

Автоматизация расчёта размерных цепей на основе имитационного моделирования

А. И. Самаркин¹,
С. И. Дмитриев¹,
Н. Н. Попок²,
Р. С. Хмельницкий²,
Е. А. Евгеньева¹,
А. М. Усик¹

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «Псковский государственный
университет», г. Псков, Российская Федерация

²Учреждение образования «Полоцкий государственный университет
имени Евфросинии Полоцкой», г. Новополоцк, Республика Беларусь

Аннотация. Целью работы является снижение трудоёмкости работ при проектировании и изготовлении изделий в машиностроении путём автоматизации расчёта размерных цепей. Для достижения цели решаются задачи разработки имитационной модели, алгоритма и программы расчёта размерных цепей.

Используются аналитические методы исследования, включающие имитационное моделирование расчёта, позволяющего генерировать размерные цепи в соответствии со случайными законами распределения и учитывающее технологические и конструкторские особенности получения размеров звеньев цепи.

Рассмотрены схемы и библиотека базовых классов, отражающие основные объекты размерных цепей, а также генератор размеров, который позволяет имитировать формирование размера цепи с учетом допусков и в соответствии с ожидаемым законом распределения. Приведен интерфейс программы, включающий моделируемый размер, закон распределения размеров, основное меню, зону визуализации и результаты симуляции. Показаны примеры реализации программы по каждому окну интерфейса.

Результаты исследований могут быть использованы при моделировании расчёта размерных цепей методом Монте-Карло и позволяют оценить параметры замыкающего звена по вероятностным характеристикам, входящих в размерную цепь звеньев.

Ключевые слова: размерные цепи, автоматизированный расчёт размерных цепей, компьютерная модель, имитационное моделирование, симуляция.

Automation of Dimensional Chain Calculation Based on Simulation Modeling

Alexander I. Samarkin¹,
Sergey I. Dmitriev¹,
Nikolay N. Popok²,
Ruslan S. Khmialnitski²,
Yevgeniya A. Evgenyeva¹,
Anton M. Usik¹

¹Federal State Budgetary Educational Institution of Higher
Education "Pskov State University", Pskov, Russian Federation

²Educational institution "Euphrosyne Polotskaya State University
of Polotsk", Novopolotsk, Republic of Belarus

Abstract. The aim of this work is to reduce the labor intensity of operations in the design and manufacture of products in mechanical engineering through the automation of dimensional chain calculations. To achieve this goal, the tasks of developing a simulation model, algorithm, and software for calculating dimensional chains are being addressed.

Analytical research methods are used, including simulation modeling that allows generating dimensional chains according to random distribution laws and taking into account technological and design features of obtaining chain link dimensions.

The paper examines schemes and a library of base classes that reflect the main objects of dimensional chains, as well as a dimension generator that enables simulating the formation of a chain dimension considering tolerances and in accordance with the expected distribution law. The program interface is presented, including the simulated dimension, dimension distribution law, main menu, visualization area, and simulation results. Examples of program implementation for each interface window are shown.

The research results can be used in modeling dimensional chain calculations using the Monte Carlo method and allow evaluating the parameters of the замыкающего link based on the probabilistic characteristics of the links included in the dimensional chain.

Keywords: dimension chains, automated calculation of dimension chains, computer model, simulation modeling, simulation.

ВВЕДЕНИЕ

Расчет размерных цепей, несмотря на многочисленные работы в этом направлении, до настоящего времени является достаточно трудоёмкой задачей. Это связано, в первую очередь, с их многообразием как по назначению (конструкторские, технологические, измерительные), так и по типу звеньев и их расположению (линейные, угловые, плоские, пространственные).

Как следствие этого, предлагаются многочисленные методы их расчета как ручного, так и автоматизированного [1–3].

Применение автоматизированных методов расчета имеет ряд известных преимуществ, освобождающих конструкторов и технологов от рутинных вычислений, что дает возможность заниматься им задачами творческого характера.

В настоящее время предлагается достаточно большое количество САПР, в том числе в виде различных приложений по расчету размерных цепей [4–8]. Анализ известных САПР расчета размерных цепей выявил ряд их недостатков [1, 2]. В частности, большинство доступных на рынке приложений являются закрытыми, то есть не раскрывают заложенные в них алгоритмы и методики расчета. Кроме этого, эти приложения являются, как правило, платными и ориентированы на предоставление пользователю только конечного результата.

При решении научно-исследовательских задач, имеющих поисковый характер, представляется актуальным иметь собственное программное обеспечение, которое позволяло бы моделировать формирование размерных цепей и образование конечного звена методами имитационного моделирования. Следует отметить, что не случайно многие научные школы в области машиностроения работают в этом направлении и имеют свои достаточно оригинальные разработки [9–14].

Как известно, простейшим методом расчета размерных цепей является метод максимума–минимума, однако он дает лишь максимальные и минимальные значения размеров звеньев цепи, не решая проблему расчета наиболее вероятного замыкающего звена,

и дает завышенные погрешности при большом (фактически свыше 5...7) количестве звеньев цепи.

Вероятностный метод опирается на представление о размере, как о некоторой случайной величине, что позволяет применить к расчету законы теории вероятности. При этом для замыкающего звена решаются две задачи: рассчитывается его математическое ожидание (центр группировки замыкающего звена, как случайной величины) и рассчитываются его вероятные отклонения от этого центра.

Этот метод также имеет недостатки: применяемые расчетные формулы обоснованы для нормального закона распределения, в случае иных законов (равномерного, треугольника и т. д.) используются коэффициенты «приведения» к нормальному распределению, обоснованность которых является дискуссионной.

Действительно, сами законы распределения размеров являются не обязательно нормальными и, во всяком случае, обусловлены технологией получения определенного размера.

В связи с этим, целью материала является снижение трудоемкости работ при проектировании и изготовлении изделий в машиностроении путем автоматизации расчета размерных цепей. Для достижения цели решаются задачи разработки имитационной модели, алгоритма и программы расчета размерных цепей. Используются аналитические методы исследования, включающие имитационное моделирование расчета, позволяющего генерировать размерные цепи в соответствии со случайными законами распределения и учитывающее технологические и конструкторские особенности получения размеров звеньев цепи.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Отличительными особенностями предлагаемого программного обеспечения являются следующие:

1. Каждый размер рассматривается как генератор случайных значений, подчиненных одному из законов распределения. Помимо очевидных (нормального и равномерного), могут быть использованы логнормальный, асимметрично нормальный,

Вейбулла и т. п., выбор которых ограничен только возможностью их компьютерной реализации.

2. Параметры закона распределения подбираются исходя из характера задачи, например, метода получения охватываемого и охватывающего размеров, причем допускается расчет таких параметров распределения, которые обеспечивают заданный процент выхода генерируемых реализаций размера за пределы поля допуска в плюс или в минус, что имитирует возможность поступления бракованных деталей.

