1 &\to F\&F_1; \\ O_2 &\to F\&F_2, \end{aligned} \tag{10}$$

где O_i – программные объекты, а F и F_i – реализуемая объектами функциональность, и

$$\begin{aligned} \neg O_1 &\to \neg F; \\ \neg O_2 &\to \neg F, \end{aligned} \tag{11}$$

то объекты O_1 и O_2 объявляются принадлежащими классу, связанному с функциональностью F, если F, F_1, F_2 – возможности, реализуемые программой, а F – возможность, которая пользователю необходима.

Обычно прикладные программы не зависят друг от друга, не представляют друг для друга ценности и могут быть отнесены к одному уровню иерархии. Если же между какой-то пары программ такое отношение возникает, для них может быть введена локальная иерархия. Считаем, что программа A и программа B, установленные в конкретной ИВС, находятся на одном уровне классификации, если для них не реализуется принцип необходимости (т.е. ни одна из них не является необходимой для другой), либо они являются взаимно ценными друг для друга.

Несколько слов нужно сказать о распространенной сегодня тенденции использования виртуальных машин. Отдельная виртуальная машина – это самостоятельный объект, в котором существуют те же слои рассматриваемых объектов, что и в реальной, но только в «гостевом» варианте. Однако в расширенном контексте, включающем реальные АС, хост и гипервизор, последний занимает слой S_4 (полагаем, что он разрабатывался с помощью инструментального слоя S_3), а значит слои «гостевой» машины, включая виртуальный вариант слоя S_0, должны нумероваться как S_{4+1}, S_{4+2}, и так далее.

3. Сетевое ПО

Отдельно следует обсудить систематизацию сетевого ПО. Его особенностью, как и особенностью сетевого оборудования, является то, что «нулевым слоем» здесь оказываются локальные ЭВМ, объединяемые сетью. Они являются необходимым элементом всей инфраструктуры. Тогда слоем S_1 выступает сетевое оборудование, которое, в свою очередь, можно рассматривать как необходимое условие функционирования слоя S_2 – программных объектов, непосредственно управляющих аппаратными средствами. Следующий уровень – S_3 занимает сетевая ОС, если она установлена поверх локальной ОС, или соответствующие компоненты локальной ОС, когда локальная ОС изначально является сетевой. Слой S_4 – программная реализация сетевых интерфейсов и протоколов (для упрощения систему стеков не рассматриваем). Слой S_5 образован прикладным сетевым ПО, включая сетевые утилиты, открытое ПО и в целом программы, работающие через сеть, программы-браузеры. Наконец, в слой S_6 можно вынести ПО, для функционирования которого необходимы программы-браузеры по аналогии с программами-макросами, работающими поверх некоторых офисных программ. Пользователя при таком расслоении относим к слою S_7.

Прикладное сетевое ПО, как и в случае изолированных ЭВМ, делим на классы согласно принципу необходимости с точки зрения пользователя.

Заключение

В работе представлен возможный подход к систематизации (включая классификацию) современного ПО. Большинство авторов при систематизации неявно исходят из принципа достаточности: программа зачисляется в тот или иной класс исходя из того, что она может делать, какие задачи способна решать. Это размывает границы классов, поскольку один и тот же программный объект иногда соответствует различным задачам. В работе предлагается исходить из принципа необходимости: программа относится к тому классу, какие задачи она необходимо должна решать. Тогда второстепенные возможности ПО отходят на второй план и при классификации не учитываются. Также принимается во внимание отношение необходимости между самими программными объектами. Это позволяет систематизировать программные объекты, «расслаивая» ПО по принципу взаимной необходимости. Причем вводятся разные виды необходимости: экзистенциальный, функциональный и целевой, с иерархией между ними. Последнее позволяет сохранить иерархичность по необходимости, когда программные объекты взаимно необходимы друг для друга, но в разном смысле. В результате выстраивается иерархия внутри ПО похожая на известную: аппаратная часть, системное ПО, прикладное ПО, но со своими особенностями. В частности, инструментальное ПО, предназначенное для создания программных объектов, расщепляется на два слоя: инструменты для создания пользовательских программ компилируемого типа и инструменты для создания программ интерпретируемого типа. Соответственно расслаивается и прикладное ПО. В целом принцип необходимости следует рассматривать как подход к классификации, позволяющий внести определенный порядок в вопрос систематизации ПО и его деления на классы.

Список литературы:

1. Алексеев Е.Г., Богатырев С.Д. Информатика. Мультимедийный электронный учебник [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://inf.e-alekseev.ru/text/Klassif_po.html.
2. Классификация программного обеспечения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://mirznanii.com/a/308713/klassifikatsiya-programmnogo-obespecheniya-2.
3. Программное обеспечение ПК. Классификация ПО [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://mylektsii.ru/13-66978.html
4. Классификация программного обеспечения по назначению [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://wd-x.ru/klassifikaciya-programmnogo-obespecheniya-po-naznacheniyu.
5. Классификация программного обеспечения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.intuit.ru/studies/courses/3632/874/lecture/14291
6. Классификация программного обеспечения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://pandia.ru/text/78/325/2652.php
7. Классификация программного обеспечения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://ggf.tsu.ru/content/faculty/structure/chair/meteorology/publications/Прикладные_пакеты_программ_в_метеорологии/text/P1-1.htm.
8. Классификация программного обеспечения. Виды программного обеспечения и их характеристики [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.altstu.ru/media/f/Tema-6-Klassifikaciya-PO.pdf.
9. Грядовой Д.И. Логика: структурированный учебник (для вузов). 2-е изд., перераб. и доп. М.: ЮНИТИ-ДИАНА, 2003. 271 с.

References:

1. Alekseyev E.G.. Bogatyrev S.D. Informatika. Multimediynyy elektronnyy uchebnik [Multimedia electronic textbook]. – http://inf.e-alekseev.ru/text/Klassif_po.html. (in Russian)
2. Klassifikatsiya programmnogo obespecheniya [Classification of Software]. http://mirznanii.com/a/308713/ klassifikatsiya-programmnogo-obespecheniya-2. (in Russian)
3. Programmnoye obespecheniye PK. Klassifikatsiya PO [PC software. Classification of software]. – http://mylektsii.ru/13-66978.html. (in Russian)
4. Klassifikatsiya programmnogo obespecheniya po naznacheniyu [Software classification by purpose]. – https://wd-x.ru/klassifikaciya-programmnogo-obespecheniya-po-naznacheniyu. (in Russian)
5. Klassifikatsiya programmnogo obespecheniya [Software classification]. – http://www.intuit.ru/studies/courses/3632/874/lecture/ 14291. (in Russian)
6. Klassifikatsiya programmnogo obespecheniya [Software classification]. – https://pandia.ru/text/78/325/2652.php. (in Russian).
7. Klassifikatsiya programmnogo obespecheniya [Software classification]. – http://ggf.tsu.ru/content/faculty/structure/chair/meteorology/publications/text/P1-1.htm. (in Russian)
8. Klassifikatsiya programmnogo obespecheniya. Vidy programmnogo obespecheniya i ikh kharakteristiki [Software classification. Types of software and their characteristics] – https://www.altstu.ru/media/f/Tema-6-Klassifikaciya-PO.pdf. (in Russian)
9. Gryadovoy D.I. Logika: strukturirovannyy uchebnik (dlya vuzov) [Logic: structured textbook (for universities)]. 2-e izd.. pererab. i dop. M.: YuNITI-DIANA. 2003. 271 p. (in Russian)

Статья поступила в редколлегию 18.03.19.
Рецензент: к.т.н., доцент Брянского государственного технического университета Леонов Е.А.
Статья принята к публикации 30.04.19.

Сведения об авторах

Аршинский Вадим Леонидович
к.т.н., доцент кафедры автоматизированных систем Иркутского национального исследовательского технического университета,
тел.: +7 (3952) 40 15 64,
E-mail: pochemzria@mail.ru

Аршинский Леонид Вадимович
д.т.н., доцент, заведующий кафедрой информационных систем и защиты информации Иркутского государственного университета путей сообщения,
тел.: +7 (3952) 63 83 59,
E-mail: larsh@mail.ru

Бахвалов Сергей Владимирович
к.т.н., доцент, заведующий кафедрой автоматизированных систем Иркутского национального исследовательского технического университета,
тел.: +7 (3952) 40 51 65,
E-mail: bsv@istu.edu

Information about authors:

Arshinskiy Vadim Leonidovich
PhD., Associate Professor of the Department of Automated Systems of the Irkutsk National Research Technical University
tel.: +7 (3952) 40 15 64,
E-mail: pochemzria@mail.ru

Arshinskiy Leonid Vadimovich
Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Information Systems and Information Security of the Irkutsk State Transport University
tel.: +7 (3952) 63 83 59,
E-mail: larsh@mail.ru

Bakhvalov Sergey Vladimirovich
PhD, Head of the Department of Automated Systems of the Irkutsk National Research Technical University,
tel.: +7 (3952) 40 51 65,
E-mail: bsv@istu.edu

УДК: 004.056
DOI: 10.30987/article_5cf2d22c9dcd72.20436206

А.П. Горлов, М.Ю. Рытов, Д.А. Лысов

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫХ СРЕДСТВ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ

В статье рассматривается процесс автоматизации оценки эффективности программно-аппаратных средств защиты информации, путем создания автоматизированной системы. Основными функциями предлагаемой системы являются: проведение аудита информационной безопасности, формирование модели угроз ИБ, формирование рекомендаций по созданию программно-аппаратной системы защиты информации, формирование организационно-технической документации.

Ключевые слова: *информационная безопасность, защита информации, программно-аппаратная защита, программно-аппаратные средства защиты информации.*

A.P. Gorlov, M.Yu. Rytov, D.A. Lysov

AUTOMATED SYSTEM FOR ESTIMATION-EFFICIENCYSOFTWARE MEANS OF IN-FORMATION PROTECTION

The article discusses the process of automating the assessment of the effectiveness of software and hardware information protection by creating an automated system. The main functions of the proposed system are: conducting an information security audit, forming an information security threat model, making recommendations for creating a software and hardware information protection system, and creating organizational and technical documentation.

Keywords: *information security, information protection, software and hardware protection, software and hardware information protection.*

Введение

На сегодняшний день проблема защиты конфиденциальной информации стоит особенно остро. Ущерб от реализации угроз компьютерным системам и обрабатываемой в них конфиденциальной информации превышает миллионы рублей.

По статистике за 2018 год на территории РФ зафиксировано около 300 тысяч преступлений в сфере информационной безопасности. К этим преступлениям относятся несанкционированный доступ к конфиденциальной информации, утечка и разглашение атрибутов доступа к подсистемам компьютерных систем, создание, использование или распространение вредоносных программ для ЭВМ или машинных носителей с такими программами.

Компьютерная система – любое устройство или группа взаимосвязанных, или смежных устройств, одно или более из которых, действуя в соответствии с программой, осуществляет автоматизированную обработку данных.

Объектом информатизации называется совокупность информационных ресурсов, средств и систем обработки информации, используемых в соответствии с заданной информационной технологией, а также средств их обеспечения, помещений или объектов, в которых эти средства и системы установлены, или помещений и объектов, предназначенных для ведений конфиденциальных переговоров.

Отсутствие на объектах информатизации программно-аппаратных систем защиты информации приводит к утечке конфиденциальной информации, так как разработка и внедрение таких систем является достаточно сложной и затратной процедурой. В общем случае на компьютерную систему влияет ряд факторов, который можно условно разделить

на две категории: требования законодательства и стандартов в области защиты информации, а также различные угрозы информационной безопасности. Автоматизированная система оценки эффективности программно-аппаратных средств защиты информации позволит привести КС в соответствие установленным требованиям, противостоять актуальным угрозам, снизить трудоемкость работ, сэкономить время и значительно сократить материальные затраты на проведение аудита и разработку программно-аппаратных систем защиты информации.

