

УДК 621.817

DOI: 10.22213/2413-1172-2024-2-37-48

## Программный комплекс SPDIAL+\*

**Е. С. Трубачев**, доктор технических наук, профессор, Институт механики имени профессора Гольдфарба В. И. ИжГТУ имени М. Т. Калашникова; ООО «МИП «Механик», Ижевск, Россия

*Спироидные передачи являются прямым конкурентом традиционным техническим решениям – червячным и гипоидным передачам – и хорошо зарекомендовали себя в большом числе конкретных технических приложений, обеспечивая большую прочность, меньшие размеры, большее удобство в производстве. Однако процесс их проектирования в значительно меньшей степени подлежит типизации и стандартизации, доведению до простых инженерных методик. Фактически эффективные решения можно получить, исследуя пространство параметров. Незаменимым инструментом этого является автоматизированная система проектирования и исследования. Статья представляет обзор такой системы для передач червячного типа (червячных, QN-передач, спироидных) SPDIAL+, разработанной в Ижевской научной школе в области зубчатых передач и редукторов. В частности рассмотрены возможности проектирования сопряженной передачи, выбора параметров нарезания колеса, анализа передачи при действии погрешностей и нагрузки. Показаны роль и результаты применения программы как главного инструмента исследований, проектирования и создания инноваций – новых разновидностей передач, новых их свойств в конкретных приложениях, новых способах и приемов обработки зубьев.*

**Ключевые слова:** САПР зубчатых передач, спироидная передача, червячная передача.

### Введение

**А**втоматизированное проектирование зубчатых передач, использующее более адекватные и более сложные современные расчетные модели, чем модели, применяемые при инженерном (в том числе стандартном) проектировании, дает возможность увидеть принимаемое решение в большей глубине и разнообразии оценок – компоновочных, эксплуатационных, производственных. Соответствующие программные комплексы обычно являются продуктом разработки ведущих научных центров [1–4]. Одним из примеров является программный комплекс SPDIAL+, разработанный в Ижевской зубчатой научной школе.

**Цель** статьи – анализ функционала программного комплекса SPDIAL+ для расширения потребительских свойств и связанных с ними возможностей улучшения, исследования и разработки инноваций в зацеплениях червячного типа.

### Краткая предыстория разработки и структура комплекса в целом

Профессор В. И. Гольдфарб сформулировал принципы организации САПР червячных передач общего вида [5]. Принципы и методы расчета, разработанные В. И. Гольдфарбом и под его руководством, стали основой для предтечи комплекса SPDIAL+ – САПР SPDIAL, разработанной инженером И. П. Несмеловым в начале 80-х гг.

XX века (Гольдфарб В. И., Несмелов И. П. Диалоговая система автоматизированного проектирования спироидных передач // Автоматизированное проектирование механических передач : тезисы докладов научно-технической конференции. Ижевск, 1982). Комплекс SPDIAL+ не является прямым продолжением САПР SPDIAL или его новой, более продвинутой, версией, программы не имеют общих разработчиков, процедур, архитектуры и большей части применяемых методов. Однако есть и общие черты:

- нацеленность на комплексное решение задач проектирования;
- декомпозиция процесса проектирования на этапы.

Разработка SPDIAL+ стартовала в середине 90-х гг. XX века. В качестве платформы для новой программы была выбрана среда Borland Delphi. Программа реализует большие стадии проектирования, рассмотренные в следующих разделах статьи:

- проектирование сопряженной передачи;
- выбор параметров нарезания зубьев колеса;
- моделирование передачи с погрешностями изготовления и монтажа;
- моделирование распределения нагрузки между зубьями.

Как можно видеть на рисунке 1, главная форма (окно) программы содержит две постоянные панели сверху.