3. После «сборки» в размерную цепь, то есть создания массива размеров-генераторов, указанная размерная цепь может сгенерировать конкретную реализацию всех составляющих ее размеров и получить, соответственно, конкретную реализацию замыкающего звена.

4. После многократных повторений, имитирующих сборку изделия из деталей, получаем массив реализаций замыкающего звена. Указанная выборка может быть проанализирована как случайная величина обычными методами статистического анализа.

5. Определяются центр группировки, стандартное отклонение, асимметрия и эксцесс, проверяются гипотезы о законе распределения, находятся минимальные и максимальные значения, без решения сложных математических задач, связанных с рассмотрением законов распределения, которые не являются нормальными.

6. Каждая симуляция является реализацией сборки компонентов и в этом качестве позволяет оценить влияние различных факторов на точность замыкающего звена, выделить промежуточные замыкающие звенья и их характеристики, предложить, например, компоненты для селективной сборки и определить ее эффективность, оценить вероятность брака или необходимости введения регулировочных звеньев.

Компьютерная модель позволяет провести много-

миллионные симуляции, имитируя массовое производство или рассмотреть процессы формирования замыкающих звеньев как случайных величин.

На настоящем этапе предлагаемое программное обеспечение реализовано для решения прямой задачи линейных размерных цепей, то есть цепей, звеньями которых являются только линейные размеры. Ниже приводится алгоритм работы предлагаемого программного обеспечения.

В соответствии с предлагаемым методом выполняется серия симуляций размерной цепи, причем в каждой из симуляций составляющие размеры получают индивидуально изменяющиеся значения. В результате получается выборка таких показателей размерной цепи, как значения размеров в серии, действительное значение замыкающего звена и т. п., которую можно в дальнейшем анализировать статистическими методами.

Для реализации метода необходимо располагать множеством размеров, составляющих размерную цепь, которые на этапе симуляции реализуются в виде конкретных значений. Эти значения носят случайный характер, но подчиняются определенным статистическим закономерностям, например, закону нормального распределения, треугольника или асимметричного нормального распределения.

Таким образом, основными абстракциями являются: линейная размерная цепь, составляющие размеры, реализация размера на этапе симуляции.

Поскольку размерные цепи могут быть весьма большими по количеству звеньев, а для получения статистически достоверных показателей необходимо располагать выборками со значительным количеством данных, принято решение использовать для разработки язык программирования C#, который, в том числе, позволяет легко создавать развитые интерфейсы пользователя.

Проект включает библиотеку базовых классов, отражающую основные объекты размерных цепей (табл. 1).

Таблица 1 – Библиотека базовых классов

Table 1 – Base class library

№	Термин	Класс
1	2	3
1	Закон распределения	Distribution
2	Допуск	Tolerance
3	Размер с допуском	Dimension
4	Составляющий размер линейной размерной цепи	Signed Dimension
5	Реализация размера (конкретное значение размера в симуляции)	Dim Example

Окончание таблицы 1

End of Table 1

1	2	3
6	Угловой размер	Angle
7	Построитель экземпляров размеров	Dimension Builder
8	Линейная размерная цепь	Linear Chain2

Следует отметить, что в таблице 1 отсутствуют такие классы, как: «Замыкающий размер линейной размерной цепи»; «Увеличивающий размер линейной размерной цепи»; «Уменьшающий размер линейной размерной цепи» поскольку последние являются традиционными размерами и отдельный класс

для них в программе не требуется. Что касается увеличивающих звеньев в программе, они задаются номиналом в «плюс», уменьшающие – в «минус».

Схема базовых классов представлена на рисунке 1.

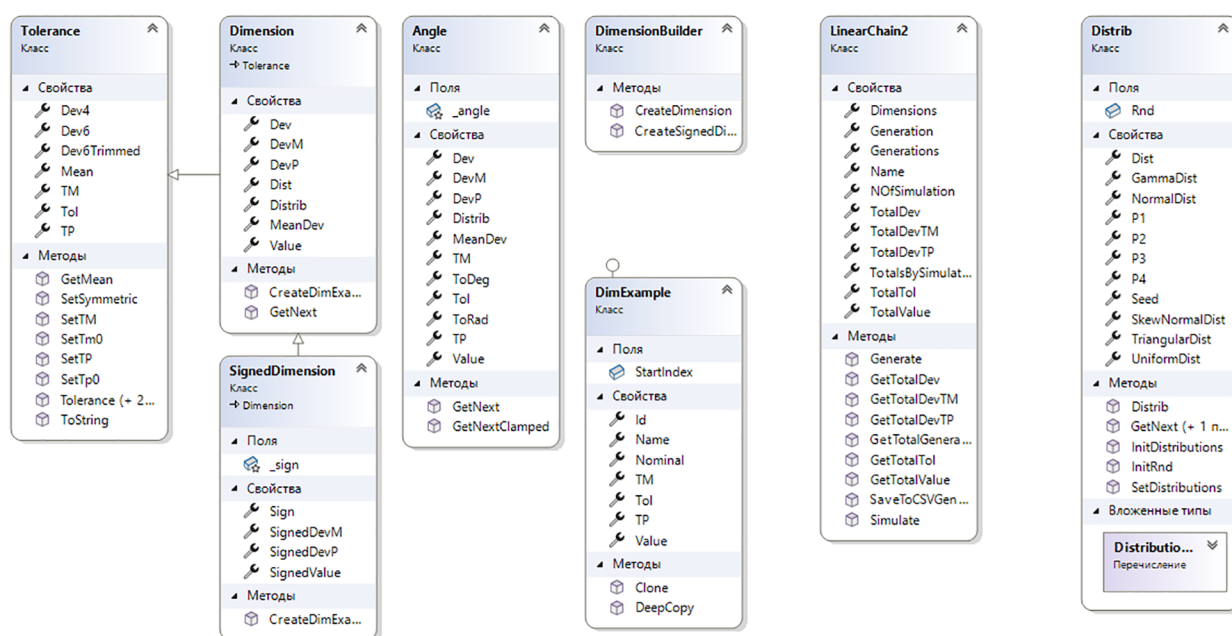


Рисунок 1 – Схема базовых классов

Figure 1 – Diagram of base classes

На первом этапе работ реализован генератор размеров, который позволяет имитировать формирование размера цепи с учетом допусков и в соответствии с ожидаемым законом распределения.

Допуск задается его верхним и нижним отклонениями, которые вместе с номинальным размером образуют специфицированные границы размеров.