1. Постановка задачи

Ввиду этого разработка системы автоматизированной оценки эффективности программно-аппаратных средств защиты представляется актуальной. На данный момент автоматизированная оценка уровня информационной безопасности производится исключительно по стандартам ISO, однако в РФ более распространена организационно-распорядительная документация.

В предлагаемом подходе в основу положена оценка защищенности объекта информатизации согласно положениям законодательной базы РФ, требованиям государственных стандартов, а также проверка наличия организационно-технической документации, регламентирующей защиту компьютерных систем.

Основной задачей, разрабатываемой автоматизированной системы является выявление уязвимостей существующих систем обработки и защиты информации. В качестве входных данных используются данные о компьютерных системах. Данные вводятся на основе специально разработанных опросных анкет.

2. Решение

Алгоритм работы АС:

1. Ввод исходных данных.
2. Формирование информационной модели компьютерной системы, определение целей и задач по защите информации.
3. Оценка состояния защищенности объекта информатизации.
4. Формирование модели угроз информационной безопасности.
5. Формирование рекомендаций по совершенствованию системы защиты информации.
6. Формирование организационно-технической документации.

Преимуществом данной методики является возможность снизить трудоемкость работ, сократить временные и материальные затраты на проведение оценки уровня информационной безопасности, повысить качество проектных решений.

Структурно-функциональная схема, разработанной автоматизированной системы представлена на рис. 1.

Ввод исходных данных представляет собой заполнение опросных анкет, которые позволят выявить вид обрабатываемой информации, существующие программно-аппаратные средства защиты информации, угрозы ИБ, уязвимости системы защиты информации, а также прочие данные позволяющие составить информационную модель объекта информатизации.

Следующим этапом является оценка состояния защищенности компьютерной системы. Выделяется 3 основных направления оценки защищенности:

1. Оценка на соответствие требованиям стандартов (ГОСТ, СТР-К, ISO).
2. Определение наличия программно-аппаратных средств защиты информации на объекте информатизации.
3. Выявление организационно-технической документации, регламентирующей защищенную обработку конфиденциальной информации.

По результатам данного этапа формируется отчет о состоянии защищенности компьютерной системы.

На этапе формирования модели угроз информационной безопасности формируется описание системы обработки информации, выявляются пользователи данной системы, определяется уровень исходной защищенности, степень актуальности угроз, рассчитывается вероятность реализации угроз.

Актуальность рисков определяется исходя из типа обрабатываемой информации, объема обрабатываемых в системе данных, структуры информационной системы, режиму обработки данных и т.д.

Рис. 1. Структурно-функциональная схема автоматизированной системы

Однако для того чтобы определить актуальность угроз для данного объекта информатизации целесообразно выделить критерии актуальности каждой конкретной угрозы. Так для угрозы сетевой атаки можно выделить такие критерии актуальности как наличие доступа к глобальной сети, наличие в структуре локальной вычислительной сети средств межсетевого экранирования, антивирусной защиты и т.д.

Основываясь на выделенных критериях актуальности возможно формализовать расчет вероятности реализации угроз:

$$P(i) = \frac{\sum f(j)}{N} * 100\%$$

$P(i)$ – вероятность реализации i-ой угрозы, $f(j)$ – функция расчета влияния j-го критерия на защищенность системы от i-ой угрозы, N – кол-во факторов.

На данном этапе результатом работы является модель угроз на основании которой можно выделить оптимальные средства защиты от наиболее актуальных и вероятных угроз.

Для обеспечения защиты от таких угроз предусмотрен процесс выборки программных

и аппаратных средств защиты информации из базы данных. Выборка производится исходя из стоимости средств защиты и оптимальных технических характеристик необходимых для обеспечения требуемого уровня защищенности.

Формализацию процесса формирования модели угроз можно представить в виде кортежа:

$$M = < Di, T, Th, Ka, P >,$$

где D_i– уровень исходной защищенности, T – тип системы обработки информации, Th – угрозы информационной безопасности, K_a– критерии актуальности угроз, P – вероятность реализации угроз

Следующим этапом является формирование рекомендаций по совершенствованию системы защиты информации. Рекомендации разделяются на 4 основных раздела:

1. Рекомендации по антивирусной защите информации.
2. Рекомендации по защите информации от несанкционированного доступа (НСД).
3. Рекомендации по применению средств межсетевого экранирования.
4. Рекомендации по применению средств обнаружения вторжений.

По каждому разделу приводится ряд мер, выполнение которых необходимо для защиты от выявленных угроз. Так же на данном этапе происходит подбор оптимальных средств программно-аппаратной защиты информации исходя из допустимой стоимости и набора необходимых характеристик.

Заключительным этапом является формирование организационно-технической документации, регламентирующей защиту конфиденциальной информации.

На данном этапе производится оценка наличия организационно-технической документации на объекте, выявляются недостающие документы, если необходимо, производится сбор дополнительных данных необходимых для формирования дополнительных документов.

В качестве выходных данных по результатам работы данного блока является комплект организационно-технической документации, регламентирующей эксплуатацию программно-аппаратных средств защиты.

Результаты работы автоматизированной системы представлены на рис.2.

Рис.2. Результаты работы АС

Заключительным этапом является формирование организационно-технической документации, регламентирующей защиту конфиденциальной информации.

На данном этапе производится оценка наличия организационно-технической документации на объекте, выявляются недостающие документы, если необходимо, производится сбор дополнительных данных необходимых для формирования дополнительных документов.

В качестве выходных данных по результатам работы данного блока является комплект организационно-технической документации, регламентирующей эксплуатацию программно-аппаратных средств защиты.

Результаты работы автоматизированной системы представлены на рис.2.

В результате проведенного вычислительного и имитационного моделирования полечено 255 вариантов построения программно-аппаратной системы защиты информации (рис. 3).

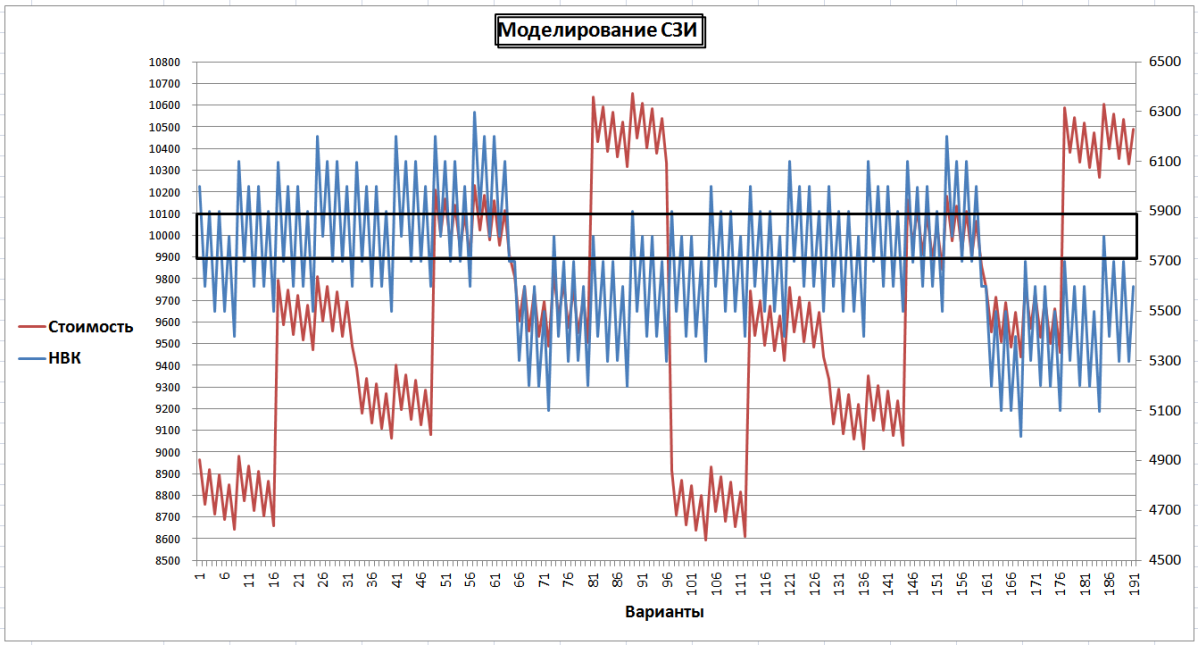


Рис. 3. Результаты имитационного моделирования

Учитывая финансовую целесообразность проводимых мероприятий, был выбраны 5 наиболее эффективных вариантов построения программно-аппаратной системы защиты информации на основе разработанного критерия эффективности (таблица 1).

Таблица 1. Варианты построения ПАЗИ

Номер варианта защиты	Накопленный весовой коэффициент (W)	Стоимость (C)	Набор средств защиты
№50	5799,763	10006	$V_1, V_4, V_7, V_8, V_{10}, V_{12}, V_{15}, V_{16}$
№52	5698,114	9961	$V_1, V_4, V_7, V_8, V_{10}, V_{13}, V_{15}, V_{16}$
№54	5698,231	9936	$V_1, V_4, V_7, V_8, V_{11}, V_{12}, V_{15}, V_{16}$
№146	5696,731	9957	$V_2, V_5, V_7, V_8, V_{10}, V_{12}, V_{15}, V_{16}$
№158	5699,865	9904	$V_2, V4, V_7, V_9, V_{11}, V_{12}, V_{15}, V_{16}$

Было произведено моделирование работы выбранных вариантов построения ПАЗИ для 100 (рис. 4) и 10000 (рис.5) тактов работы построенной математической модели на основе раскрашенных сетей Петри, в результате которого было определено что значение накопленного весового коэффициента меняется с течением времени, что свидетельствует об адекватности модели, а также был определен наиболее эффективный набор технических средств защиты информации.

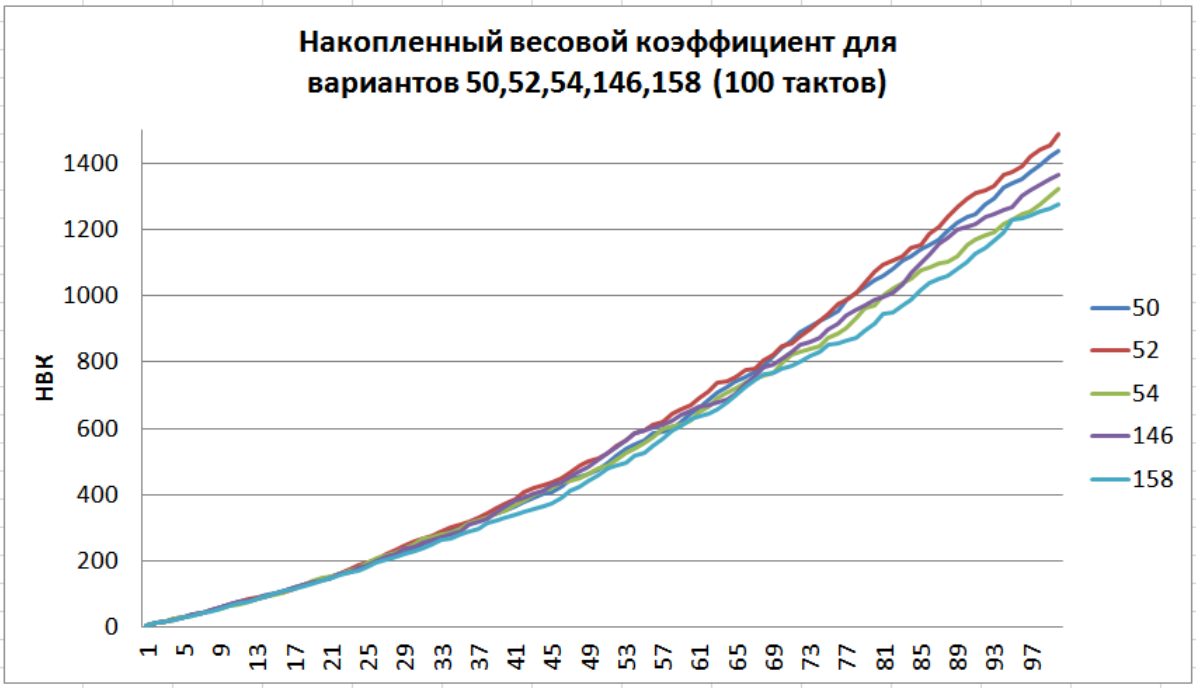


Рис. 4. Накопленный весовой коэффициент для вариантов защиты № 50, 52, 54, 146, 158 для 100 тактов