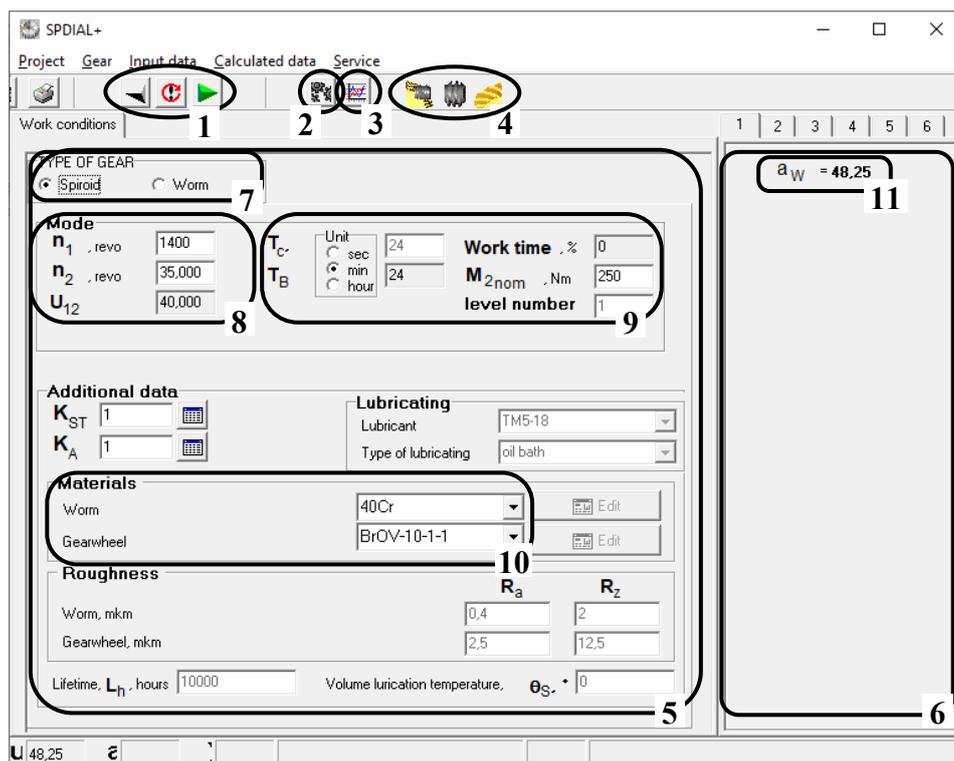


Рис. 1. Стартовое окно – задание режима работы

Fig. 1. Initial window - input of duty mode

Панель меню:

*Project* – вызов группы передач, объединенных одной проектной задачей;

*Gear* – загрузка конкретной передачи из базы;

*Input data* и *Calculated data* – переход на интересующий этап;

*Service* – настройки расчета.

Панель кнопок:

печать;

назад – обновить – вперед (поз. 1, рис. 1);

вызов окна выбора параметров нарезания зубьев колеса (поз. 2);

вызов окна расчета передачи с учетом погрешностей и нагрузки (поз. 3);

вызов 3D-изображений передачи, червяка и колеса (поз. 4).

Главная форма разбита на две зоны – задания данных (слева, поз. 5) и расчетных параметров (справа, поз. 6).

### Проектирование сопряженной передачи

На этой стадии рассматривается теоретически абсолютно точная и жесткая спироидная или червячная передача с линейным контактом, образованная по второму принципу Оливье, то есть одно из звеньев (червяк) является исходным огибаемым (производящим) звеном, второе (колесо) образуется в результате огибания первого.

Процесс проектирования такой передачи разбит на этапы:

1) задание режима работы передачи, вида передачи, материалов звеньев;

2) выбор схемы передачи;

3) выбор и расчет геометрии звеньев;

4) расчет геометрических и кинематических характеристик зацепления;

5) расчет сил в зацеплении, КПД и нагрузочной способности передачи.

*Задание режима работы передачи, вида передачи, материалов звеньев*

Как видно на рисунке 1, среди исходных данных имеется выбор вида передачи – спироидная или червячная (поз. 7), частот вращения (поз. 8) и материалов звеньев (поз. 9), ступеней нагружения (поз. 10) и других параметров, определяющих размер передачи, – рекомендуемое межосевое расстояние (поз. 11).