Закон распределения и его параметры, которые являются индивидуальными для каждого составляющего размера, образуют генератор случайных чисел. При этом генерируемые параметры не обя-

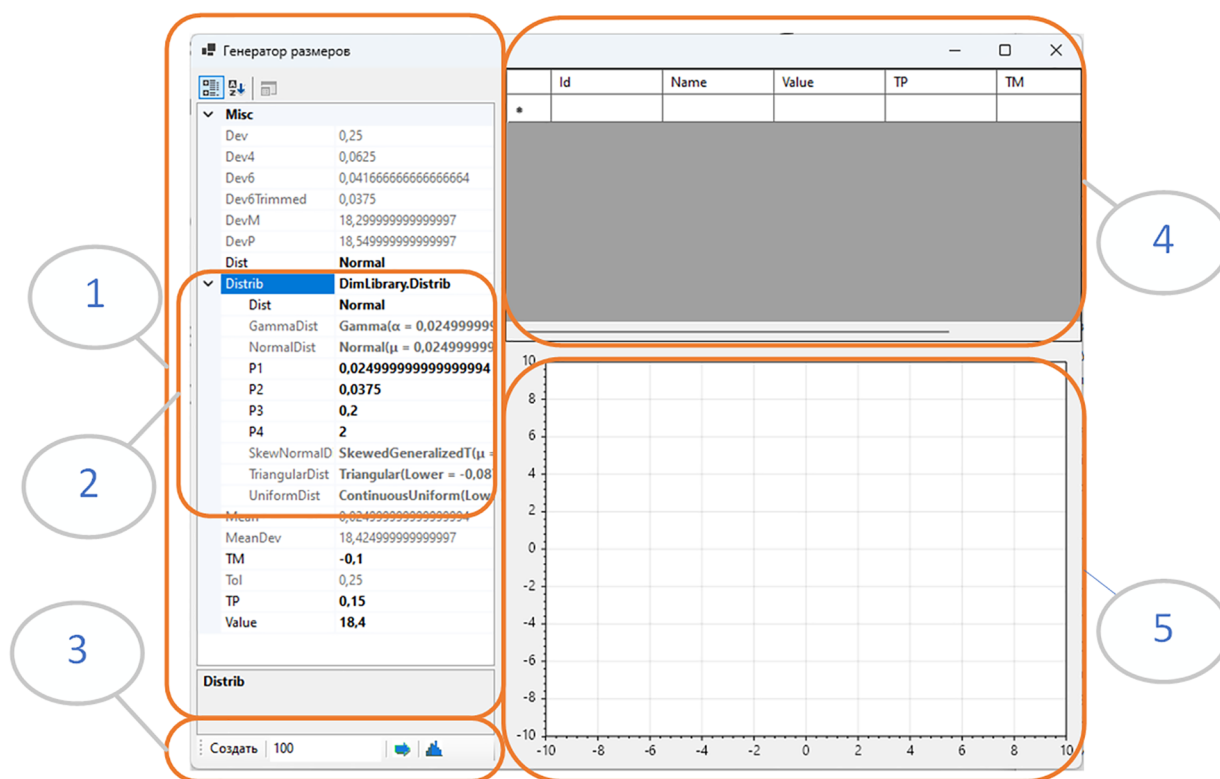
зательно соответствуют спецификации. Так, если размер подчиняется нормальному закону распределения, а отклонение соответствует, как пример, правилу 4-х сигм, то около 5 % размеров будут превышать предельные значения размера. Формально можно задать любой закон распределения и любые параметры, в том числе дающие брак.

Таким образом, каждый размер цепи «генерирует» свое значение на этапе симуляции независимо от всех остальных и в соответствии с информацией об особенностях, например, технологического про-

цесса или наличия брака.

Действительные размеры в реальных производственных условиях являются случайными величинами, закон распределения и параметры указанного

закон распределения подлежат экспериментальной оценке. На рисунке 2 показан интерфейс программы.



1 – свойства моделируемого размера, 2 – свойства закона распределения, 3 – основное меню, 4 – результаты симуляции, 5 – зона визуализации

1 – properties of the simulated size, 2 – properties of the distribution law, 3 – main menu, 4 – simulation results, 5 – visualization area

Рисунок 2 – Интерфейс программы

Figure 2 – Program interface

Основными параметрами размера являются: Value – номинал размера, TP и TM – верхнее и нижнее отклонение размера (с учетом знака), параметры закона распределения, значения которых отличаются в зависимости от выбранного закона.

Результаты симуляции (количество генерируемых размеров задается в меню) и отображаются в виде таблицы (рис. 3).

Результаты можно визуализировать в виде графика и гистограммы, а таблицу данных – экспортировать в нейтральный формат CSV (comma separated value) для статистического анализа.

На рисунке 3 показаны результаты симуляции с построением графиков в виде точечного графика

и гистограммы. В приведенной симуляции выведены значения размеров с точностью в дробной части более третьего знака, что в производственных условиях, особенно в машиностроении, избыточно и может быть исправлено форматированием.

На втором этапе с использованием базовых классов авторами разработана программа симуляции линейных размерных цепей. Интерфейс программы представлен на рисунке 4.

Для использования программы необходимо:

1. Создать список размеров и отредактировать их параметры (номинальное значение, направление, отклонения размера, закон распределения и его параметры).

