

МАШИНОВЕДЕНИЕ И МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 658.512

DOI 10.52928/2070-1616-2024-49-1-2-10

**СИСТЕМА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ВЫБОРА СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ
ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ
АДДИТИВНОГО И СУБТРАКТИВНОГО МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРОИЗВОДСТВ
ДЕТАЛЕЙ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ**

д-р техн. наук, проф. Н.Н. ПОПОК
(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)
канд. техн. наук, доц. Н.В. БЕЛЯКОВ
(Витебский государственный технологический университет)

На основе анализа характеристик современных средств измерений, функционирования автоматизированных систем метрологического оснащения и проектирования технологических процессов предложено методическое, алгоритмическое и программное обеспечение процедур выбора средств измерения геометрических величин деталей сложной формы для технологической подготовки аддитивного и субтрактивного машиностроительных производств. Система учитывает вид величины, метрологические характеристики средств измерения, условия измерения и особенности применения, связанные с геометрией поверхностей, технологией их формообразования, доступностью и расположением. Кроме того, она позволяет снизить трудоемкость проектных работ и повысить уровень качества технологических решений. Может использоваться в проектных бюро машиностроительных предприятий; IT-компаниях для создания и совершенствования автоматизированных систем; образовательном процессе для подготовки специалистов в области производства изделий на основе аддитивных и субтрактивных технологий.

Ключевые слова: средство измерения, система автоматизированного проектирования, геометрическая величина, линейный размер, взаимное расположение, классификация, база данных, метрологические характеристики, подготовка производства, машиностроение.

Введение. Современное машиностроительное производство развивается в условиях эпохи четвертой индустриальной революции, характеризующейся кастомизацией продукции и повышением требований к ее качеству. Принципиальное значение при этом играет развитие аддитивных и субтрактивных технологий изготовления машиностроительных изделий. Измерения в современных аддитивных и субтрактивных производственных процессах машиностроения являются источником объективной информации и играют важнейшую роль в управлении качеством продукции. Инженеры-машиностроители в практической работе при проектировании технологических процессов регулярно решают задачи выбора средств измерений геометрических величин.

Для деталей сложной формы, изготавливаемых с помощью аддитивных и субтрактивных технологий, характерным и частым является задание высоких значений точности различных геометрических величин. Особое внимание при этом уделяется точности линейных размеров и допусков взаимного расположения, трудоемкость измерения которых составляет порядка 80% от времени измерения всех геометрических величин. Для межоперационного и окончательного их контроля все более широкое применение находят бесконтактные индуктивные и оптоэлектронные системы (лазерные трекеры, интерферометры, триангуляционные датчики, голографические системы и др.), а также системы датчиков и щупов.

Автоматизация проектных работ, связанных с выбором средств измерения геометрических величин при разработке технологических процессов в машиностроении, может позволить: повысить производительность труда технолога и, как следствие, сократить сроки технологической подготовки производства; повысить уровень качества технологических решений (за счет снижения вероятности ошибок, унификации и типизации).

Анализ работ по автоматизации выбора средств измерения в машиностроении показывает, что в проектной практике находят применение автоматизированные системы метрологического оснащения производства, а также системы автоматизированного проектирования технологических процессов.

Автоматизированные системы метрологического оснащения производства (АИС «Метрконтроль» (ООО «Новософт Развитие», Новосибирск)¹, АИС «Метрология» (АО НПП «КПЗ Тайфун», Калуга)², САМС (ООО «АльтСофт», Москва)³, Global-TLS (ООО «БизнесТехнологии», Санкт-Петербург) и др.) используются для ведения метрологического учета состояния и применения в подразделениях предприятия средств измерений; формирования информации о сроках пригодности средств измерения к применению; использования и анализа информации о применяемых средствах измерения, включая их технические характеристики, методики поверки, сведения об эксплуатационной надежности и др.

¹ URL: <https://www.novosoft.ru/nerpa/asomi/metrology-articles/ais-metrokontrol>

² URL: <https://typhoon-jsc.ru/index.php/production-and-services/engineering/software/metrology>

³ URL: <http://www.altsoft.ru/custom-solution/156-sistema-avtomatizatsii-metrologicheskikh-sluzhb?limitstart=&showall=1>

С помощью систем автоматизированного проектирования технологических процессов формируется комплект технологической документации (операционные, маршрутно-операционные карты, карты контроля и др.), в котором отражены необходимые для реализации технологии средства измерения. Наибольшее распространение на машиностроительных предприятиях получили такие системы автоматизированного проектирования технологических процессов, как ВЕРТИКАЛЬ (АО «Аскон», Санкт-Петербург)⁴, ADEM CAPP (ООО «АДЕМ-инжиниринг», Москва)⁵, КТД вWindchill с модулем CtrlCard (ООО «ПРО Текнолоджиз», Москва)⁶, T-FLEX Технология (ЗАО «ТОП Системы», Москва), ТЕСHCARD (ОДО «Интермех», Минск), SWR-технология (SWR, Москва), СПРУТ ТП (ООО «СПРУТ технология», Набережные Челны), Technologi CS (ГК CSoft, Москва), ТехноПро (КРВТ «Вектор-Альянс», Москва), ПРАМЕНЬ (УП «Институт Белоргстанкинпром», Минск) и др.