*Выбор схемы передачи*

Схема передачи – параметры геометрии и расположения начальных поверхностей и передаточное отношение (рис. 2). Условия, положенные в основу расчета, исходят из требования стандарта «Передачи зубчатые. Общие термины, определения и обозначения» (ГОСТ 16530–83): начальные поверхности должны касаться друг друга, и для передачи на перекрещивающихся осях в точке касания вектор относительной скорости должен касаться линии зубьев. Соответствующий математический аппарат является

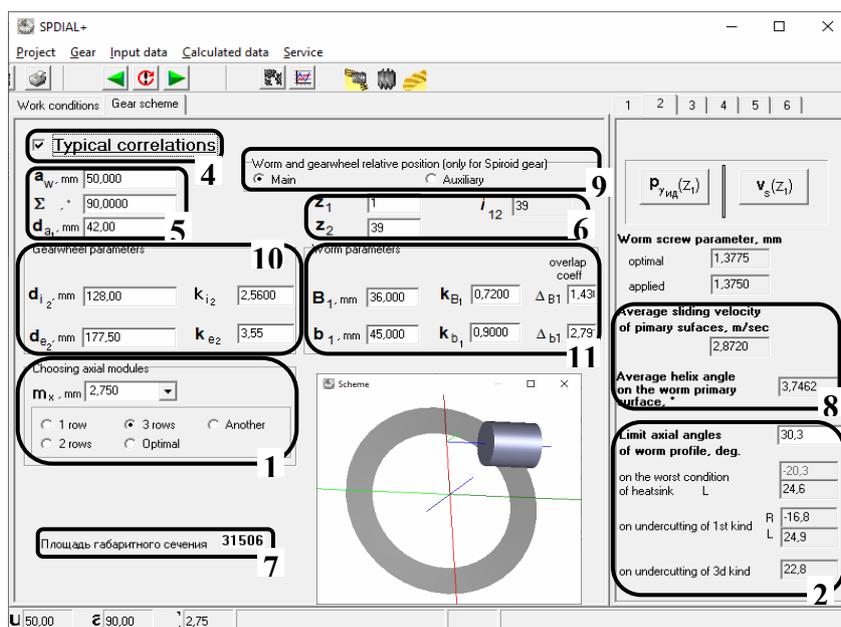
простым и изложен в [6]. Дополнительными параметрами, определяемыми на этом этапе, являются:

- осевой модуль червяка (рис. 2, поз. 1), определяющий в сочетании с числом заходов червяка направление линии зубьев-витков; имеется возможность выбора стандартного, оптимального или произвольного модуля;
- предельные по подрезанию углы профиля червяка (поз. 2) [7].

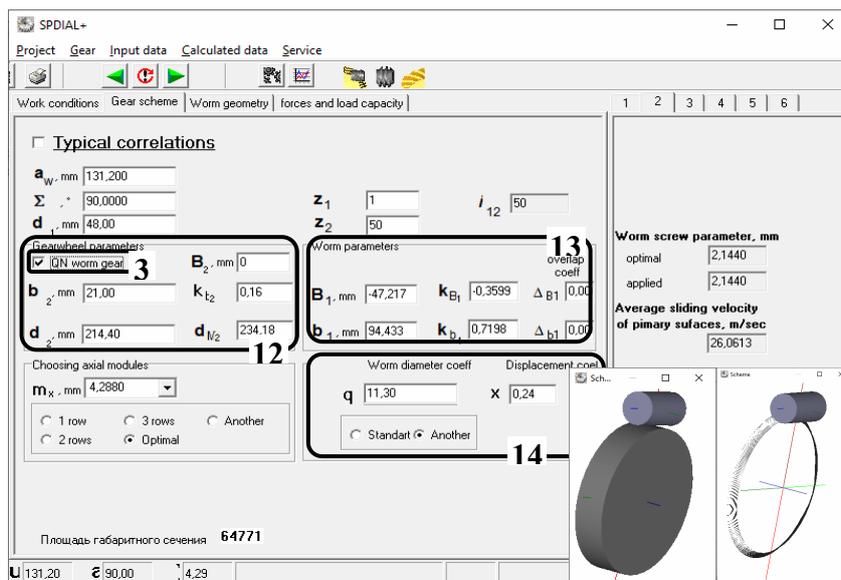
Для червячной передачи имеется возможность выбора ее QN-разновидности (Патент 2 136 987 РФ, МПК F16H 1/16 / (РФ). – № 99103702/28