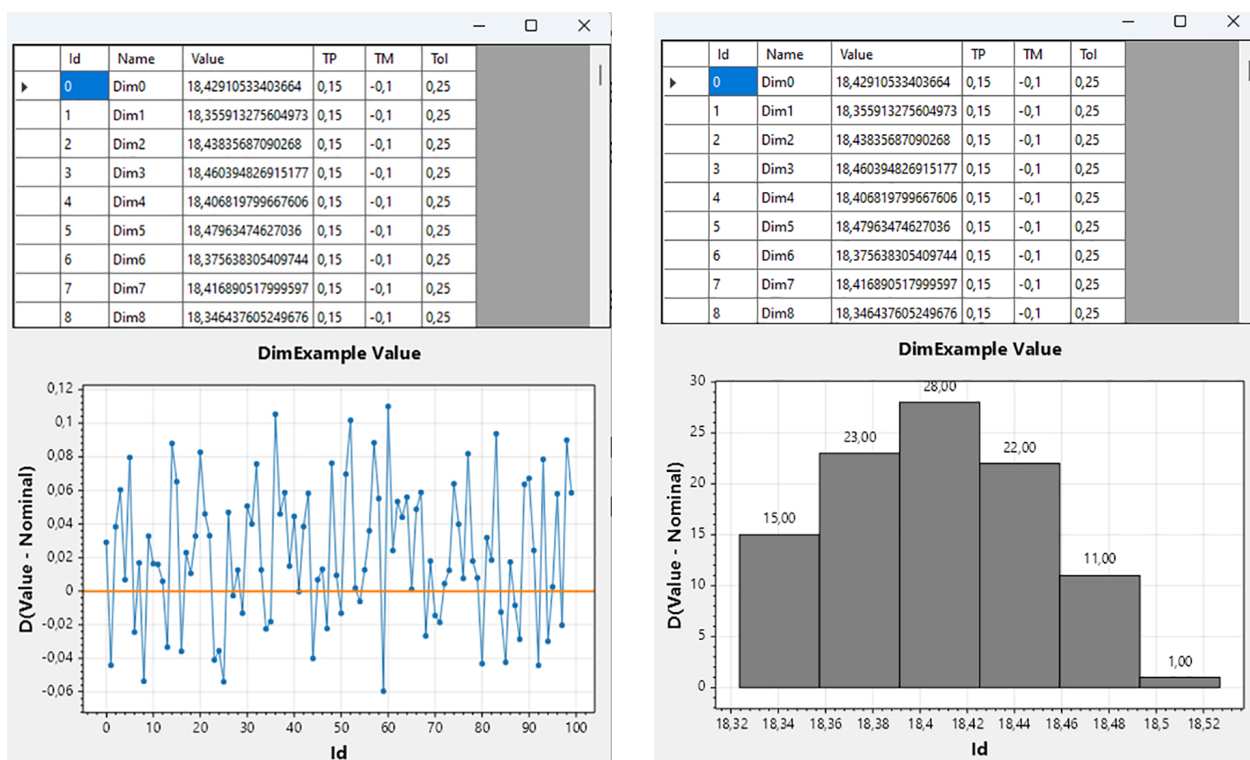
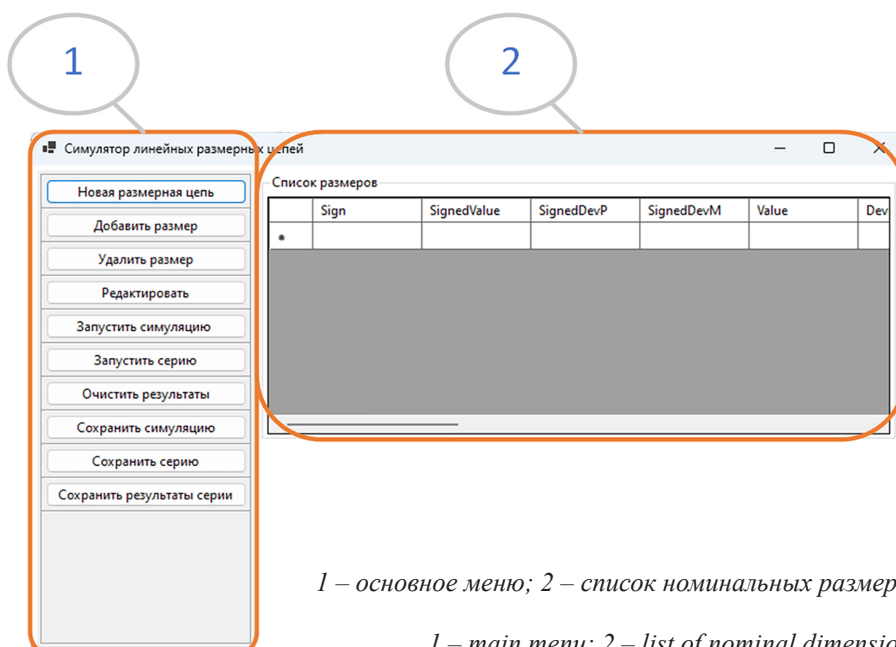


Рисунок 3 – Результаты симуляции

Figure 3 – Simulation results



1 – основное меню; 2 – список номинальных размеров

1 – main menu; 2 – list of nominal dimensions

Рисунок 4 – Интерфейс программы моделирования размерных цепей

Figure 4 – Dimension chain modeling program interface

2. Сгенерировать единственную симуляцию или серию симуляций (количество серий ограничено 500000). Каждая симуляция содержит конкретную комбинацию значений размеров размерной цепи и величину достигаемого замыкающего звена.

Серия содержит вектор значений размеров на каждой симуляции и значение размера

замыкающего звена.

Добавление нового и редактирование существующего размера происходят аналогично предыдущей программе (рис. 5). В частности, как пример, редактируемый размер подчиняется закону асимметричного нормального распределения и имеет номинал 5 мм.

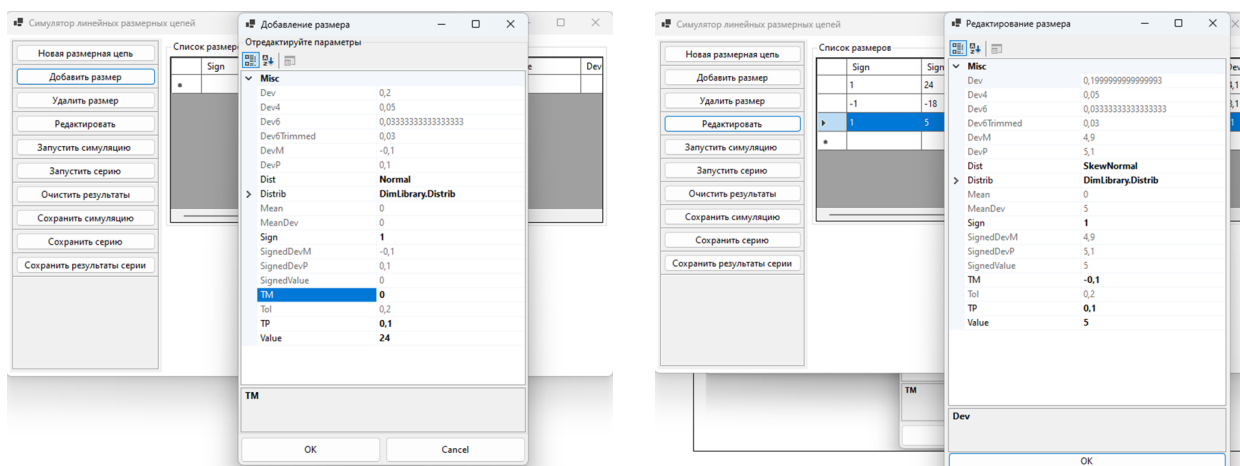


Рисунок 5 – Добавление и редактирование размера

Figure 5 – Adding and editing size

Программа позволяет создать и сохранить единственную комбинацию размеров (серию), как показано на рисунке 6. В справочных целях для

каждого размера цепи приводятся сведения о его номинальном размере и отклонениях, в дополнении к смоделированному значению размера.