При выборе средств измерения геометрических величин с помощью систем автоматизированного проектирования технологических процессов пользователю предлагаются интерфейсы со списком различных универсальных средств измерения, упорядоченных, как правило, по принципу действия. Далее выбор средств измерения осуществляется исходя из опыта и интуиции проектировщика на основе анализа точности измеряемых параметров, возможностей средства измерения, его диапазона измерения и единиц деления шкал. В ряде систем предусматриваются «фильтры» для универсальных средств измерения по виду размера, диапазону и пределу измерения (рисунок 1).

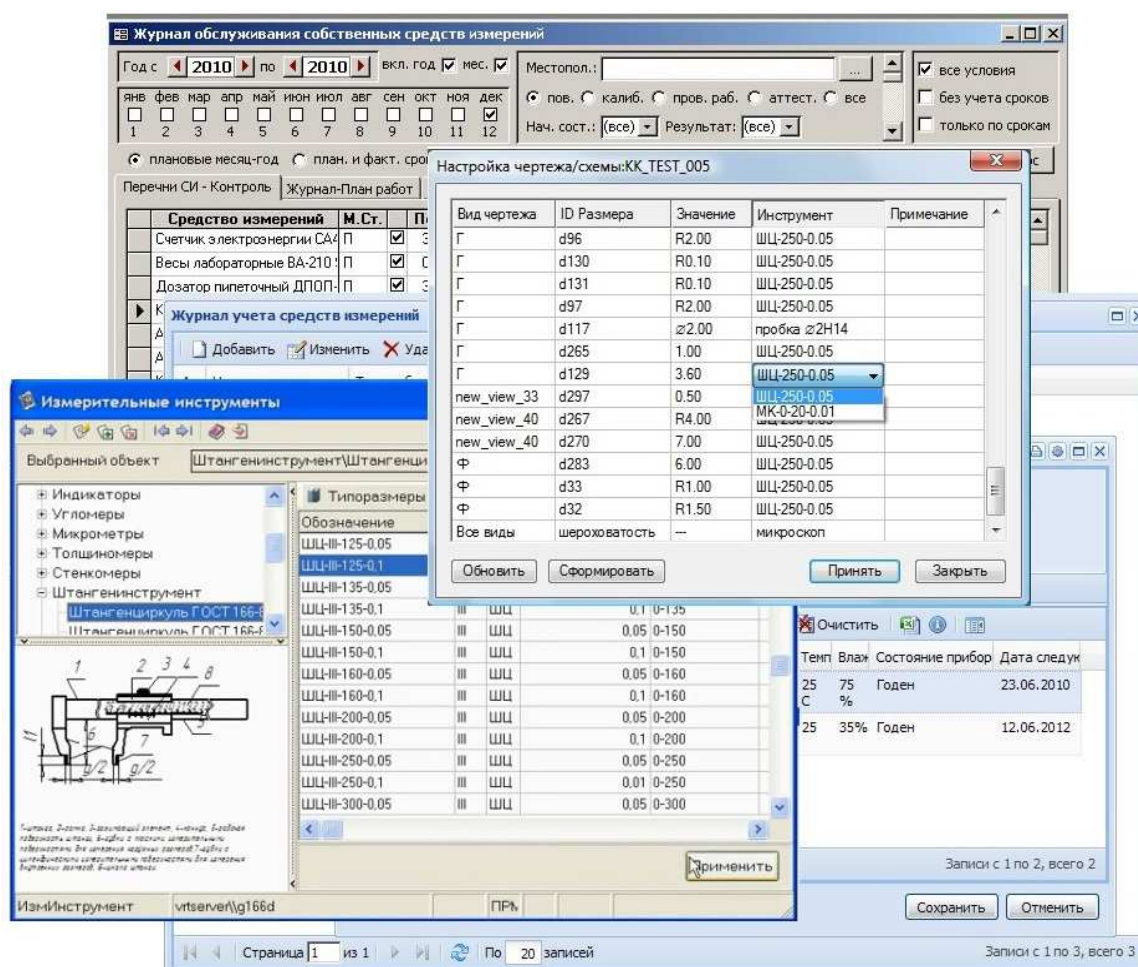


Рисунок 1. – Некоторые интерфейсы Метрконтроль, САМС, ВЕРТИКАЛЬ и CtrlCard

Основой выбора универсальных средств измерений линейных размеров до 500 мм, а также величин радиального и торцевого биений являются рекомендации, изложенные в ГОСТ 8.051-81 и РД 50-98-86. В работе [1] справедливо указывается на ряд очевидных недостатков этих документов: ограничен список средств измерений; не совпадают диапазоны номинальных размеров при нормировании точности с типоразмерами средств

⁴ URL: <https://ascon.ru/products/420/review/>

⁵ URL: <https://adem.ru/products/capp/>

⁶ URL: <https://pro-technologies.ru/product/creo-and-windchill/karta-kontrolya>

измерений; не учитывается специфика измеряемой поверхности; оптимальность выбора одного средства измерения из нескольких рекомендованных.