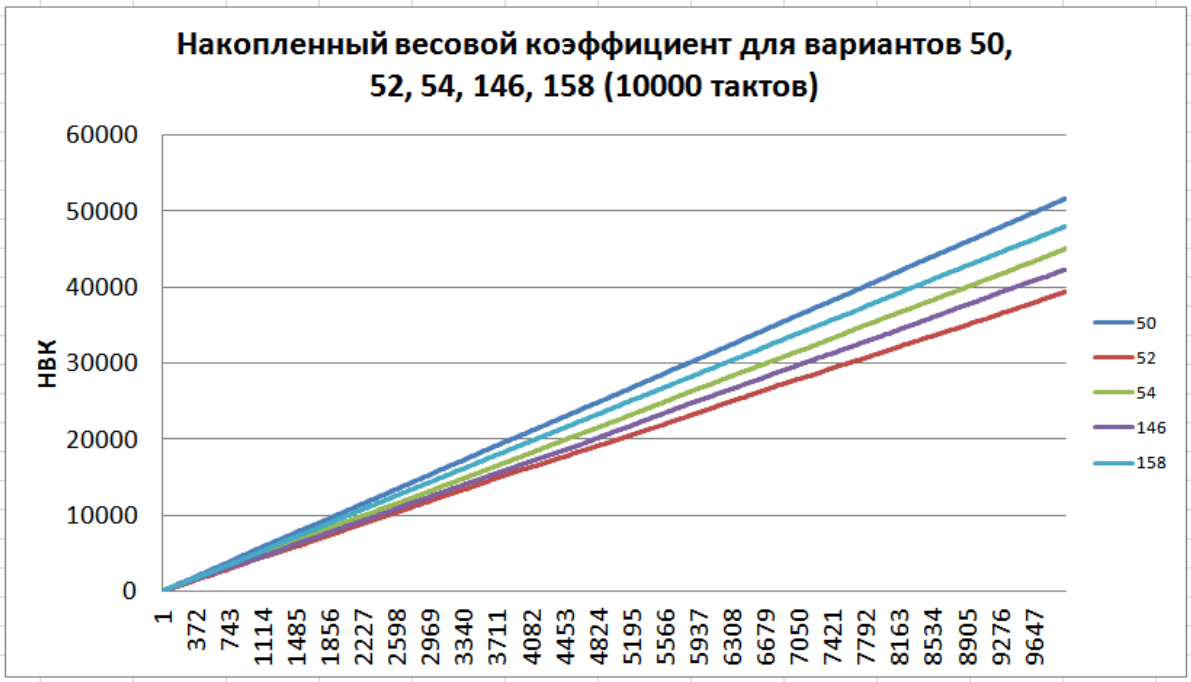


Рис. 5. Накопленный весовой коэффициент для вариантов защиты № 50, 52, 54, 146, 158 для 10000 тактов

Заключение

Таким образом разработанная автоматизированная система оценки эффективности программно-аппаратных средств защиты информации позволяет в автоматизированном

режиме построить модель угроз информационной безопасности, сформировать организационно-техническую документацию регламентирующую защиту конфиденциальной информации, а также сформировать рекомендации по усовершенствованию программно-аппаратной системы защиты информации. Применение данной системы позволит значительно сократить временные и материальные затраты на проведение аудита информационной безопасности и разработку дополнительных мер защиты информациипо сравнению с неавтоматизированным проектированием программно-аппаратной системы защиты информации.

Список литературы:

1. Аверченков, В.И. Автоматизация защиты персональных данных в ВУЗе / В.И. Аверченков, М.Ю. Рытов, В.А. Шкаберин, О.М. Голембиовская //Известия Международной ассоциации славянских вузов, № 1, 2011 г. – с. 126–134.
2. Иванько, А.Ф. Автоматизация проектирования систем и средств управления: учебное пособие / А.Ф. Иванько, М.А. Иванько, В.Г. Сидоренко, Г.Б. Фалк. – М.: Изд–во МГУП, 2001. – 148 с.
3. Андрианов, В.В. Обеспечение информационной безопасности бизнеса / В.В. Андрианов, С.Л.Зефиров, В.Б.Голованов, Н.А. Голдуев под ред. А.П. Курило – М.: Альпина Паблишерз, 2011.
4. Базовая модель угроз безопасности персональных данных при их обработке в информационных системах персональных данных (выписка), ФСТЭК,2008
5. Рытов, М.Ю. Автоматизация процесса оценки состояния защищенности объекта информатизации с использованием раскрашенных сетей Петри от утечки информации/ М.Ю. Рытов, А.П. Горлов, В.Т. Еременко// Информация и безопасность. – 2015. – №1. – С. 123–126.
6. Климов, С.М. Противодействие компьютерным атакам. Технологические основы: электронное учебное издание./ А.В. Астрахов, С.М. Климов, М.П. Сычев // – М.: МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2013. – 108 с.
7. Лысов Д.А . Авторизация пользователей на основе комплексного применения методов распознавания лиц [Текст + Электронный ресурс] / Рытов М.Ю., Шкаберин В.А., Лысов Д.А., Горлов А.П. // Информация и безопасность №1, 2016.-с. 106-109;
8. Лысов Д.А. Автоматизация процесса оценки эффективности комплексных систем защиты информации промышленных предприятий при одновременной реализации угроз [Текст + Электронный ресурс] / Рытов М.Ю., Горлов А.П., Лысов Д.А., Вестник Брянского государственного технического университета №4, 2016.-с. 199-206
9. Лысов Д.А. Методические аспекты аутентификации пользователей СКУД посредством применения технологий распознавания лиц [Текст + Электронный ресурс] /Голембиовская О.М., Горлов А.П., Лексиков Е.В., Лысов Д.А., Рытов М.Ю.// Информационные системы и технологии №6(110), 2018.-с. 116-121;
10. Ляско, В.И. Стратегическое планирование развития предприятия: учебное пособие для вузов / В.И. Ляско // – М.: Издательство «Экзамен», серия

References:

1. Averchenkov, V.I. Automation of personal data protection in the university / V.I. Averchenkov, M.Yu. Rytov, V.A. Shkaberin, OM Golembiovskaya // Proceedings of the International Association of Slavic Higher Education Institutions, № 1, 2011 - p. 126-134;
2. Ivanko, A.F. Automation of systems design and management tools: a tutorial / A.F. Ivanko, M.A. Ivanko, V.G. Sidorenko, G.B. Falk - M .: Publishing House of MGUP, 2001. - 148 p;
3. Andrianov, V.V. Ensuring information security of business / V.V. Andrianov, S.L. Zefirov, V.B.Golovanov, N.A. Golduev ed. A.P. Kurylo - M .: Alpina Publishers, 2011;
4. The basic model of threats to the security of personal data when they are processed in personal data information systems (extract), FSTEC, 2008;

5. Rytov, M.Yu. Automating the process of assessing the state of security of an informatization object using colored Petri nets from information leakage / M.Yu. Rytov, A.P. Gorlov, V.T. Eremenko // Information and Security. - 2015. - №1. - pp. 123–126;

6. Klimov, S.M. Countering computer attacks. Technological background: electronic educational edition. / A.V. Astrakh, S.M. Klimov, M.P. Sychev // - M .: MSTU named after NE Bauman, 2013. - 108 p;
7. Lysov D.A. Authorization of users on the basis of the integrated application of the methods of face recognition [Text + Electronic Resource] / Rytov M.Yu., Shkaberin VA, Lysov DA, Gorlov AP // Information and security №1, 2016.- p. 106-109;
8. Lysov D.A. Automating the process of evaluating the effectiveness of integrated information security systems for industrial enterprises while simultaneously implementing threats [Text + Electronic Resource] / Rytov M.Yu., Gorlov AP, Lysov DA, Bulletin of Bryansk State Technical University №4, 2016 .-with. 199-206;
9. Lysov D.A. Methodical aspects of authentication of access control systems through the use of facial recognition technologies [Text + Electronic Resource] / Golembiovskaya OM, Gorlov AP, Leksikov EV, Lysov DA, Rytov M.Yu.// Information systems and technologies №6 (110), 2018.- p. 116-121;

10. Lyasko, V.I. Strategic development planning of the enterprise: a textbook for universities / V.I. Lyas-ko // - Moscow: Examination Publishing House, “Study Guide

«Учебное пособие для вузов»), 2005. – 288 с.
11. Нестерук, Г.Ф. К разработке модели адаптивной защиты информации / Г.Ф. Нестерук, А.А. Молдовян, Л.Г. Осовецкий, Ф.Г. Нестерук, Р.Ш. Фархутдинов // Вопросы защиты информации. 2005, № 3. С. 11 – 16.

for Universities" series), 2005. - 288 p.;
11. Nesteruk, G.F. On the development of a model of adaptive information security / G.F. Nesteruk, A.A. Moldovyan, L.G. Osovetsky, F.G. Nesteruk, R.Sh. Farkhutdinov // Information Security Issues. 2005, No. 3. P. 11 - 16..

Статья поступила в редколлегию 03.04.19.
Рецензент: к.т.н., доцент Брянского государственного технического университета Дергачев К.В.
Статья принята к публикации 30.04.19.

Сведения об авторах:

Горлов Алексей Петрович
Доцент кафедры «Системы информационной безопасности» ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», кандидат технических наук
тел.: +7 (980) 302 53 80
E-mail: apgorlov@gmail.com

Рытов Михаил Юрьевич
Заведующий кафедрой «Системы информационной безопасности» ФГБОУ ВО «Брянский государствен-ный технический университет», доцент, кандидат технических наук
тел.: +7 (910) 330 02 37
E-mail: rmy@tu-bryansk.ru

Лысов Дмитрий Андреевич
Ассистент кафедры Системы информационной безопасности» ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»
тел.: +7 (910) 330 54 33
E-mail: lysovdmitriia@gmail.com

Information about authors:

Gorlov Alexey Petrovich
Associate Professor of the Department of Information Security Systems at FSBEI HE "Bryansk State Technical University", Candidate of Technical Sciences
tel.: +7 (980) 302 53 80
E-mail: apgorlov@gmail.com

Rytov Mikhail Yurievich
Head of the Department of Information Security Systems at FSBEI HE "Bryansk State Technical University", Associate Pro-fessor, Candidate of Technical Sciences
tel.: +7 (910) 330 02 37
E-mail: rmy@tu-bryansk.ru

Lysov Dmitry Andreevich
Assistant of the Department of Information Security Systems at FSBEI HE "Bryansk State Technical University"
tel.: +7 (910) 330 54 33
E-mail: lysovdmitriia@gmail.com

УДК: 004.9:378.1:519.854.33
DOI: 10.30987/article_5cf2d29cd1f178.93000301

С.С. Игнатьев, А.В. Аверченков

РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСА ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ ВОДОПОДГОТОВКИ ПЛАВАТЕЛЬНЫХ БАССЕЙНОВ

В статье рассмотрена проблема автоматизации проектирования плавательных бассейнов. Приведена функционирующая разработка для решения расчета и подбора необходимого оборудования для плавательных бассейнов, а также автоматизированный модуль для проектирования геометрической 3D модели чаши бассейна.

Ключевые слова: *автоматизация, проектирование, программное обеспечение, программирование.*

S.S. Ignatev, A.V.Averchenkov

DEVELOPMENT OF SYSTEM FOR AUTOMATION OF PROCESS OF DESIGNING OF WATER TREATMENT SYSTEMS FOR SWIMMING POOLS

The article deals with the problem of automation of design of swimming pools. The functioning development for the decision of calculation and selection of the necessary equipment for swimming pools, and the automated module for design of geometrical 3D model of a bowl of the pool is resulted.