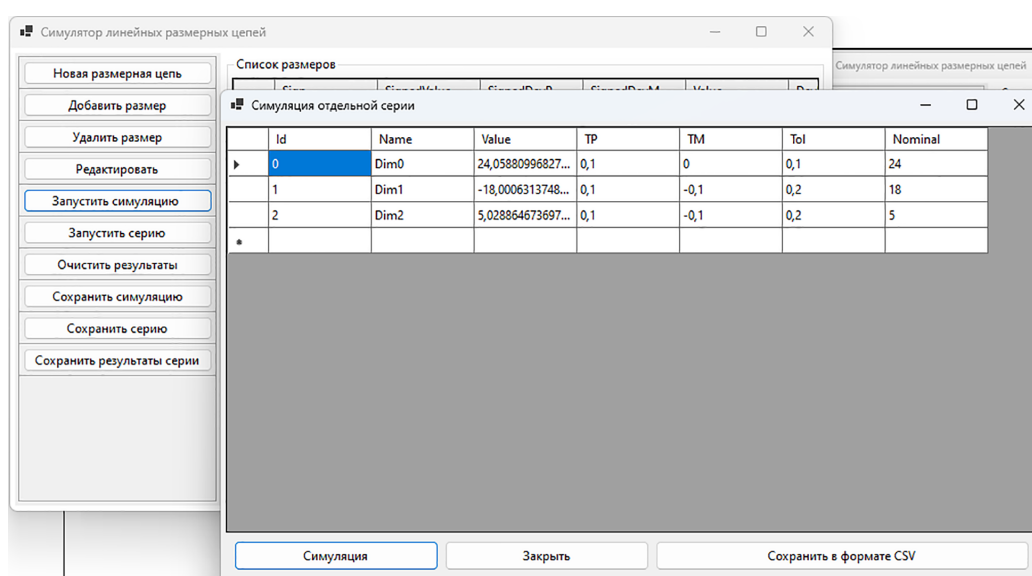


Рисунок 6 – Реализация размерной цепи с тремя размерами

Figure 6 – Implementation of a dimensional chain with three dimensions

Следует отметить, что появление в таблице (см. рис. 6) размеров с «отрицательными» значениями объясняется тем, что для упрощения некоторых расчетов условно размеры с положительным номиналом являются увеличивающими, с отрицательным уменьшающими. Расчеты предельных значений этот факт учитывают.

Кроме этого, рассчитанные допуски на размеры должны быть, как правило, «квалитетными». В этой версии программы подбор квалитетов не реализован и планируется в новой редакции.

Схожим образом происходит серия симуляций. На рисунке 7 представлены результаты серии из 500 симуляций размерной цепи, приведенной на рисунке 6.

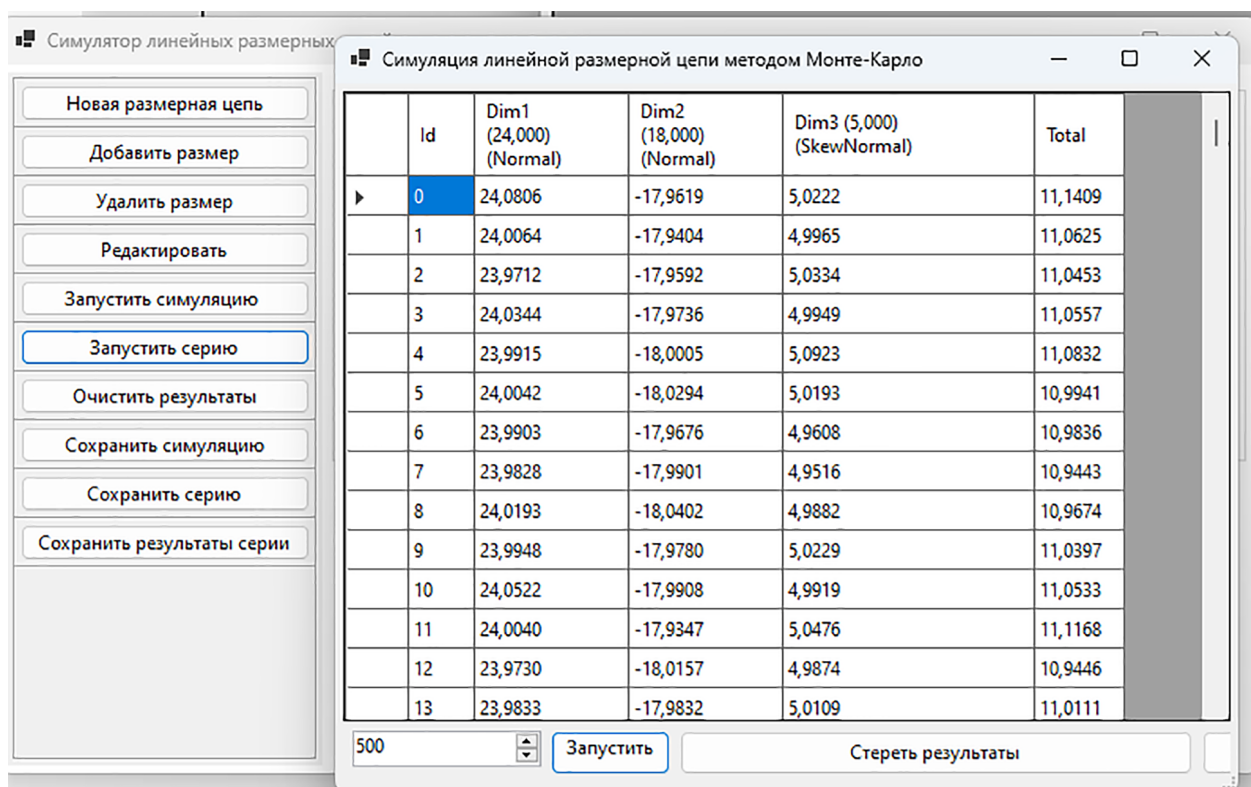


Рисунок 7 – Серия симуляций

Figure 7 – A series of simulations

На рисунке 8 приведена интерпретация результатов симуляции серии из 500 симуляций размерной цепи с построением точечного графика и гистограммы.

Полученные результаты могут быть сохранены в формате CSV для последующего анализа.

Блок-схема работы предлагаемого программного обеспечения приведена на рисунке 9.