Червячная цилиндрическая передача / Егоров И. М., Иофик Б. Ш. 1999) (поз. 3). Общие для разновидностей передач параметры и оценки (кроме указанных выше поз. 1 и 2):

- возможность применения стандартного соотношения параметров (поз. 4);
- расположение осей звеньев, диаметр червяка (поз. 5), числа заходов червяка и зубьев колеса, дающих передаточное число (поз. 6);
- площадь в плане, занимаемая передачей (поз. 7);
- предварительные оценки скольжения и угла подъема витков червяка (поз. 8).



a



b

Рис. 2. Окно выбора схемы передачи: а – спиroidной; б – червячной и QN-передачи

Fig. 2. The window of the gear scheme choice: a - for spiroid gear; b - for worm and QN gears gear

Параметры для спироидной передачи (рис. 2, *a*):

- выбор основного (с большим КПД и нагрузочной способностью) или вспомогательного относительного расположения звеньев (ГОСТ 22850–77 «Передачи спироидные. Термины, определения и обозначения») (поз. 9).

- две дублирующие друг друга группы параметров, определяющих размеры передачи в плане и ширину венца – диаметры колеса (поз. 10) или длина червяка и удаление его от межосевой линии (поз. 11).

Параметры для червячной (в том числе QN) передачи (рис. 2, *b*):

- параметры венца колеса (поз. 12) – ширина, делительный и наибольший диаметры, удаление венца от межосевой линии (для QN-передачи);

- дополнительные параметры червяка (поз. 13) – длина и удаление от межосевой линии (обычно половина длины);

- коэффициент диаметра (опция – стандартное или произвольное значения) и коэффициент смещения связаны друг с другом и с диаметром червяка и межосевыми расстоянием и углом (поз. 14).

Выбор схемы передачи определяет ее внешние размеры, размеры каждого из звеньев и их относительное расположение, передаточное отношение, осевой модуль червяка, опасность подрезания, будущий уровень скольжения в зацеплении, а также некоторые исходные данные для последующих этапов расчета. Делая этот выбор, пользователь обычно руководствуется опытом (отталкивается от имеющегося аналога) и компоновочными требованиями.

#### *Выбор и расчет геометрии звеньев*

Практический смысл этого этапа для пользователя – определить параметры геометрии и, соответственно, нарезания исходного звена передачи – червяка, которые выносятся на чертежи. Известно много стандартных видов червяков (ГОСТ 18498–89 «Передачи червячные. Термины, определения и обозначения»; ГОСТ 22850–77 «Передачи спироидные. Термины, определения и обозначения») (рис. 3, поз. 1). Традиционным унифицирующим расчет передач приемом является приведение всех их к червяку, заданному винтовым движением осевого профиля; в основу расчетов положены методы, изложенные в [8]. Поэтому главным расчетным смыслом этого этапа является формирование сплайн-интерполятора, необходимого для дальнейших этапов, рассчитывающего параметры геометрии витков (координату, угол и радиус осевого профиля).

Параметры, задаваемые в левой области, поделены на три зависимые друг от друга группы, пользоваться можно любой из них, редактируя:

- осевой профиль (более удобное и обычное редактирование (поз. 2);

- нормальный профиль впадины (профиль резца для прорезки витка) (поз. 3);

- профиль инструмента (поз. 4).

Заданная высота профиля (поз. 5) окончательно определяет угол подъема витка червяка и параметры заготовки колеса (поз. 6).

По параметрам, заданным на последних двух этапах, однозначно определяются поверхности зубьев колеса. Для этого используется интерполяционный метод (Трубачев Е. С., Береснева А. В., Монаков А. В. Расчет координат точек поверхности, образованной геликоидом // Сборник докладов научного семинара учебно-научного центра зубчатых передач и редукторостроения «Проблемы совершенствования передач зацеплением», Ижевск – Москва, 2000).