Однако методики и системы автоматизированного выбора средств измерения, учитывающие вид геометрической величины, метрологические характеристики средств измерения, условия измерения, особенности применения (связанные с видом технологии образования поверхностей, доступностью и их расположением) не получили развития. Их создание требует соответствующего анализа и классификации методов и средств измерений, а также формализации и алгоритмизации процессов их хранения (в базах данных) и выбора.

Таким образом, *целью работы* является создание методического, алгоритмического и программного обеспечения системы автоматизированного выбора средств измерений геометрических величин в современном многоменклатурном аддитивном и субтрактивном машиностроительном производствах деталей сложной формы.

Для достижения указанной цели были поставлены и решены следующие задачи: проведен анализ признаков классификации и классификаторов средств измерения геометрических величин; разработано методическое обеспечение процедур выбора средств измерения различных геометрических величин; разработан алгоритм функционирования и общая структура программного обеспечения по выбору средств их измерения; определена конфигурация технических средств; разработано программное обеспечение, проведены его комплексная отладка и предварительные испытания; разработаны программные документы; проведена опытная эксплуатация системы. При этом использовались методы теоретической метрологии, теорий средств измерений, автоматизации проектирования, системно-структурного анализа и моделирования.

Результаты исследований. Анализ информационных источников, а также опыта работы машиностроительных предприятий показывает, что средства измерений классифицируются по различным признакам. Причем эти признаки, как правило, взаимно независимы и в средстве измерений могут находиться в различных сочетаниях.

К числу признаков классификации средств измерения геометрических величин относятся: вид измеряемых величин; принцип действия; назначение; число проверяемых параметров при одной установке объекта измерения; способ образования показаний; способ получения числового значения измеряемой величины; точность; условия применения; степень защищенности от внешних магнитных и электрических полей; прочность и устойчивость против механических воздействий и перегрузок; стабильность; чувствительность; пределы и диапазоны измерений; роль, выполняемая в системе обеспечения единства измерений; уровень автоматизации; уровень стандартизации; отношение к измеряемой величине.

За основу выбора методов и средств измерения геометрических величин предлагается принять их классификацию по виду. Установлено, что по этому признаку все методы и средства измерения необходимо разделить по виду изменения определяемых величин параметров как поверхностей, так и конструктивных элементов изделий: линейных размеров и взаимного расположения; формы; углов; конусов; резьб; шероховатости и волнистости; зубчатых колес; шпоночных соединений; шлицевых соединений; больших длин и диаметров; толщин покрытий и т.п.

Анализ справочников, сайтов фирм-производителей средств измерения, различных каталогов, а также реестра средств измерения показывает, что к основным средствам измерения линейных размеров относятся: меры длины концевые плоскопараллельные; меры длины штриховые; щупы; калибры; штангенинструменты (штангенциркули, штангенглубиномеры и штангенрейсмасы); микрометрические инструменты (гладкий микрометр, нутромер, глубиномер); рычажно-механические приборы (индикаторы часового типа, измерительные головки с рычажно-зубчатой передачей, головки высокой точности, микрометры рычажные и др.); оптико-механические и оптические приборы (оптиметры, длинномеры оптические, измерительные машины, измерительные микроскопы, проекционные приборы, катетометры, сферометры и др.); пневматические, электромеханические, электрические и радиационные приборы.

Для хранения данных о метрологических характеристиках средств измерения линейных размеров и условиях их применения предлагается использовать общий формат данных, представленный в таблице 1. Конкретный случай применения предусматривает учет геометрии стандартных типовых конструктивных элементов (КЭ), типов размеров (охватывающий, охватываемый, нейтральный), а также видов поверхностей (ось и плоскость).

Таблица 1. – Формат представления данных о методах и средствах измерения линейных размеров

Средство измерения	Коэффициент сложности	Случай применения	Вариант использования	Условия измерения				Диапазон измерения				
				УИ ₁	УИ ₂	...	УИ _m	Д ₁	Д ₂	...	Д _r	
СИ ₁	Сл1	СП ₁₁	ВИ ₁₁									
			...									
			ВИ _{1p}									
			...									
...									
СИ _n	СЛ _n									

Как было отмечено выше, принципиальную роль в алгоритмах по выбору средств измерений линейных размеров и допусков взаимного расположения играет ввод исходных данных. Согласно предлагаемому алгоритму выбора средств измерения линейных размеров (рисунок 2) ввод исходных данных предусматривает зада-

ние типа размера (охватывающий, охватываемый, нейтральный), а также класса, подкласса, вида и типа поверхности(ей), которую(ые) ориентирует рассматриваемый размер. В том случае, если задается нейтральный размер, то необходимо ввести виды поверхностей, которые ориентируют размер. Предусматривается отображение поверхностей и размеров, их ориентирующих. Далее необходимо ввести номинальное значение размера, допуск, вариант использования и условия измерений. Вариантами использования могут быть: в руках, на стойке, прочих приспособлениях и др. Условиями измерения являются: температурный режим, установочный узел и т.д. Диапазон, условия измерений и соответствующие погрешности задаются в режиме администратора по паспортным данным средства измерения.