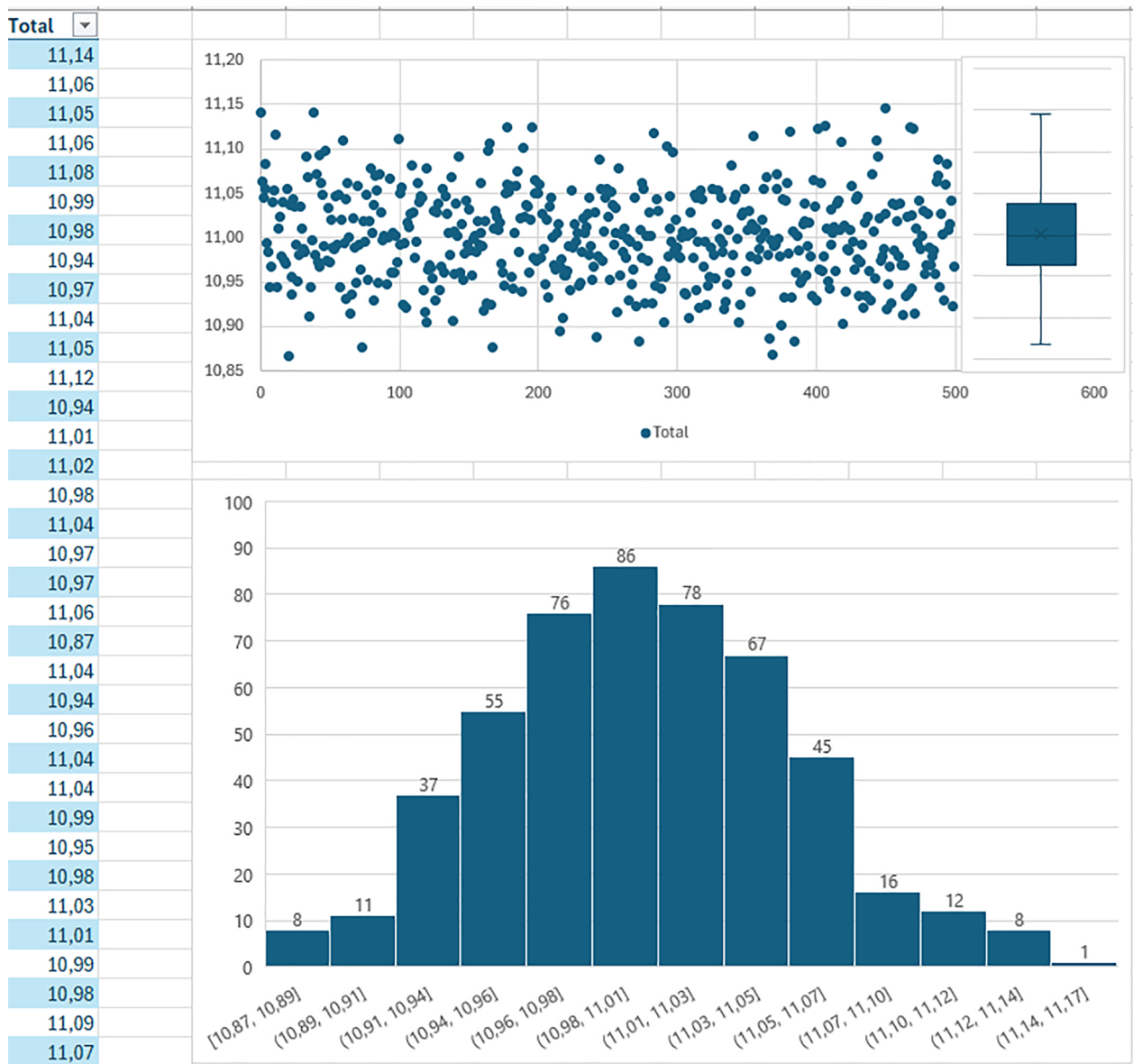


Рисунок 8 – Первичная обработка результатов

Figure 8 – Primary processing of results

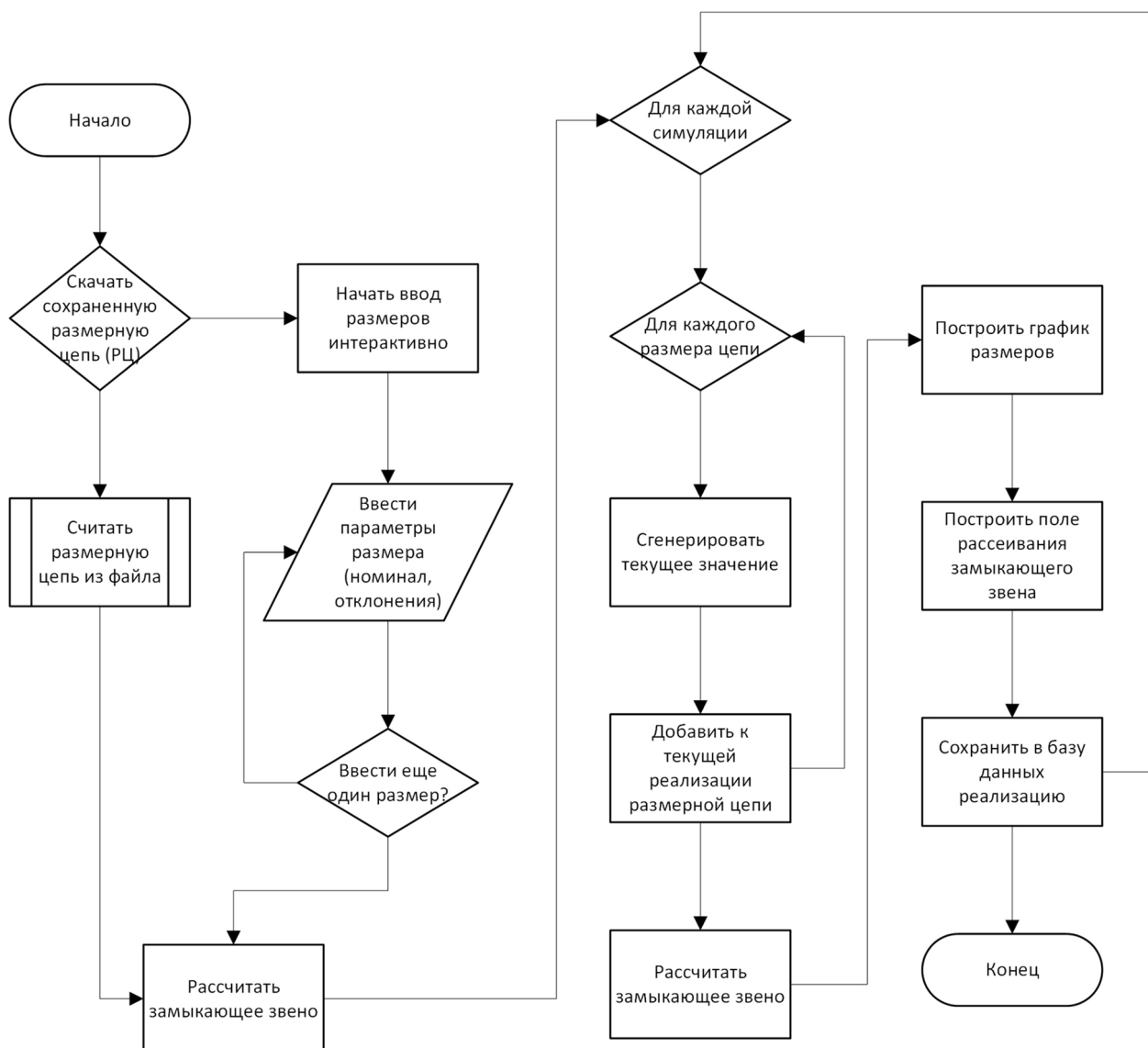


Рисунок 9 – Блок-схема предлагаемого программного обеспечения

Figure 9 – Block diagram of the proposed software

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанное программное обеспечение может быть использовано при моделировании размерных цепей методом Монте-Карло и позволяет оценить параметры замыкающего звена по вероятностным характеристикам входящих в размерную цепь звеньев.