В результате выполнения этапа пользователь может оценить следующее (рис. 3):

- наличие и степень заострения и подрезания витков червяка и зубьев колеса;

- соотношения высоты витка и тела червяка.

*Расчет геометрических и кинематических характеристик зацепления, сил, действующих в зацеплении, КПД и нагрузочной способности передачи*

Два этапа объединены в описании, они неразрывно связаны (геометро-кинематические характеристики не столько важны сами по себе, сколько как основа для эксплуатационных оценок передачи), и, во-вторых, здесь почти не задается данных, но выдается большая часть оценок передачи, причем главных, наиболее значимых для инженера-проектировщика или исследователя. Вводимые здесь данные (рис. 4, поз. 1) являются настроечными коэффициентами, входящими в модели разных видов контактного разрушения. Они предлагаются программой по умолчанию и имеют возможность корректировки проектировщиком по конкретному опыту эксплуатации и испытаний передач. Оценки сгруппированы для зацеплений левой и правой боковых поверхностей. Для спироидной и QN-передачи группы оценок всегда получают разными в силу присущей передачам асимметрии; для классической червячной передачи они обычно одинаковы, но могут и различаться, например, при придании разных углов профиля или шага разноименным боковым поверхностям.

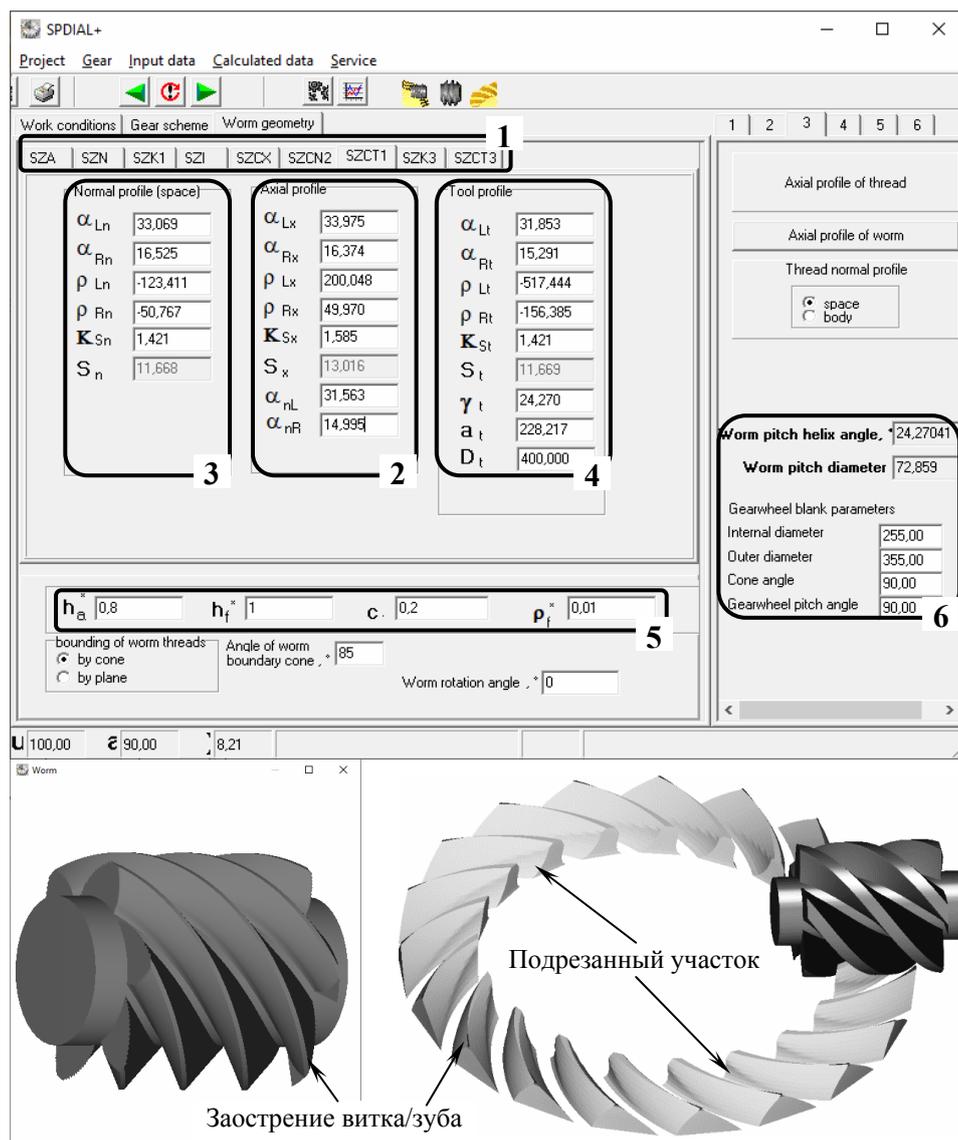


Рис. 3. Окна выбора и расчета геометрии звеньев

Fig. 3. Windows of the links geometry choice and calculation