Keywords: *automation, design, software, programming.*

Введение

Проблема существенного улучшения качества эксплуатации плавательных бассейнов, повышения их надежности, долговечности и экологической безопасности может быть успешно решена при условии совершенствования технологических характеристик и создания инструментальных методов контроля. Современные плавательные бассейны являются сложными техническими сооружениями в технологическую схему которых входят различные приборы, позволяющие контролировать их рабочие характеристики в процессе эксплуатации.

Наличие инструмента, позволяющего создавать пользовательские программные модули, интегрированные с базовым продуктом, становится все более неотъемлемым условием, выдвигаемым со стороны пользователей САПР.

1. Основные исходные данные при проектировании бассейнов

Исходными данными для проектирования служат архитектурные чертежи и исходные данные, выданные заказчиком, такие как:

- тип бассейна (детский, оздоровительный, спортивный, гидромассажная ванна),
- желаемые размеры бассейна,
- аксессуары для чаши бассейна (светильники, подводные динамики, лестницы, разделительные дорожки, материалы форсунок и облицовочного материала),
- предпочтения по качеству водоподготовки (время рециркуляции воды, время опорожнения чаши бассейна).

На основе этих данных для заказчика составляется коммерческое предложение, которое в дальнейшем становится основным источником исходных данных для последующего проектирования.

2. Методика расчёта основных параметров системы водоподготовки

Опишем алгоритм расчетного модуля для основного оборудования системы водоподготовки, представленный в виде блок-схемы, наглядно иллюстрирующий этапы проведения расчетов (рис. 1).

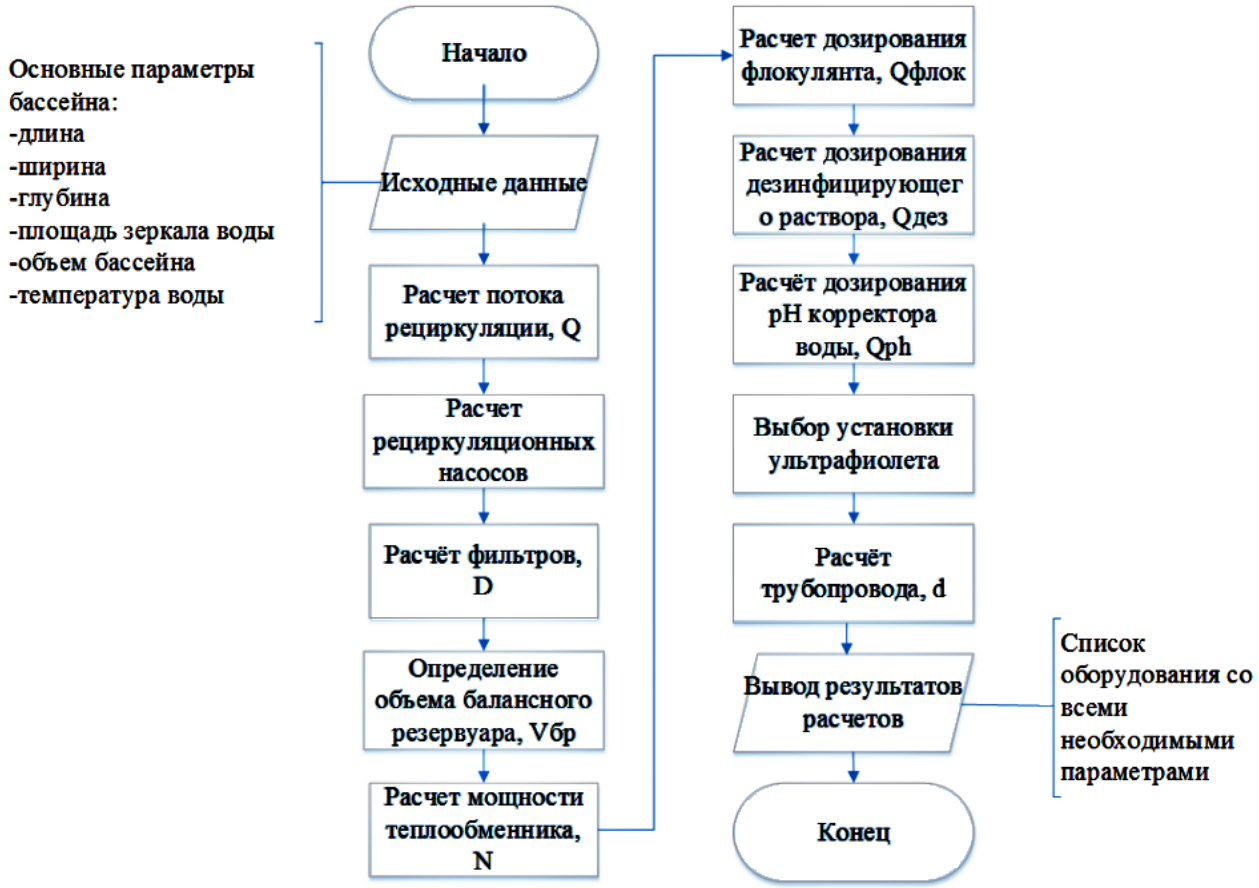


Рис.1. Алгоритм проведения расчетов основных параметров бассейна и системы водоподготовки

3. Определение основных задач, решаемых САПР водоподготовки плавательных бассейнов

Для повышения эффективности и упрощения работ по созданию проекта бассейна с системой водоподготовки предполагается разработка автоматизированной системы формирования рабочей документации.

Автоматизированная система должна решать следующие задачи:

1) расчет основных параметров и выбор оборудования для водоподготовки;
2) проектирование геометрической 3D-модели бассейна с системой водоподготовки;
3) разработка чертежей и технических заданий по созданным 3D-моделям;
4) создание спецификации;
5) формирование окончательного комплекта рабочей документации.

3.1 Общая структурная схема САПР водоподготовки плавательных бассейнов

Прежде чем приступить к разработке САПР водоподготовки плавательных бассейнов, необходимо было понять, как она должна выглядеть в перспективе. Для этого разработана общая структурная схема данной САПР (рис. 2).

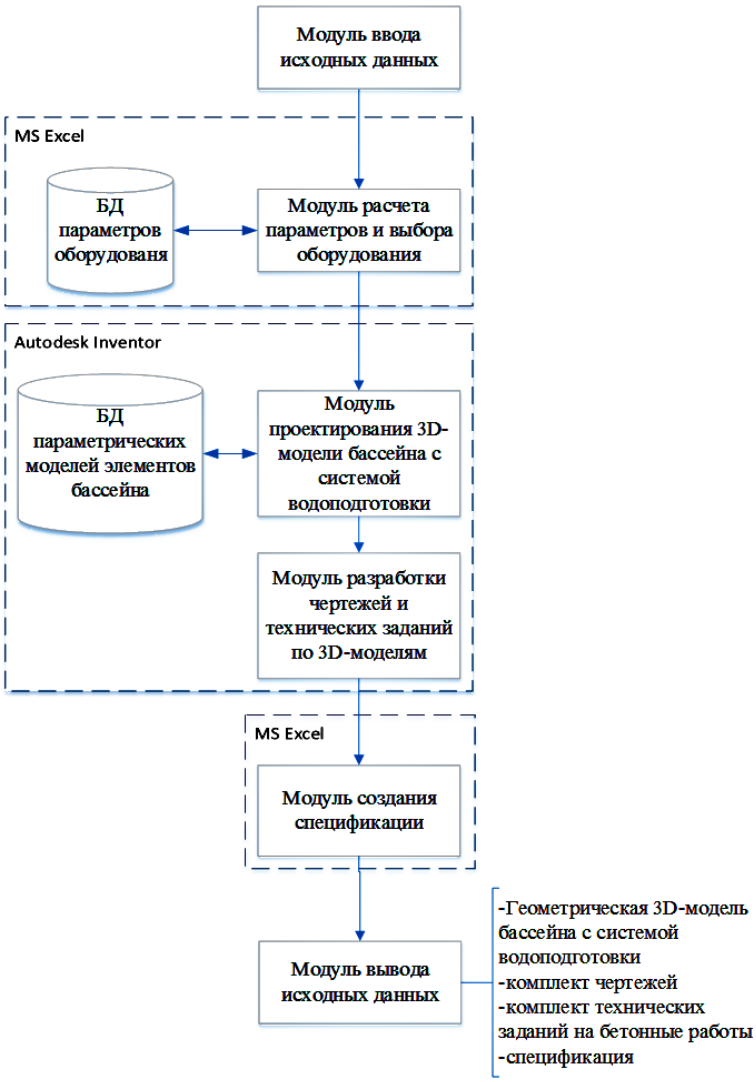


Рис.2. Общая структурная схема специализированной САПР водоподготовки плавательных бассейнов

4. Блок-схема проектирования бассейна с системой водоподготовки

Опишем алгоритм модуля проектирования, представленный в виде блок-схемы, наглядно иллюстрирующий этапы построения геометрической 3D-модели бассейна с системой водоподготовки (рис. 3).

5. Разработка базового лингвистического обеспечения системы автоматизированного проектирования водоподготовки плавательных бассейнов

Базовое лингвистическое обеспечение является языковой основной программного обеспечения. В рамках разработки системы автоматизированного проектирования водоподготовки плавательных бассейнов были использованы два типа языков высокого уровня, или проблемно-ориентированных языков.

Первый – компилируемый статически типизированный язык программирования общего назначения C#.

Второй – язык SQL. SQL – формальный непроцедурный язык программирования, применяемый для создания, модификации и управления данными в произвольной реляционной базе данных, управляемой соответствующей системой управления базами данных [1].

Базовое лингвистическое обеспечение, представленное в виде выбранных языков, может быть использовано для реализации расчетных алгоритмов, структур данных и т.д.