Программу также можно применить:

- для решения обратной задачи, связанной с проверкой изделия на собираемость, исходя из действительных размеров составляющих звеньев сборочной размерной цепи;
- при определении зазора между двумя соседними деталями изделия;

– при расчете размера (позиционного размера), определяющего положение одной детали изделия относительно другой, между которыми располагается ряд других деталей изделия.

Настоящая работа описывает лишь часть, связанную с генерацией размеров конструкторской размерной цепи как случайной величины и оценки параметров замыкающего звена, как реализации суммы этих случайных величин.

Предполагается дополнить программу инструментами решения обратной задачи и реализовать анализ не только линейных, но и плоских размерных цепей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дмитриев, С. И. Размерные цепи, как их рассчитывать? / С. И. Дмитриев, А. М. Усик, Е. А. Евгеньева, В. А. Щербаков, А. И. Самаркин // *Сборка в машиностроении, приборостроении*. – 2024. – №25(9). – С. 422–430. – DOI: 10.36652/0202-3350-2024-25-9-422-430.
2. Дмитриев, С. И. Усик, А. М., Евгеньева, Е. А. Пространственные размерные цепи – это просто или сложно? / С. И. Дмитриев, А. М. Усик, Е. А. Евгеньева // *Сборка в машиностроении, приборостроении*. – 2025. – №26(3). – С. 113–119. – DOI: 10.36652/0202-3350-2025-26-3-113-119.
3. Самаркин, А. И., Самаркина, Е. И., Дмитриев, С. И., Евгеньева, Е. А. Размерные цепи, чего не хватает при автоматизации их расчетов с применением САПР? / А. И. Самаркин, Е. И. Самаркина, С. И. Дмитриев, Е. А. Евгеньева // *Сборка в машиностроении, приборостроении*. – 2024. – №25(12). – С. 566–572. – DOI: 10.36652/0202-3350-2024-25-12-566-572.
4. Плешков, А. А. К вопросу автоматизации синтеза линейных размерных схем и расчета технологических размерных цепей / А. А. Плешков, К. П. Помпеев // Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО. XLVIII научная и учебно-методическая конференция Университета ИТМО, Санкт-Петербург, 29 января – 1 февраля 2019 года. – Санкт-Петербург: Университет ИТМО, 2019. – Том. 2. – С. 130–134.
5. Демин, Ф. И. Автоматизация подготовки исходной информации при расчете точности плоскостных и пространственных размерных цепей / Ф. И. Демин, М. А. Андронов // *Проблемы и перспективы развития двигателестроения*. – Самара : СГАУ, 1999. – Вып. 3. – Ч. 2. – С. 134–141. <https://repo.ssau.ru/jspui/handle/123456789/16146>.
6. Анкин, А. В. Разработка программного обеспечения для расчета пространственной размерной цепи. / А. В. Анкин, Д. Л. Кузьминский // *Известия МГТУ «МАМИ»*. – 2011. – №2(12). – С. 106–110. <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-programmnogo-obespecheniya-dlya-rascheta-prostranstvennoy-razmernoy-tsepi>.
7. Lealin, S. Comparison and evaluation of classical methods of dimensional chains theory and their modern analogues / S. Lealin // *Journal of Engineering Science*. – 2023. – №30(4). – С. 20–30. – DOI: 10.52326/jes.utm.2023.30(4).02.
8. Шаломеев, М. А. Размерный анализ в SolidWorks / М. А. Шаломеев // *САПР и графика*. – 2010. – №(10). – С. 40–42. <https://sapr.ru/article/21721>.
9. Фролов, В. В. Проектный расчет размерных цепей на основе имитационного моделирования / В. В. Фролов // *Вестник Витебского государственного технологического университета*. – 2019. – №37(2). – С. 76–88. – DOI: 10.24411/2079-7958-2019-13709.
10. Хилькевич, Я. М. Методы интервальных расчетов размерных цепей / Я. М. Хилькевич, С. П. Пестов, П. Г. Мазеин // *Известия Челябинского научного центра*. – 2004. – № 1 (22). – С. 107–111. http://www.csc.ac.ru/news/2004_1/.
11. Никитенко, А. В. Повышение эффективности расчетов размерных цепей на основе итерационного алгоритма. / А. В. Никитенко, Е. А. Паничев. // Тенденции формирования науки нового времени: сборник статей Международной научно-практической конференции. 27–28 декабря 2013 г.: в 4 ч. Ч.4. – Уфа: РИЦ БашГУ, 2014. – С. 170–173.
12. Лелюхин, В. Е., Колесникова, О. В. Анализ и расчет размерных цепей на основе графов размерных связей / В. Е. Лелюхин, О. В. Колесникова // *Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета*. – 2015. – №25(4). – С. 29–35. <https://www.dvfu.ru/vestnikis/archive-editions/4-25/4/>.
13. Журавлев, Д. А. Методика пространственного размерного анализа в системе ГеПАРД / Д. А. Журавлев, А. В. Шабалин // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. – 2015. – 8(103). – 58–65. https://journals.istu.edu/vestnik_irtgu/journals/2015/08/articles/09.
14. Журавлев, Д. А., Гаер, М. А., Шабалин, А. В. Взаимное отклонение точек сопрягаемых поверхностей в автоматизированном размерном анализе с пространственными допустимыми отклонениями / Д. А. Журавлев, М. А. Гаер, А. В. Шабалин // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. – 2013. – 12(83). – 69–73. https://journals.istu.edu/vestnik_irtgu/journals/2013/12.

REFERENCES

1. Dmitriev SI, Usik AM, Evgenyeva EA, Shcherbakov VA, Samarkin AI. Dimensionchains, howto calculate them? *Sborka v mashinostroenii, priborostroenii* = *Assembling in Mechanical Engineering, Instrument-Making*. 2024;9:422-430. – DOI: 10.36652/0202-3350-2024-25-9-422 (In Russ).
2. Dmitriev SI, Usik AM, Evgenyeva EA. Spatial dimension chains – is it simple or complicated?

Sborka v mashinostroenii, priborostroenii = Assembling in Mechanical Engineering, Instrument-Making. 2025;26(3):113-119. – DOI: 10.36652/0202-3350-2025-26-3-113-119(In Russ).