Линии сопряженного контакта рассчитываются по итерационному алгоритму с использованием кинематического метода [9]. Геометро-кинематические характеристики (Трубачев Е. С. К расчету геометро-кинематических показателей зацепления спироидных передач при произвольном расположении осей // Теория и практика зубчатых передач : труды международной конференции. 1996).

Суммарная длина линий сопряженного контакта, скорость скольжения, скорости перемещения точек контакта по сопряженным поверхностям (параметр, в значительной мере определяющий стойкость зацепления к заеданию и износу, так как определяет продолжительность воздействия трения на контактную поверхность), угол между касательной к линии контакта и вектором скорости скольжения (име-

ет расчетную связь с предыдущими параметрами и также влияет на качество зацепления), приведенные радиусы кривизны сопряженных поверхностей (рис. 4, поз. 2).

В основу расчета сил (поз. 3), действующих в зацеплении, и КПД передачи (поз. 4) положен метод, изложенный в [10]. Для оценки нагрузочных характеристик (поз. 5) – стойкости передачи по заеданию, питтингу, износу – использованы методы, изложенные в [11–13]. Приводятся также герцевские контактные напряжения, равномерно распределенные вдоль линий сопряженного контакта, и условные напряжения изгиба зубьев как защемленных балок (поз. 6). По кнопке Picture можно вызвать окно визуальной оценки найденных линий сопряженного контакта и сил, действующих в зацеплении.