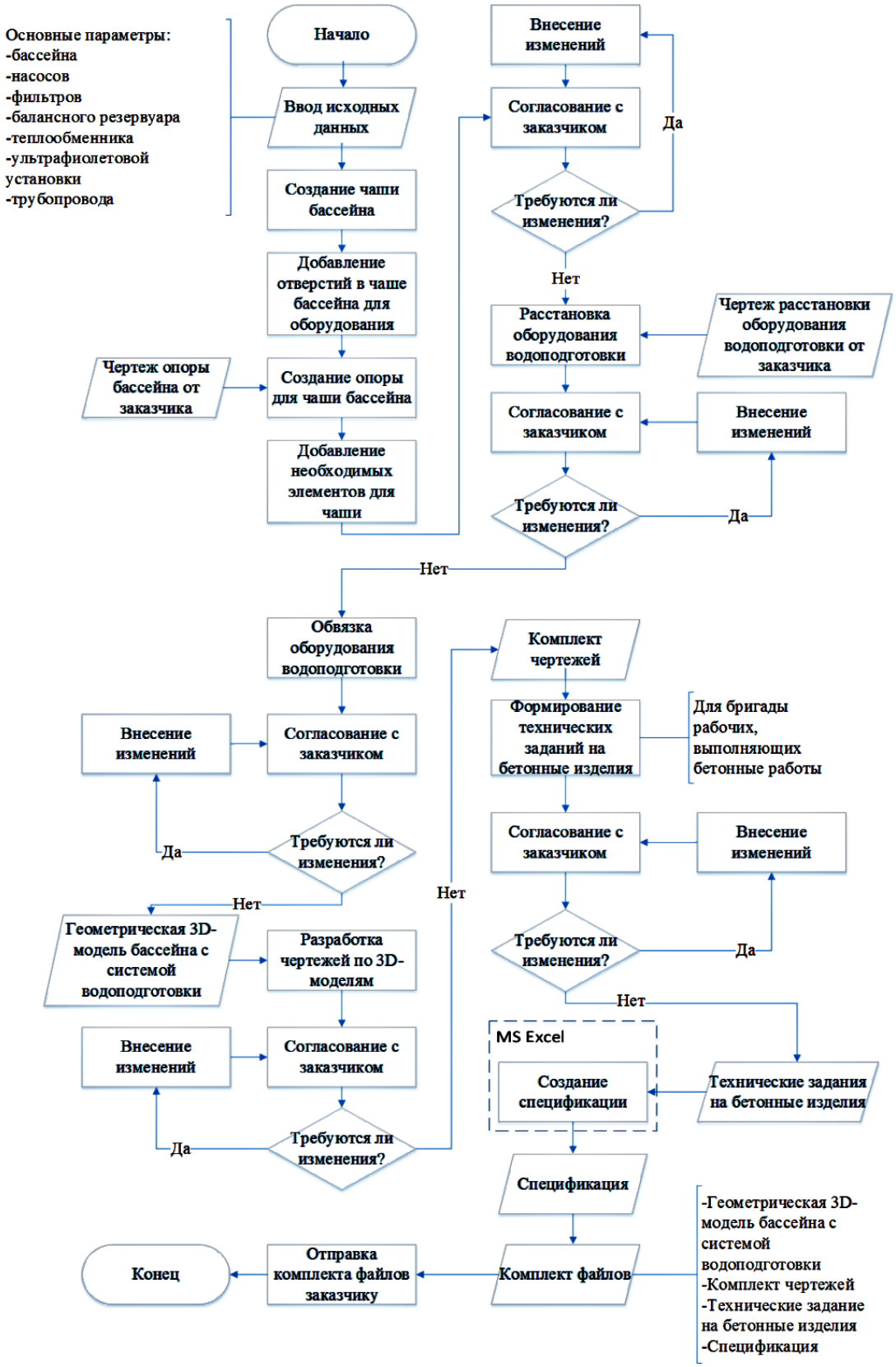


Рис.3. Алгоритм проектирования системы водоподготовки бассейна

6. Разработка структуры САПР водоподготовки плавательных бассейнов

Для разработки системы автоматизированного проектирования водоподготовки плавательных бассейнов, целесообразной является разработка структурно-функциональной схемы работы программы (рис. 4).

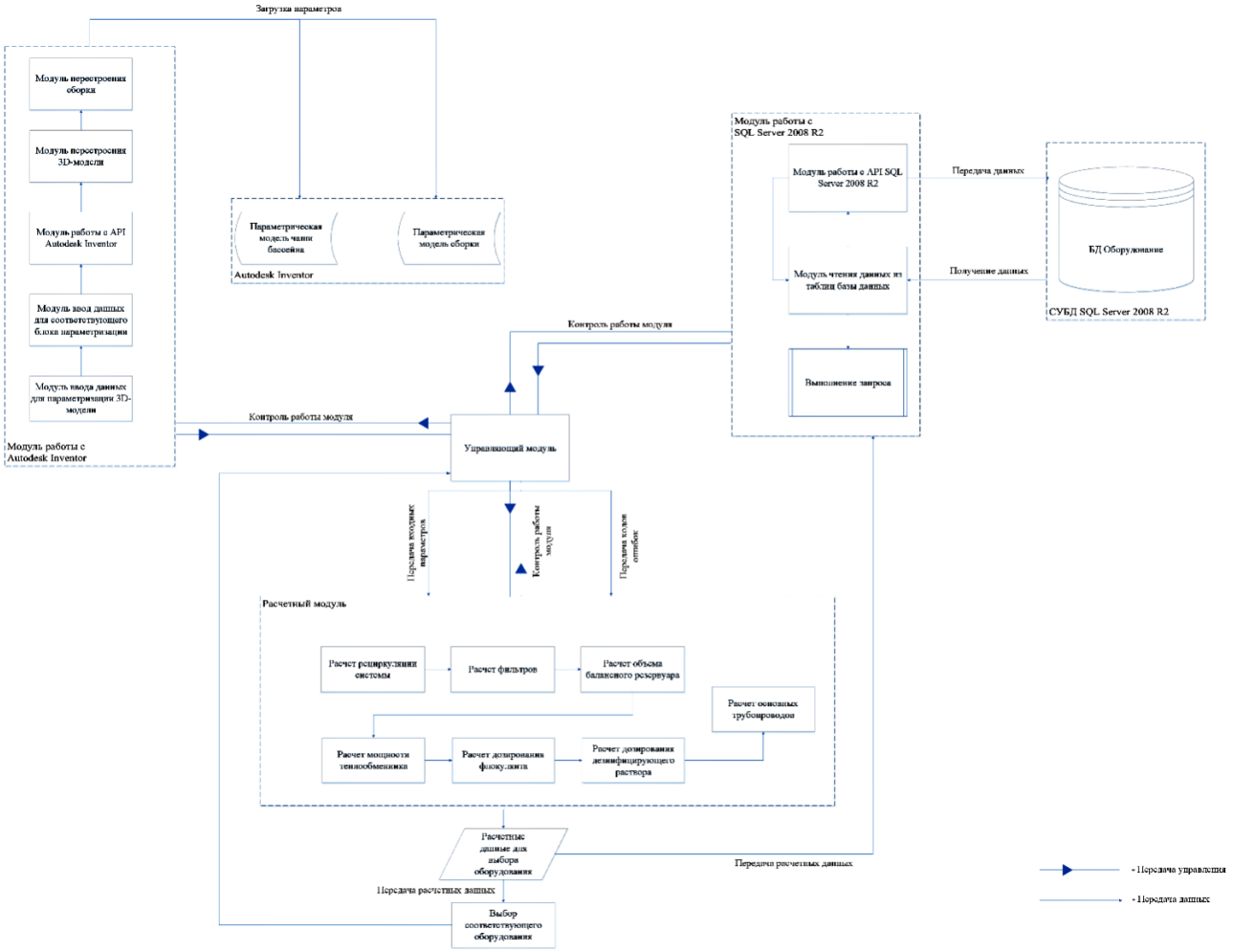


Рис.4. Структурно-функциональная схема работы программы

С помощью разработанной структурно-функциональной схемы можно показать взаимодействие модулей разрабатываемого программного обеспечения.

Из данной схемы видно, что разработанная САПР состоит из следующих модулей:

1) управляющий модуль;
2) расчетный модуль, состоящий из:
   - модуля расчета рециркуляции системы;
   - модуля расчета фильтров;
   - модуля расчета объема балансного резервуара;
   - модуля расчета мощности теплообменника;
   - модуля расчета дозирования флокулянта;
   - модуля дозирования дезинфицирующего раствора;
   - модуля расчета основных трубопроводов;
3) модуль работы с SQL Server, состоящий из:
   - модуля работы с API SQL Server;
   - модуля чтения данных из таблиц базы данных;
   - модуля выполнения запроса;
4) модуль работы с СУБД SQL Server, включающий:
   - модуль базы данных оборудования;
5) модуль работы с Autodesk Inventor, состоящий из:
   - модуль ввода данных для параметризации 3D-модели;
   - модуль ввода данных для соответствующего блока параметризации;

- модуля работы с API Autodesk Inventor;
- модуля работы перестроения 3D модели;
- модуля работы перестроения 3D сборки.

Управляющий модуль САПР водоподготовки плавательных бассейнов является главным модулем системы. Он контролирует работу всех модулей, входящих в состав САПР.

После ввода данных управляющий модуль подает управляющее воздействие на расчетный модуль.

В расчетном модуле его составляющие модули передают исходную и выходную информацию между собой.

Модуль работы с СУБД отправляет запрос напрямую СУБД и получает извлеченные из БД данные. Данные передаются из модуля работы с SQL Server.

Через управляющий модуль проходят все управляющие воздействия, тем самым, данный модуль всегда производит контроль работы системы автоматизированного проектирования.

7. Проработка алгоритмов работы САПР водоподготовки плавательных бассейнов

Основа для разработки программного обеспечения – написание алгоритмов функционирования модулей программы.

Алгоритм – набор инструкций, описывающих порядок действий исполнителя для достижения результата решения задачи за конечное число действий. [2]

В ходе работы по проектированию системы автоматизированного проектирования водоподготовки плавательных бассейнов был разработан алгоритм функционирования программы.

Алгоритм включает в себя весь ход работы программы, начиная с ее запуска и заканчивая закрытием.

Так как САПР водоподготовки плавательных бассейнов работает с базами данных SQL, находящихся под управлением СУБД целесообразно разработать алгоритм взаимодействия с СУБД (рис. 5).

Исходными данными для работы алгоритма является наименование базы данных и хранящихся в ней таблиц.

На первом этапе производится попытка подключения к базе данных. Если не удалось открыть базу данных, то выводится сообщение об ошибке.

Если удалось открыть базу данных, то производится передача расчетных данных и выполнение запроса для подбора каждого из оборудований. После выполнения запроса результат ответа от СУБД сохраняется и выводится в информационную таблицу.

Последним шагом является закрытие подключения к базе данных.

Реализация подключения к SQL Server в среде разработки Visual Studio 2017 представлена на рисунке 6.

8. Краткая аннотация САПР водоподготовки плавательных бассейнов

Разработанный программный комплекс «Система автоматизированного проектирования водоподготовки плавательных бассейнов» предназначена для автоматизации расчетов и проектирования чаш бассейнов в компаниях, занимающихся проектированием систем водоподготовки.

Результатом работы данной САПР является автоматизация расчетов для системы водоподготовки, подбор необходимого оборудования и построение 3D модели чаши бассейна.

Разработанная САПР позволяет производить расчеты, подбирать необходимое оборудование и строить 3D модель чаши бассейна, за считанные минуты, тем самым ускоряя процесс проектирования систем водоподготовки плавательных бассейнов.