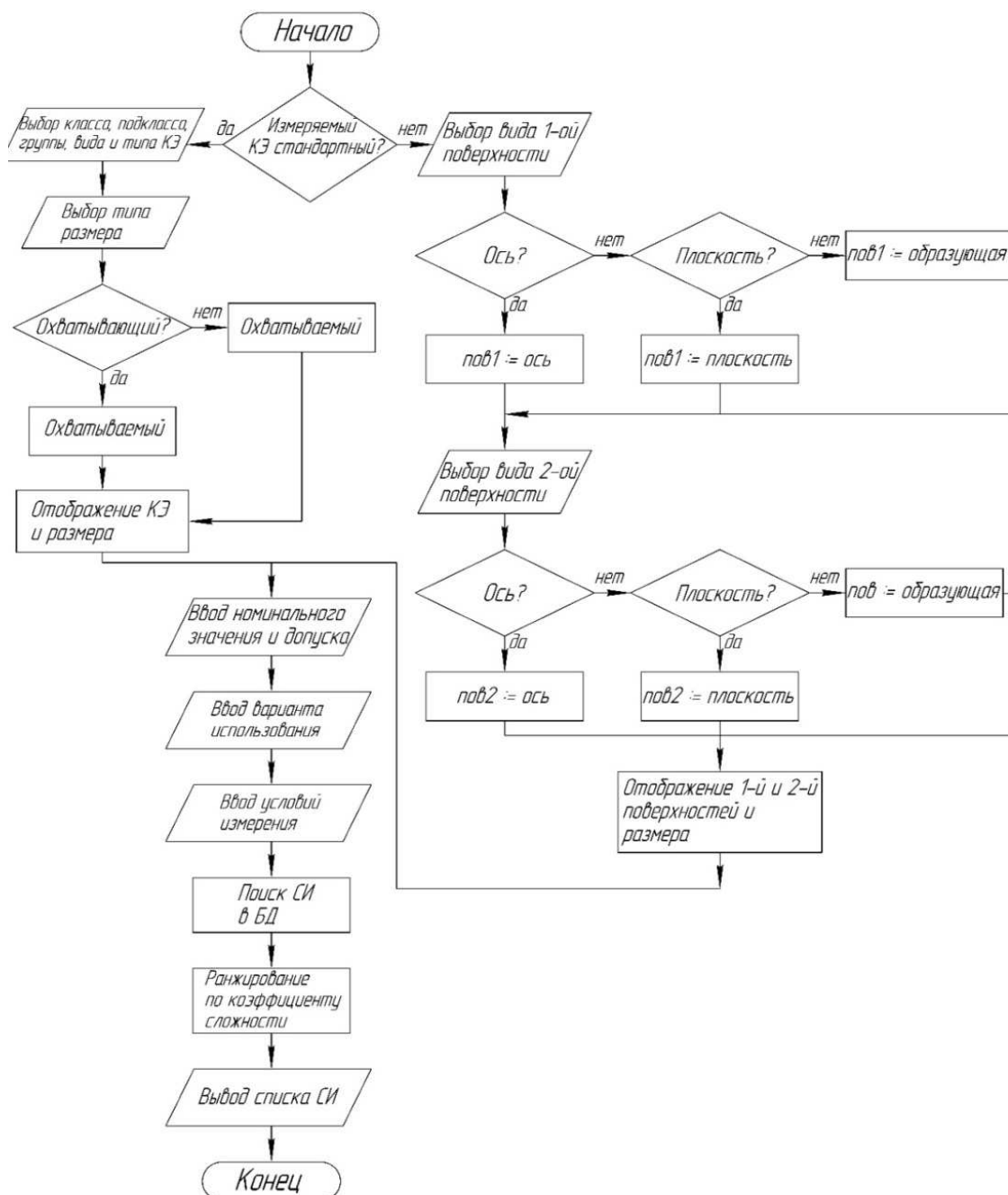


Рисунок 2. – Алгоритм выбора средств измерений линейных размеров

Согласно предлагаемому алгоритму выбора средств измерения допусков взаимного расположения (рисунок 3) ввод исходных данных предусматривает задание вида допуска (перпендикулярность, параллельность, наклон, симметричность, соосность, пересечение осей, позиционный допуск), вида поверхности (ось или плоскость). Для удобства ввода предусматривается отображение поверхностей и допусков. Далее необходимо ввести номинальное значение допуска.