3. Samarkin AI, Samarkina EI, Dmitriev SI, Evgenyeva EA. Dimension chains, what is missing when automating their calculations using CAD? *Sborka v mashinostroenii, priborostroenii = Assembling in Mechanical Engineering, Instrument-Making.* 2024;25(12):566-572. – DOI: 10.36652/0202-3350-2024-25-12-566-572(In Russ).

4. Pleshkov AA, Pompeev KP. On the issue of automation of the synthesis of linear dimensional schemes and the calculation of technological dimensional chains. In: *Al'manakh nauchnykh rabot molodykh uchenykh Universiteta ITMO. XLVIII nauchnaya i uchebno-metodicheskaya konferentsiya Universiteta ITMO = Almanac of Scientific Works by Young Scientists of ITMO University.* 48th Scientific and Educational-Methodological Conference of ITMO University, 29 January – 1 February, 2019, St. Petersburg. St. Petersburg: Universitet ITMO; 2019;2:130–134.

5. Demin FI, Andronov MA. Automation of the preparation of initial information when calculating the accuracy of planar and spatial dimensional chains. *Problemy i perspektivy razvitiya dvigatelestroeniya.* Samara: SGAU; 1999;3(2):134-141. <https://repo.ssau.ru/jspui/handle/123456789/16146>.

6. Ankin AV, Kuzminsky DL. Development of software for calculating a spatial dimensional chain. *Izvestiya MGTU «MAMI».* 2011;2(12):106-110. <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-programmnogo-obespecheniya-dlya-rascheta-prostranstvennoy-razmernoy-tsepi>.

7. Lealin S. Comparison and evaluation of classical methods of dimensional chains theory and their modern analogues. *Journal of Engineering Science.* 2023;30(4):20-30. – DOI: 10.52326/jes.utm.2023.30(4).02.

8. Shalomeenko MA. Dimensional Analysis in

SolidWorks. *SAPR i grafika.* 2010;(10):40-42. <https://sapr.ru/article/21721>.

9. Frolov VV. Design calculation of dimensional chains based on simulation modeling. *Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta = Bulletin of Vitebsk State Technological University.* 2019;37(2):76-88. – DOI: 10.24411/2079-7958-2019-13709.

10. Khilkevich YM, Pestov SP, Mazein PG. Methods of interval calculations of dimensional chains. *Izvestiya Chelyabinskogo nauchnogo centra = Proceedings of the Chelyabinsk Scientific Center.* 2004;1(22):107-111. http://www.csc.ac.ru/news/2004_1/.

11. Nikitenko AV, Panichev EA. Improving the efficiency of calculating dimensional chains based on an iterative algorithm. In: *Tendentsii formirovaniya nauki novogo vremeni: sbornik statey Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii = Trends in the Formation of Modern Science: Collection of Articles from the International Scientific and Practical Conference,* 27–28 December, 2013, Ufa. Ufa: RITs BashGU; 2014;4(4):170-173.

12. Lelyukhin VE, Kolesnikova OV. Analysis and calculation of dimensional chains based on dimensional relationship graphs. *Vestnik Inzhenernoi shkoly DVFU = FEFU: School of Engineering Bulletin.* 2015;25(4):29-35. <https://www.dvfu.ru/vestnikis/archive-editions/4-25/4/>.

13. Zhuravlev DA, Shabalin AV. Methodology of spatial dimensional analysis in the GePARD system. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University.* 2015;8(103):58-65. https://journals.istu.edu/vestnik_irgtu/journals/2015/08/articles/09.

14. Zhuravlev DA, Gaer MA, Shabalin AV. Mutual deviation of points of mating surfaces in automated dimensional analysis with spatial tolerances. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University.* 2013;12(83):69-73. https://journals.istu.edu/vestnik_irgtu/journals/2013/12.

Сведения об авторах

Самаркин Александр Иванович

Кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой медицинской информатики и общественного здоровья федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Псковский государственный университет», г. Псков, Российская Федерация

E-mail: alex_samarkin@mail.ru

Information about the authors

Alexander I. Samarkin

Cand. Sc. (Engineering), Assoc. Prof., Head of the Department of Medical Informatics and Public Health of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Pskov State University", Pskov, Russian Federation

E-mail: alex_samarkin@mail.ru

Дмитриев Сергей Иванович

Кандидат технических наук, доцент, заведующий отделением инженерных наук передовой инженерной школы гибридных технологий в станкостроении Союзного государства в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Псковский государственный университет», г. Псков, Российская Федерация

E-mail: dmitrievsi55@gmail.com

Попок Николай Николаевич

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии и оборудования машиностроительного производства учреждения образования «Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой», г. Новополоцк, Республика Беларусь

E-mail: N.popok@psu.by

Хмельницкий Руслан Сергеевич

Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологии и оборудования машиностроительного производства учреждения образования «Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой», г. Новополоцк, Республика Беларусь

E-mail: r.khmialnitski@psu.by

Евгеньева Евгения Анатольевна

Руководитель образовательного департамента передовой инженерной школы гибридных технологий в станкостроении Союзного государства в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Псковский государственный университет», г. Псков, Российская Федерация

E-mail: zhen_sheny@mail.ru

Усик Антон Максимович

Аспирант передовой инженерной школы гибридных технологий в станкостроении Союзного государства в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Псковский государственный университет», г. Псков, Российская Федерация

E-mail: usik.tosha@yandex.ru

Sergey I. Dmitriev

Cand. Sc. (Engineering), Assoc. Prof., Head of the Department of Engineering Sciences of the Advanced Engineering School of Hybrid Technologies in Machine Tool Manufacturing of the Union State at the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Pskov State University", Pskov, Russian Federation

E-mail: dmitrievsi55@gmail.com

Nikolay N. Popok

D. Sc. (Engineering), Prof., Head of the Department of Technology and Equipment for Mechanical Engineering Production of the Educational Institution "Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk", Novopolotsk, Republic of Belarus

E-mail: N.popok@psu.by

Ruslan S. Khmialnitski

Cand. Sc. (Engineering), Assoc. Prof., Associate Professor of the Department of Technology and Equipment for Mechanical Engineering Production of the Educational Institution "Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk", Novopolotsk, Republic of Belarus

E-mail: r.khmialnitski@psu.by

Yevgeniya A. Evgenyeva

Head of the Educational Department of the Advanced Engineering School of Hybrid Technologies in Machine Tool Manufacturing of the Union State at the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Pskov State University, Pskov, Russian Federation

E-mail: zhen_sheny@mail.ru

Anton M. Usik

Postgraduate student of the Advanced Engineering School of Hybrid Technologies in Machine Tool Manufacturing of the Union State at the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Pskov State University", Pskov, Russian Federation

E-mail: usik.tosha@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 09.06.2026.