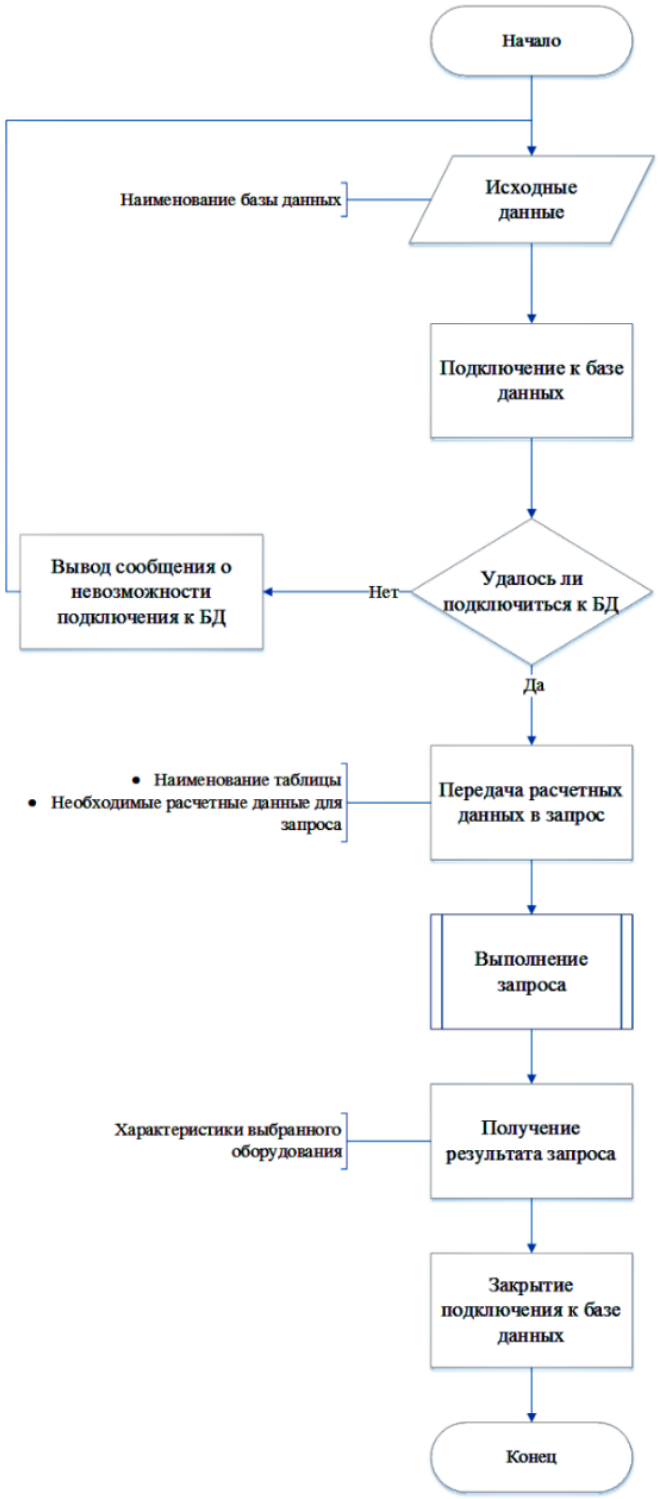


Рис.5. Алгоритм взаимодействия с базой данных SQL

```
private async void buttonPP_Click(object sender, EventArgs e) // подбор центробежных насосов
{
    string connectionString = @"Data Source=DESKTOP-D271RQH;Initial Catalog=Оборудование;Integrated Security=True"; // подключение к SQL Server
    sqlConnection = new SqlConnection(connectionString); // создание нового подключения
    await sqlConnection.OpenAsync(); // асинхронное подключение к бд
    SqlDataReader sqlReader = null; // обнуление чтения БД
    SqlCommand command = new SqlCommand("IF @Поток>=27 Select top 1 * from Maxim WHERE " +
        "[Поток при 14 м.в.с., м³/ч]>@Поток ELSE Select top 1 * from [Victoria Plus] WHERE [Поток при 14 м.в.с., м³/ч]>@Поток", sqlConnection); // выполнение запроса
    command.Parameters.Add("@Поток", SqlDbType.Int, 255).Value = Q; // передача рассчитаного потока в запрос
```

Рис.6. Подключение к SQL Server в среде разработки Visual Studio 2017

Данная САПР имеет простой и доступный пользовательский интерфейс, поэтому не требуется дополнительных затрат времени на изучение данного продукта.

После запуска программы должно появиться главное окно ввода исходных данных (рис. 7).

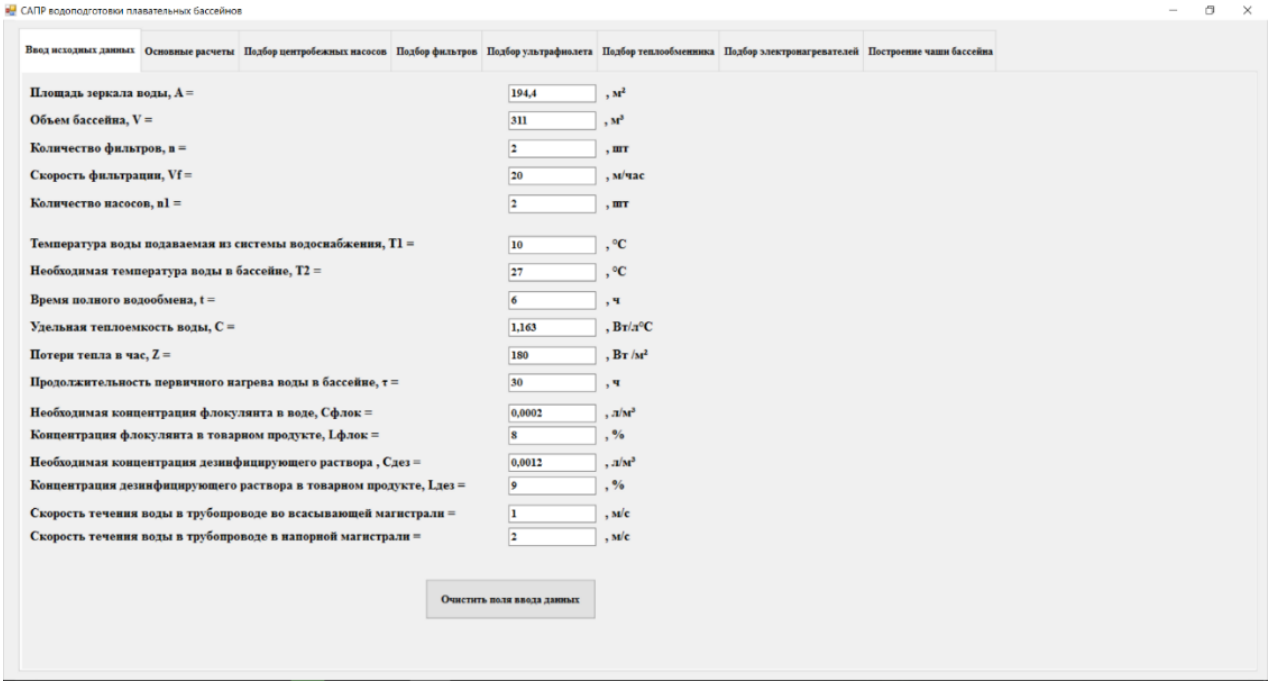


Рис.7. Главное окно САПР водоподготовки плавательных бассейнов

После ввода всех исходных данных необходимо перейти на следующую вкладку «Основные расчеты» (рис. 8).

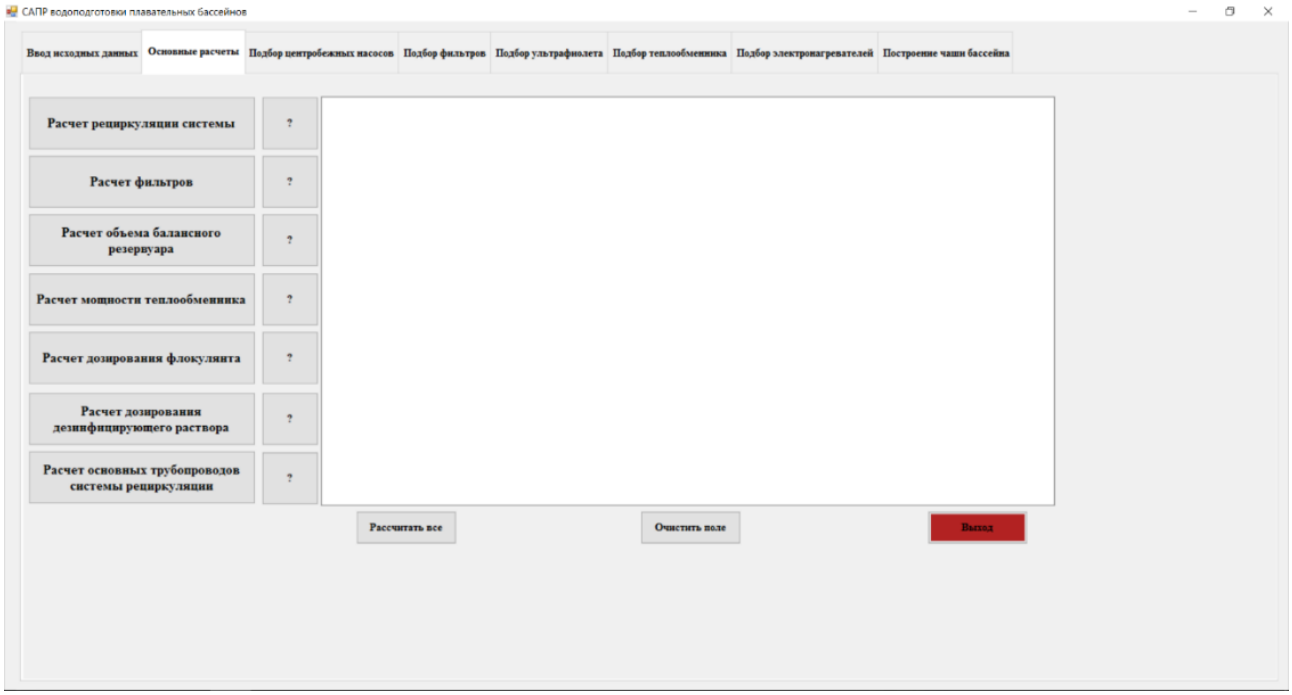


Рис.8. Основные расчеты

После расчета основных параметров системы водоподготовки бассейна необходимо произвести подбор оборудований. Подбор оборудования начинается с подбора насосов. Для

этого нужно перейти на следующую вкладку «подбор центробежных насосов» и выбрать любой насос для отображения необходимой информации (рис. 9).

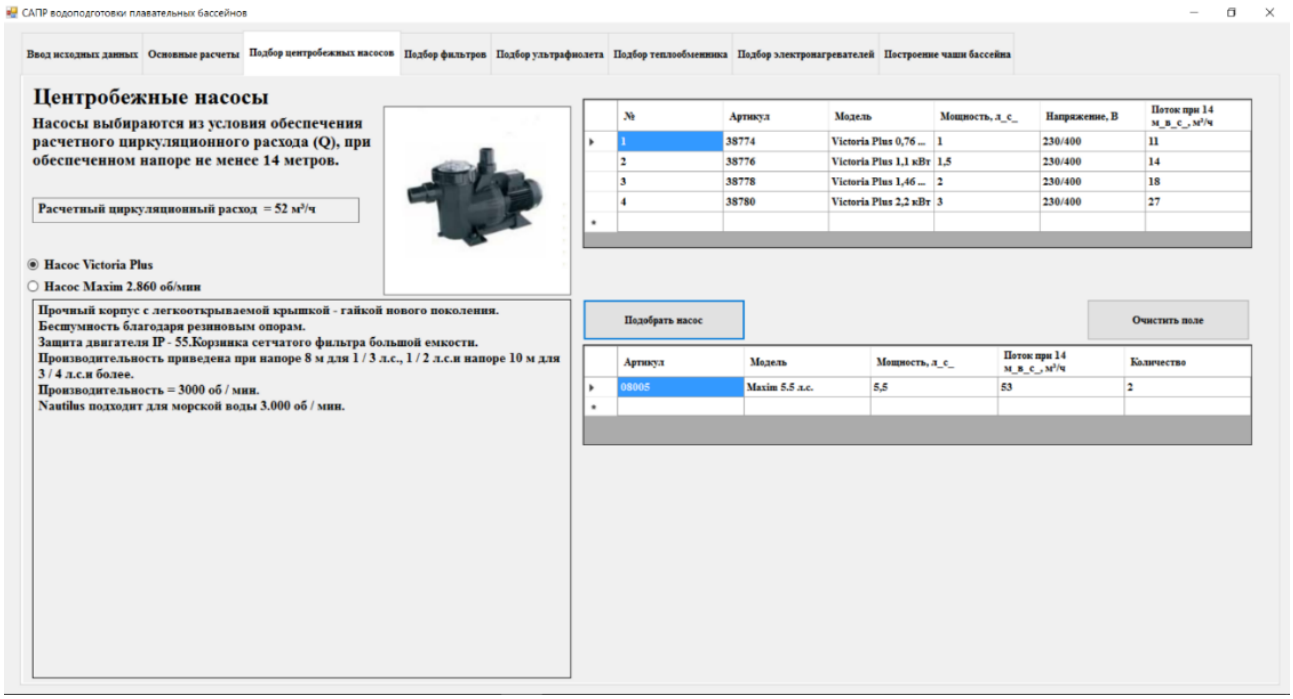


Рис.9. Подбор центробежных насосов

После подбора рециркуляционных насосов, необходимо перейти на следующие вкладки для последовательного подбора необходимого оборудования, а именно: подбор фильтров, подбор ультрафиолета, подбор теплообменника и подбор электронагревателей.

Для построения 3D модели чаши бассейна необходимо перейти на последнюю вкладку «построение чаши бассейна». После перехода на данную вкладку выводится поле ввода исходных данных для изменения основного эскиза чаши и дополнительных параметров (рис. 10).