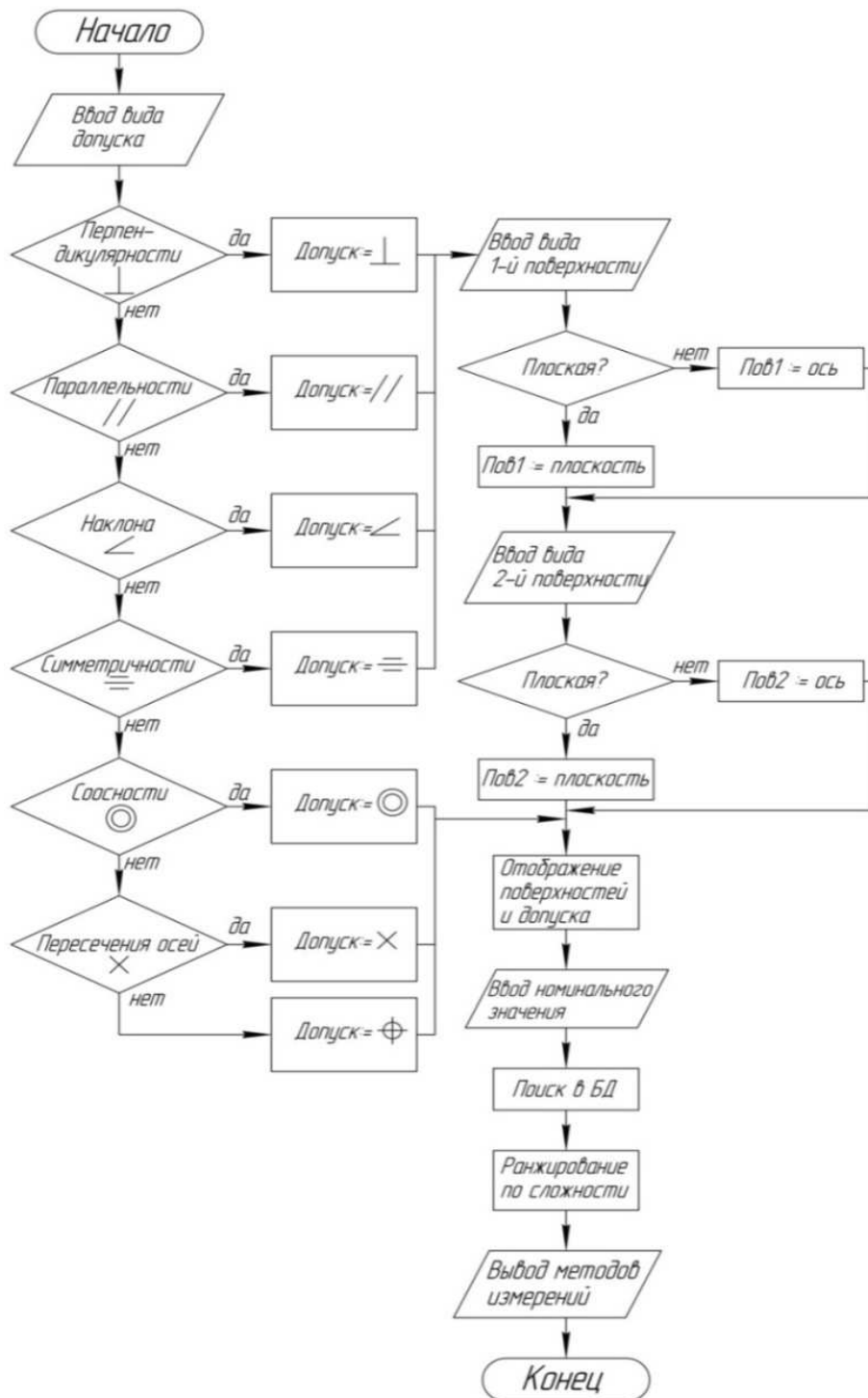


Рисунок 3. – Алгоритм выбора средств измерения допусков взаимного расположения

Средства измерения допусков взаимного расположения предлагается классифицировать по следующим признакам: вид допуска (параллельность, перпендикулярность, соосность, симметричность, наклон, пересечение осей, биение); вид конструктивного элемента (ось, плоскость); применяемые приборы (индикаторы, щупы, микрометры и др.).

Аналогичные исследования проведены по всем указанным выше геометрическим величинам.

Для хранения информации о средствах измерения с помощью системы управления базами данных «Microsoft Access 2015» организован ряд баз данных, создан массив соответствующих таблиц («Conn_non_typical_pov», «Conn_tool_dop_param», «Conn_vidrov_podklass», «Dop_param», «Klass_pov», «Pictures_variants», «Podklass_pov», «Pogr_izm_LIN», «Pred_pogr», «Range», «Tools», «Type_izm», «Type_pov», «Vid_pov», «Vid_razmer» и т.д.), а также определена структура полей (рисунки 4 и 5, таблица 2).

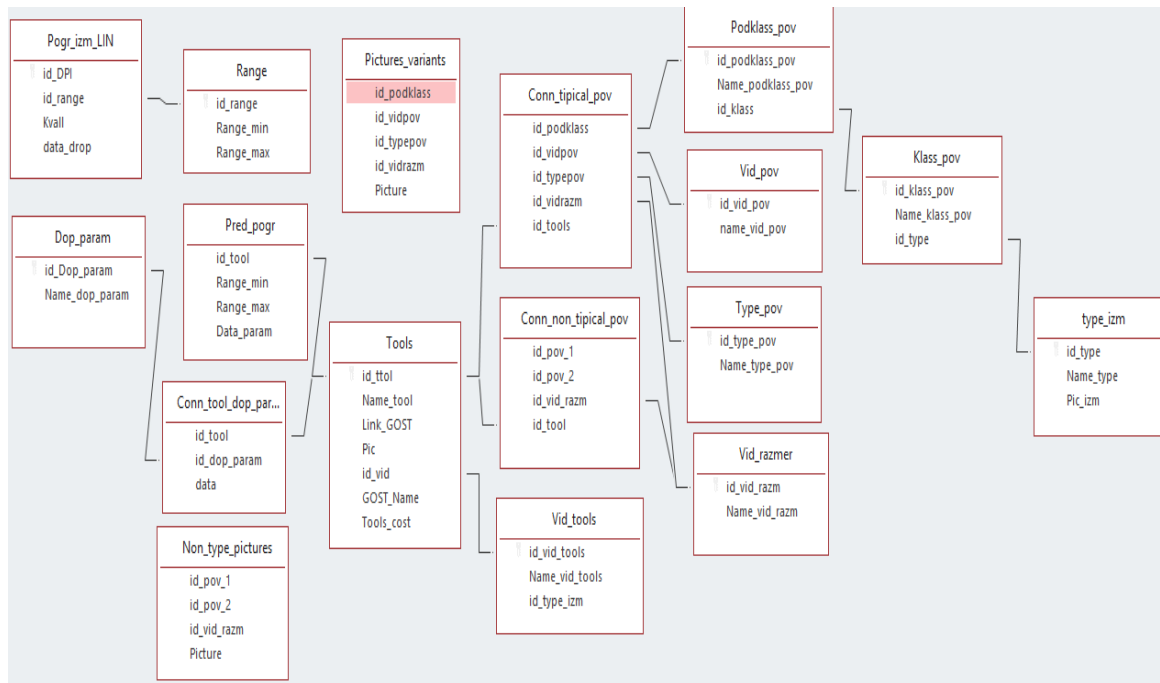


Рисунок 4. – Структура базы данных для выбора средств измерения линейных размеров

Имя поля	Тип данных
id_tool	Числовой
id_dop_param	Числовой
data	Длинный текст

Имя поля	Тип данных
id_Dop_param	Счетчик
Name_dop_param	Короткий текст

Имя поля	Тип данных
id_DPI	Счетчик
id_range	Числовой
Kvall	Числовой
data_drop	Короткий текст

Имя поля	Тип данных
id_tool	Числовой
Range_min	Числовой
Range_max	Числовой
Data_param	Короткий текст

Имя поля	Тип данных
id_range	Счетчик
Range_min	Числовой
Range_max	Числовой

Имя поля	Тип данных
id_podklass	Числовой
id_vidpov	Числовой
id_typepov	Числовой
id_vidrazm	Числовой
Picture	Поле объекта OLE

Имя поля	Тип данных
id_podklass_pov	Счетчик
Name_podklass_pov	Короткий текст
id_klass	Числовой

Имя поля	Тип данных
id_podklass	Числовой
id_vidpov	Числовой
id_typepov	Числовой
id_vidrazm	Числовой
id_tools	Числовой

Имя поля	Тип данных
id_type	Счетчик
Name_type	Короткий текст
Pic_izm	Поле объекта OLE

Имя поля	Тип данных
id_vid_pov	Счетчик
name_vid_pov	Короткий текст

Рисунок 5. – Элементы массива таблиц и полей базы данных выбора средств метрологического оснащения измерений линейных размеров

Так, например, таблица «Conn_non_tirical_pov» содержит информацию о средствах измерения нестандартных конструктивных элементов. Поля, их типы и назначение представлены в таблице 2.