Рис.10. Основные расчеты

Заключение

Данная разработка является инновационной и не имеет аналогов на рынке проектирования плавательных бассейнов. На данном этапе производится доработка функционирования программы, а также внедрение разработанной САПР в компанию АО «АСТРАЛ СНГ», одной из отраслью которой является проектирование плавательных бассейнов.

Список литературы:

1. SQL – Википедия [Электронный ресурс]. – Электрон. текстовые, граф. дан. – 2001– . – Режим доступа: http://ru.wikipedia.org/wiki/SQL, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус., англ.
2. Официальный сайт «Аркулятор» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.interpro.dp.ua.
3. Мещерякова, П.С. Проектирование бассейнов: без права на ошибку // Строительство и эксплуатация спортивных сооружений, 6 (53), 22 июня 2010, стр. 20-25 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://bmsi.ru/doc/fe791a44-4c50-4fff-b08d-d190bc3f85ca .
4. Математическое программирование: учебное пособие. 5-е изд., стереотип / В.Г. Карманов. М.: Физматлит, 2004. 264 с.
5. Норенков, И.П. Основы автоматизированного проектирования [Текст] : учеб. пособие для вузов / И.П. Норенков. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 336 с. ; ил.
6. Свами М., Тхуласираман К., Графы, сети и алгоритмы. М.: Мир, 1984. 454 с.
7. Шкаберин ГОСТ 34.003-90 Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Автоматизированные системы. Термины и определения [Текст]. Введ. 1992-01-01. – М. : Изд-во стандартов, cop. 1990. – 14

References:

1. SQL - Wikipedia [Electronic resource]. - Electron. text, graph. Dan. - 2001–. - Access mode: http://ru.wikipedia.org/wiki/SQL, free. - Title from the screen. - Yaz. rus
2. Official site "Arculator" [Electronic resource]. - Access mode: http://www.interpro.dp.ua.
3. P Meshcheryakova, S. Basin design: without the right to make a mistake // Construction and operation of sports facilities, 6 (53), June 22, 2010, pp. 20-25 [Electronic resource]. - Access mode: http://bmsi.ru/doc/fe791a44-4c50-4fff-b08d-d190bc3f85ca.
4. Mathematical programming: study guide. 5th ed., Stereotype / VG Pockets. M .: Fizmatlit, 2004. 264 p.
5. Norenkov, I.P. Fundamentals of computer-aided design [Text]: studies. manual for universities / I.P. Norenkov. - Ed. 2nd, Pererab. and add. - M.: Publishing House of Moscow State Technical University. N.E. Bauman, 2002. - 336 p. ; silt
6. Swami M., Tkhulasiraman K., Graphs, networks and algorithms. M .: Mir, 1984. 454 p.
7. Shkaberin GOST 34.003-90 Information technology. Set of standards for automated systems. Automated systems. Terms and definitions [Text]. Enter 1992-01-01. - M.: Standards Publishing House, cop. 1990. - 14

Статья поступила в редколлегию 18.02.19.
Рецензент: д.т.н., доцент Брянского государственного технического университета Петрешин Д. И.
Статья принята к публикации 27.03.19.

Сведения об авторах:

Игнатьев Сергей Сергеевич
Студент 2 курса магистратуры БГТУ
Тел.: +7 (999) 7053386
E-mail: signatiew9019@gmail.com

Аверченков Андрей Владимирович
д.т.н., доцент
Заведующий кафедрой «Компьютерные технологии и системы»
Тел..: +7 (4832) 58-83-62
E-mail: mahar@mail.ru

Information about authors:

Ignatiev Sergey Sergeevich
2nd year student of the BSTU graduate school
Tel.: +7 (999) 705 33 86
E-mail: signatiew9019@gmail.com

Averchenkov Andrey Vladimirovich
Doctor of Technical Sciences, Associate Professor
Head of the department "Computer technology and systems"
Tel.: (4832) 58-83-62
E-mail: mahar@mail.ru

УДК: 658.512.6
DOI: 10.30987/article_5cf2d32c0f5a12.75882726

М.А. Шутиков, А.Н. Феофанов

ПЛАНИРОВАНИЕ ЗАГРУЗКИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ СОВМЕСТНО СО СТАНОЧНЫМ ПАРКОМ ПРИ ПОМОЩИ MES-СИСТЕМЫ

В статье указано, что применение средств автоматизации производства является актуальным в настоящий момент. Сформулировано, что одним из инструментов автоматизации являются MES-системы. Описаны задачи, которые решают MES-системы, указаны преимущества от внедрения системы оптимальной загрузки измерительного оборудования совместно со станочным парком. Приведен опыт внедрения MES-систем на российских предприятиях. Выявлено, что внедрение MES-систем позволяет получить значительный положительный результат функционирования различных процессов предприятия, и как следствие, позволяет повысить его конкурентоспособность.

Ключевые слова: *автоматизация, MES-система, загрузка оборудования, производственное расписание, Индустрия 4.0.*

M.A. Shutikov, A.N. Feofanov

PLANNING OF MEASURING EQUIPMENT TOGETHER WITH A MACHINE-TOOL FLEET WITH THE HELP OF MES-SYSTEM

The article states that the use of automation of production is relevant at the moment.It is formulated that one of the automation tools are MES-systems. The tasks that MES-systems solve are described, the advantages of introducing the system of optimal loading of measuring equipment together with machine-tool fleet are indicated.The experience of MES-systems implementation at Russian enterprises is given. It is revealed that the introduction of MES-systems allows to obtain a significant positive result of the functioning of various processes of the enterprise, and as a result, allows to increase its competitiveness.

Keywords: *automatization, MES-system, equipment loading, production schedule, Industry 4.0.*

Введение

Современные условия развития промышленности, характеризующиеся ключевой ролью информации в процессах функционирования организации ставят перед предприятиями задачи применения стратегий Индустрии 4.0. Реализация данной стратегии предполагает внедрение различных инструментов автоматизации и цифровизации. К ним можно отнести различные продукты, такие как цифровые двойники изделий и производства, системы *CAD/CAM/CAE*, системы автоматизации управления деятельностью организации, такие как, например, *ERP* (*Enterprise Resource Planning*)или *MES* (*Manufacturing Execution System*).

1. Функции MES-систем

Системы *MES* планируют технологические операции, выполняемые на определенных рабочих местах. К основным задачам, которые решают системы этого класса, можно отнести задачи оптимизации, оперативного планирования, управления производственными процессами, оперативного перерасчета производственного расписания. Применяемый в *MES* системах аппарат расчета производственных расписаний позволяет учесть взаимосвязь всех элементов оперативного плана, обеспечить выбор альтернативных технологических маршрутов и адаптивный режим управления материальными потоками[1]. Собирая и обобщая данные, полученные от различных производственных систем и технологических

линий, *MES*-системы выводят на более высокий уровень организацию всей производственной деятельности, начиная от формирования производственного заказа и до отгрузки готовой продукции на склады, а также позволяют эффективно загружать оборудование за счет расчета оптимального производственного расписания выполняемых на нем работ. Кроме того, *MES* позволяет моделировать различные производственные ситуации, например, рассчитать оптимальную загрузку оборудования в случае выхода станка из строя. Это позволяет планировать производственное расписание при необходимости проведения планового или внеочередного ремонта оборудования. Так же, существует возможность планировать производственное расписание с различными ограничениями (например, ограничения по потреблению электроэнергии оборудованием, по наличию специфической оснастки, необходимости присутствия оператора на определенных рабочих местах, и т. д.). Система будет учитывать подобные ограничения и, исходя из поставленных условий составлять производственное расписание. Для решения задачи оперативного планирования в *MES*-системах строится динамическая компьютерная модель производства. Она реализует непрерывное имитационное моделирование движения материальных потоков внутри организации в соответствии с технологическими маршрутами. [2].Эвристические алгоритмы расчета производственных расписаний являются ядром *MES* систем и охраняются в режиме ноу-хау [1].

В *MES* производственное расписание визуально представляется с помощью диаграммы Гантта. Диаграмма Гантта – это вид столбчатых диаграмм, которые служат для наглядного представления плана работ с учетом их длительности. Она является одним из методов планирования проектов. В общем виде, по одной из осей диаграммы откладываются производимые работы, процессы, действия, другая ось является временной шкалой. Соответственно, каждая работа, процесс визуализируется полосой (отрезком), длинна которой соответствует продолжительности данной работы или процесса. Обычно, первая по очередности работа наносится сверху, вторая – ниже, и так далее, до конечной работы или процесса. Таким образом, диаграмма Гантта визуализирует любую последовательность процессов, в том числе и производственное расписание организации, удобным для восприятия образом.

Несмотря на то, что принципы рабочих технологических процессов на предприятиях машиностроительной сферы в целом похожи, каждое предприятие имеет свои индивидуальные особенности. Таким образом, при внедрении автоматизированной системы оптимальной загрузки оборудования необходимо учитывать концепцию построения технологических процессов конкретного предприятия. В свою очередь, каждое предприятие подбирает систему исходя из своих потребностей. На технологические процессы, которые подвергаются автоматизации, влияет номенклатура станочного оборудования, степень загруженности оборудования и всей технологической линии, логистика внутри производства, степень влияния работы конкретной линии на общий результат работы предприятия.

К преимуществам применения *MES*-систем можно отнести:

- повышение коэффициента загрузки оборудования;
- повышение производительности оборудования и всей технологической линии;
- понижение или полное исключение влияния человеческого фактора;
- автоматизация производственных процессов;
- обеспечение персонала и оборудование адекватной и актуальной информацией, необходимой для эффективного функционирования технологического процесса.

2. Опыт внедрения MES-систем на предприятиях российской экономики

В РФ *MES*-системы получают все большее признание. Особенно востребованы системы *MES* на предприятиях с многоуровневыми технологическими процессами, которые зависят

от множества факторов: температурного режима, давления, энергопотребления и др. На предприятиях Концерна «Калашников» была разработана собственная *MES*-система, удовлетворяющая потребностям организаций именно данного Концерна[3].Воронежское предприятие группы СИБУР «Воронежсинтезкаучук» внедрило *MES*-систему, позволяющую отслеживать весь технологический процесс, начиная от стадии приемки сырья до отгрузки готовой продукции на склад [4]. Возможности системы таковы, что руководство способно в любой момент оценить оперативную обстановку на всем предприятии, сделать соответствующие выводы и фактически мгновенно скорректировать процесс. Результаты подобных внедрений во многом оцениваются с финансовой точки зрения, а на рентабельность влияют и оптимизация технологического процесса, и сокращение издержек, и повышение дисциплины и культуры труда. ОАО «Пивоваренная компания «Балтика», входящая международную группу компаний *Carlsberg*, после внедрения *MES*-системы добилась повышения точности управления технологическим процессом, возможности проводить мониторинг работы производственных линий в режиме реального времени, повышения оперативности реагирования на изменение качественных показателей или оперативно выявлять скрытые неполадки, приводящие к потерям и остановкам технологического оборудования, позволяет нормировать и контролировать производственные события на уровне производства, а также рассчитывать потери по партии в режиме реального времени.[5]

По данным статистики *MES* обеспечивает:

- снижение продолжительности цикла производства в среднем на 45%;
- сокращение времени ввода данных, обычно на 75% или более;
- сокращение количества незавершенной продукции в среднем на 24%;
- снижение объема бумажной отчетности между сменами в среднем на 61%;
- сокращение времени освоения новой продукции в среднем на 27%;
- сокращение бумажной документации в среднем на 56%;
- сокращение объема брака в среднем на 18%.

3. Применение MES-системы для расчёта производственного расписания

Однако, часто возникает ситуация, когда после изготовления партии продукции при ее контроле обнаруживается брак. В этом случае возникает необходимость изготовить недостающее количество годных деталей, или исправить бракованные детали, если брак исправимый. Ситуация может осложнится тем, что изготовленную партию заказчик требует к определённому сроку, а для того, чтобы изготовить недостающее количество деталей, необходимо выделить временные и производственные ресурсы. *MES*-система предоставляет возможности рационально перераспределить загрузку оборудования, изготовить необходимое количество изделий без негативных последствий для выполнения текущих заказов.