Таблица 2. – Структура полей таблицы «Conn_non_tirical_pov»

Имя поля	Тип данных	Поле		Описание
		свойство	значение	
id_pov_1	Числовой	Размер поля Новые значения Индекс	Длинное целое Нет Нет	Внешний ключ для связи с таблицей «Non_tirical_vid_pov»
id_pov_2	Числовой	Размер поля Обязательное поле Индекс	Длинное целое Нет Нет	Внешний ключ для связи с таблицей «Non_tirical_vid_pov»
id_vid_razm	Числовой	Размер поля Новые значения Индекс	Длинное целое Нет Нет	Внешний ключ для связи с таблицей «Vid_gazmer»
id_tool	Числовой	Размер поля Новые значения Индекс	Длинное целое Нет Нет	Внешний ключ для связи с таблицей «Tools»

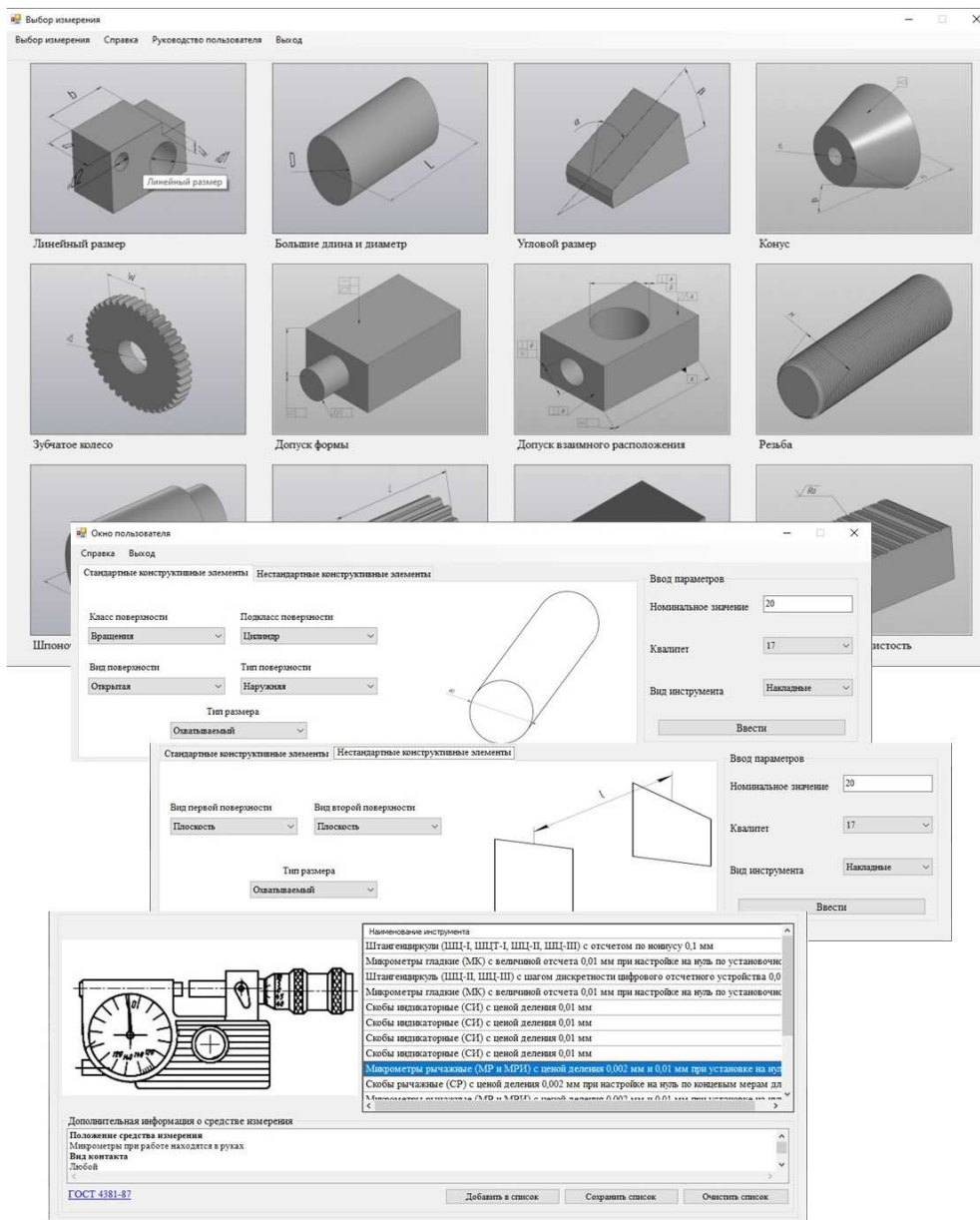


Рисунок 6. – Элементы исходного интерфейса, интерфейсов ввода исходных параметров линейных размеров и работы с wybranнными средствами измерений

Структурно программное обеспечение представляет собой реляционные базы данных и саму программу, предназначенную для обработки и выдачи информации на основе заданных параметров. Программное обеспечение разработано на языке C# в виртуальной среде Microsoft Visual Studio 2019 с использованием стандартных элементов и математических функций. Функционирование программного обеспечения основано на обработке программой информации, введенной пользователем, формированием запроса к встроенной базе данных с помощью декларативного языка программирования SQL и выводом информации из базы на экран пользователя.

Исходное окно программы представляет собой набор интерактивных закладок, соответствующих наименованиям измеряемых величин (см. рисунок 6). После активации нужной закладки пользователю предлагается ввести ряд исходных информативных параметров. Так, для выбора средств метрологического оснащения измерений линейных размеров ввод исходных данных предусматривает задание типа размера, геометрии поверхностей, номинального значения размера, допуска, варианта использования и условий измерений. Предусматривается отображение поверхностей и размеров их ориентирующих. Диапазон, условия измерений и соответствующие погрешности задаются в режиме администратора по паспортным данным средства измерения. Работой алгоритмов предусматривается поиск в базах данных средств измерения по заданным параметрам ввода, их ранжирование и вывод по возрастанию коэффициента сложности.

Заключение. В ходе исследований проведен анализ характеристик современных средств измерений геометрических величин, а также функционирования автоматизированных систем метрологического оснащения и проектирования технологических процессов в аддитивном и субтрактивном машиностроительных производствах, который за счет классификации методов и средств измерений по различным признакам, выявления метрологических характеристик и условий применения создал возможность для формализации и алгоритмизации процессов их хранения (в базах данных) и выбора.

На основе анализа предложено методическое и алгоритмическое обеспечение процедур выбора средств измерения геометрических величин деталей сложной формы для технологической подготовки аддитивного и субтрактивного машиностроительных производств. Предложены принципиальные алгоритмы работы системы в целом, модели соответствующих подсистем (линейные размеры, взаимное расположение, форма, углы, конусы, резьбы, шероховатости и волнистости, зубчатые колеса, шпоночные соединения, шлицевые соединения, большие длины и диаметры, толщины покрытий), а также определена структура входных и выходных данных, предложены модели структур, таблиц и полей баз данных. Особенностью разработанного методического и алгоритмического обеспечения является учет видов геометрических величины, метрологических характеристик средств измерения, условий измерения и особенностей применения, связанных с видом технологии образования поверхностей, доступностью и расположением.

Представление разработанного методического и алгоритмического обеспечения на языке теории графов, алгебры логики, теории множеств позволило создать программное обеспечение системы автоматизированного выбора средств измерений геометрических величин изделий сложной формы в многоменклатурном аддитивном и субтрактивном машиностроительном производстве позволяющее снизить трудоемкость проектных работ и повысить уровень качества технологических решений. Проведены предварительные испытания и опытная эксплуатация системы в учебном процессе, что доказало работоспособность методик и алгоритмов.

Разработки могут использоваться в проектных бюро машиностроительных предприятий при разработке технологических процессов аддитивных и субтрактивных производств; в организациях специализирующихся на разработке систем автоматизированного проектирования технологических процессов и автоматизированных систем метрологического оснащения производства для совершенствования подсистем выбора средств измерений; в учебном процессе для подготовки специалистов в области технологии машиностроения и производства изделий на основе трехмерных технологий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Глубоков А.В., Ястребов Т.С. Проблемы автоматизации выбора универсальных средств измерения линейных размеров / А. В. Глубоков, Т. С. Ястребов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2018. – № 4(26). – С. 37–42. DOI 10.21685/2307-5538-2018-4-6

REFERENCES

1. Glubokov, A.V. & Yastrebov, T.S. (2018). Problemy avtomatizatsii vybora universal'nykh sredstv izmereniya lineinykh razmerov [Problems of automation of the selection of universal measuring instruments of linear dimensions]. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measuring. Monitoring. Management. Control], 4(26), 37-42. DOI 10.21685/2307-5538-2018-4-6 (In Russ., abstr. in Engl.)

Поступила 21.11.2023

**AUTOMATED SELECTION SYSTEM FOR MEASURING GEOMETRIC VALUES
FOR TECHNOLOGICAL PREPARATION OF ADDITIVE AND SUBTRACTIVE
ENGINEERING INDUSTRIES DETAILS OF COMPLEX SHAPE**

N. ПОРОК

(Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk)

N. BELYAKOV

(Vitebsk State Technological University)

Based on the analysis of the characteristics of modern measuring instruments, the functioning of automated systems of metrological equipment and the design of technological processes, methodological, algorithmic and software procedures for the selection of measuring instruments of geometric quantities of parts of complex shape for the technological preparation of additive and subtractive machine-building industries are proposed, taking into account the type of magnitude, metrological characteristics of measuring instruments, measurement conditions and application features related to the geometry of surfaces, the technology of their form formation, accessibility and location, which allows to reduce the complexity of design work and improve the quality of technological solutions. The system can be used in design bureaus of machine-building enterprises; IT companies for the creation and improvement of automated systems; educational process for the training of specialists in the production of products based on additive and subtractive technologies.

Keywords: *measuring instrument, computer-aided design system, geometric magnitude, linear size, relative position, classification, database, metrological characteristics, production preparation, mechanical engineering.*