Обычно, контролем изготовленной продукции занимается отдел технического контроля с помощью различного оборудования, например, координатно-измерительных машин. Внедрение *MES*-системы в деятельность отдела технического контроля позволит значительно повысить оперативность и эффективность работы в случае обнаружения бракованной продукции. После измерения параметров изделий в автоматизированном режиме составляется протокол измерений. В случае, если забракованной продукции нет, то составляется отчет о прохождении продукции контроля и продукция передается заказчику.[6]

В случае, если обнаруживается бракованная продукция, данные о её количестве и характере брака в автоматизированном режиме передаются в *MES*-систему, которая в автоматизированном режиме пересчитывает производственное расписание таким образом, чтобы рационально загрузить станочное оборудование без срыва сроков действующих

заказов (Рис.1).Произведенный перерасчет с помощью диаграммы Гантта может посмотреть любой уполномоченный сотрудник. Производственное расписание поддерживается в оптимальном состоянии за счет непрерывной компенсации отклонений методом коррекции либо полного перерасчета.

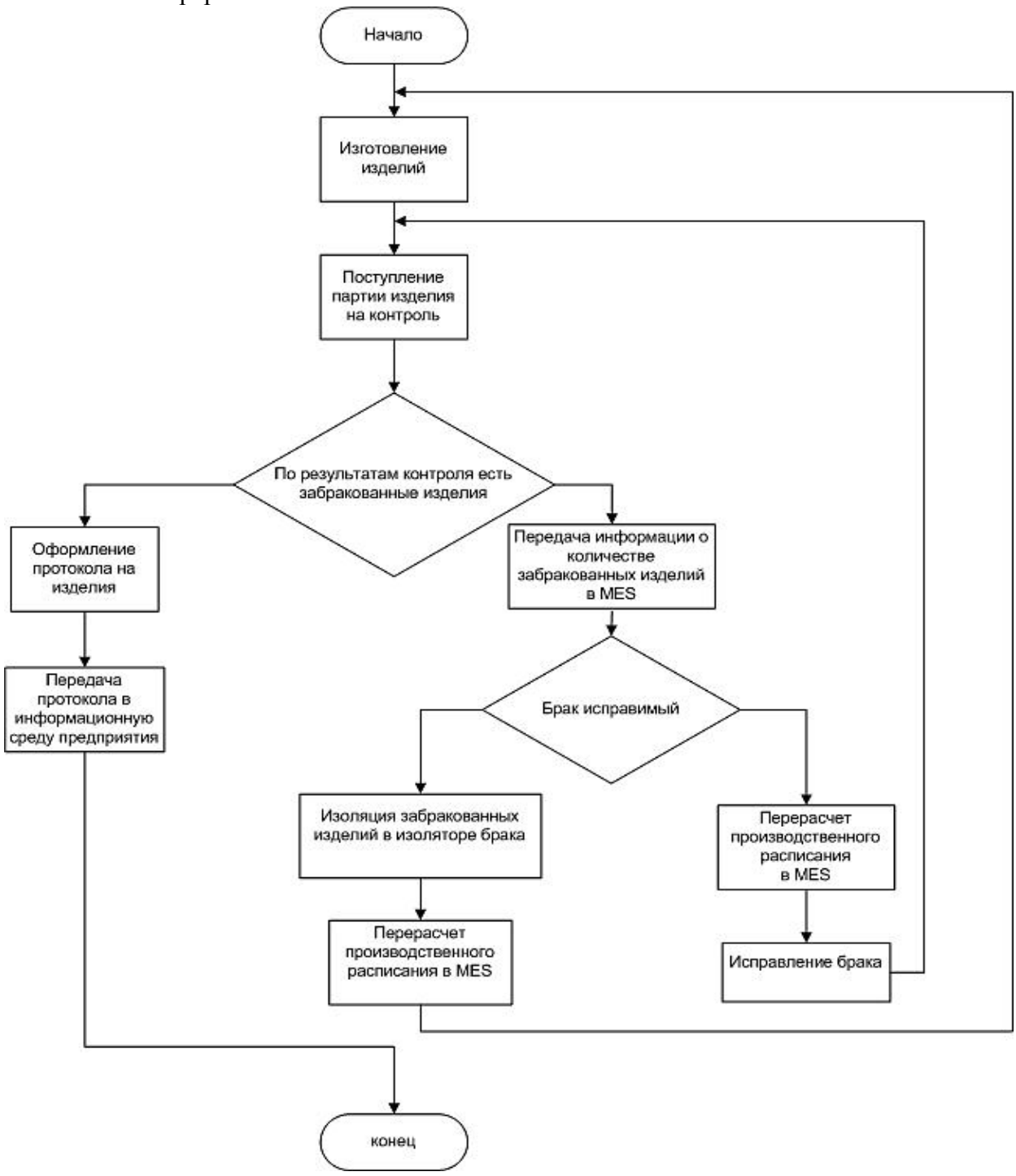


Рис. 1. Алгоритм работы MES-системы при забраковке изделий

Выводы

Таким образом, внедрение *MES*-систем позволяет получить значительный положительный результат функционирования различных процессов предприятия, и как

следствие, позволяет повысить конкурентоспособность производства. Повышается оперативность реагирования на возникновение ситуаций, при которых необходимо перераспределить направление материальных потоков на предприятии, повышается прослеживаемость и прозрачность функционирования предприятия[7]. Однако, для получения необходимого положительного эффекта при внедрении *MES*-системы на предприятии необходимо учитывать характеристики и количество выпускаемой продукции, количество и характеристики станочного оборудования, степень его использования. Применение *MES*-систем дает возможность составлять и своевременно корректировать производственные расписания, что, в свою очередь, позволяет более точно определить фактическую себестоимость изготовления как каждой отдельной детали, так и всего изделия в целом [8].

К тому же, применение систем такого типа дает преимущества, связанные с повышением прозрачности производства. Это позволит повысить оперативность, достоверность и прослеживаемость операций функционирования предприятия. Кроме того, прозрачность функционирования позволяет предоставлять адекватные сведения контролирующим органам, таким как представители военного заказчика или аудиторам.

Список литературы:

1. Будник Р. MES-системы: задачи и решения. // Мир компьютерной автоматизации. 2003. №4. С.74-78.

2. Феофанов А.Н., Шутиков М.А., Пономарев К.С. Применение MES-систем для контроля геометрических параметров подшипников. // Вестник МГТУ Станкин. 2018. №4. С. 78-83.

3. Бухаров В.А. Опыт внедрения системы управления производством. // РИТМ Машиностроения. 2018. №8. С. 27-30.

4. Клим М.И. Зачем гиганту MES-система. Опыт одного внедрения. // Журнал «ИСУП». 2016. № 5(65).

5. https://www.wonderware.ru/ (дата обращения 23.02.2019) Внедрение системы MES в пивоваренной отрасли – URL: https://www.wonderware.ru/wonderware-success-stories-in-russian/ss-food-and-beverage/

6. Соломенцев Ю.М., Феофанов А.Н., Бондарчук Н.Д. Проблемы мирового рынка станкостроения в 1980-2017. // Технология машиностроения. 2017. №9 (183). С. 15-19.

7. Феофанов А.Н., Пономарев К.С., Шутиков М.А. Системы электронного документооборота как инструмент цифровой экономики. // Технология машиностроения. 2018. № 9. С. 69-74.

8. Соломенцев Ю.М., Фролов Е.Б., Феофанов А.Н. Оперативное планирование и управление машиностроительным производством на основе исполнительных производственных систем. // Технология машиностроения. 2017. № 8. С. 41-43.

References:

1. Budnik R. (2003) MES-systems: tasks and solutions // The world of computer automation No. 4, pp. 74-78. [in Russian language]

2. Feofanov A.N., Shutikov M.A., Ponomarev K.S. (2018). Application of MES-systems for control of geometrical parameters of bearings // Vestnik of MSTU “Stankin”, No. 4, pp. 78-83. [in Russian language]

3. Buharov V.A. (2018). Experience in implementing a production management system // Rhythm of Machinery, No. 8, pp. 27-30. [in Russian language]

4. Klim M.I. (2016). Why would a giant must MES-system have? One implementation experience // Magazine “ISUP”, No. 5 (65), [in Russian language]

5. https://www.wonderware.ru/ (treatment date 23.02.2019) Implementation of the MES system in the brewing industry – URL: https://www.wonderware.ru/wonderware-success-stories-in-russian/ss-food-and-beverage/

6. Solomentsev Yu. M., Feofanov A. N., Bondarchuk N. D. (2017). Problems of the machine-tool industry world market in 1980—2017. // Tekhnologiya Mashinostroeniya. No. 9, pp. 15-19 [in Russian language]

7. Feofanov A.N., Ponomarev K.S., Shutikov M.A. (2018). Electronic document management systems as a tool of digital economy // Tekhnologiya Mashinostroeniya. No. 9,pp. 67-74 [in Russian language]

8. Solomentsev Yu.M., Frolov E.B., Feofanov A.N. (2017). Operational planning and management of machinery production basing on executory production systems // Russian Engineering Research. No. 8, pp. 41-43 [inRussianlanguage]

Статья поступила в редколлегию 18.03.19.
Рецензент: д.т.н., доцент Брянскогогосударственного технического университета Аверченков А.В.
Статья принята к публикации 29.04.19.

Сведения об авторах

Феофанов Александр Николаевич
Доктор технических наук, профессор кафедры «Инженерная графика» ФГБОУ ВО МГТУ «Станкин»
тел.: 8 (903) 724-24-91
E-mail:feofanov.fan1@yandex.ru

Шутиков Михаил Александрович
Аспирант кафедры «Автоматизированные Системы Обработки Информации и Управления»
ФГБОУ ВО МГТУ «Станкин»
тел.: 8 (916) 213-48-35
E-mail:mi.shutikov93@yandex.ru

Information about authors:

Feofanov Alexander Nikolaevich
PhD in Engineering, professor of department of engineering graphics FGBOU VO "MSTU" STANKIN"
tel.: +7 (903) 7242491
E-mail: feofanov.fan1@yandex.ru

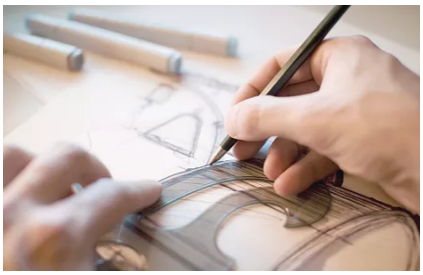
Shutikov Mikhail Aleksandrovich
postgraduate of automated data processing systems and management department FGBOU VO "MSTU" STANKIN "
tel.: +7 (916) 2134835
E-mail: mi.shutikov93@yandex.ru

Лаборатория инженерии материалов и адаптивных технологических систем

Научная лаборатория создана в 2017 году на базе Брянского государственного технического университета.

Исследуемые направления:

Изготовление подшипников скольжения с применением древесно-металлических композиционных материалов.



Проектирование и производство режущего инструмента по ГОСТ и чертежам заказчика.

Восстановление и упрочнение ковшевого технологического оборудования экскаваторной и бульдозерной техники.

(Контактное лицо – д-р техн. наук, проф. Пыриков Павел Генадьевич)
Тел. моб. +7-910-331-73-64. E-mail:pyrikovpg@mail.ru

Учредитель и издатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Брянский государственный технический университет"
Адрес редакции и издателя: 241035, Брянская область, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7
ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»
Телефон редакции журнала: (4832) 56-49-90. E-mail: aim-pu@mail.ru
Вёрстка А.А. Алисов. Корректор А.Ю. Малюкина.
Сдано в набор 23.05.2019. Выход в свет 28.06.2019.
Объём 50 Мб. ОЗУ 512 Мб. Internet Explorer, Adobe Reader 5.0 и выше.
12+