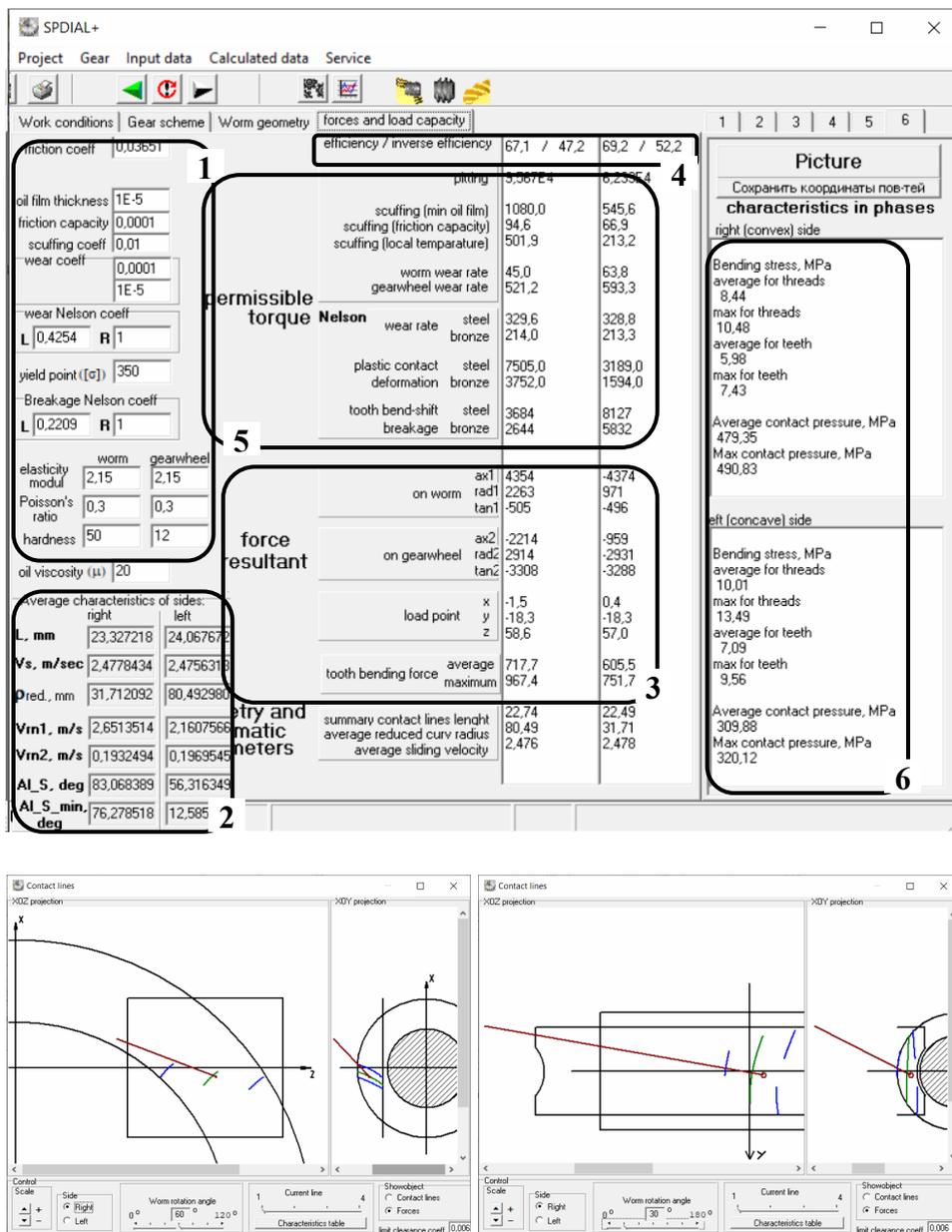


Рис. 4. Окна расчета эксплуатационных характеристик

Fig. 4. Windows of the operating characteristics calculation

### Выбор параметров нарезания зубьев колеса

Эта стадия нацелена на выбор параметров нарезания зубьев второго звена – колеса. В основу расчета положены методы локального и нелокального синтеза [14], в том числе разработанные автором (Трубачев Е. С. Метод расчета параметров станочного зацепления с геликоидной производящей поверхностью // Современные информационные технологии. Проблемы исследования, проектирования и производства зубчатых передач : сборник докладов международного научного семинара. 2001). По сути задача состоит в выборе таких параметров геометрии, установки и движения инструмента, которые обеспечивают локализацию контакта

или, в несколько упрощенной постановке, такие отклонения формируемой при нарезании поверхности зуба колеса от его сопряженной поверхности, которые плавно увеличиваются в тело зуба от средней части боковой поверхности к ее границам. Задача решается для трех видов обработки зубьев: с помощью червячной фрезы, обкаточной [15] и плоской [16] резцовых головок.

Пользователь имеет возможность выбрать один из четырех вариантов задания параметров: для двухстороннего нарезания, двух операций нарезания каждой из двух боковых поверхностей зуба в отдельности и произвольное варьирование параметрами наладки (рис. 5, поз. 1). В самом востребованном первом варианте для

редактирования (выбора) пользователю освобождены параметры:

- смещения расчетных точек (центров будущих суммарных пятен контакта передачи) от центра зуба по длине и высоте (поз. 2);
- станочный межосевой угол (поз. 3);
- осевой модуль и число заходов производящего червяка (поз. 4);
- вид червяка (поз. 5).

Первые два варианта соответствуют случаю нарезания фрезой с криволинейным и практически прямолинейным профилями, третий – случаю нарезания обкаточной резцовой головкой с прямоугольными резцами; для первого варианта можно задать радиус осевого профиля фрезы (поз. 6), для последнего имеется возможность выбора переменной подачи головки (поз. 7).

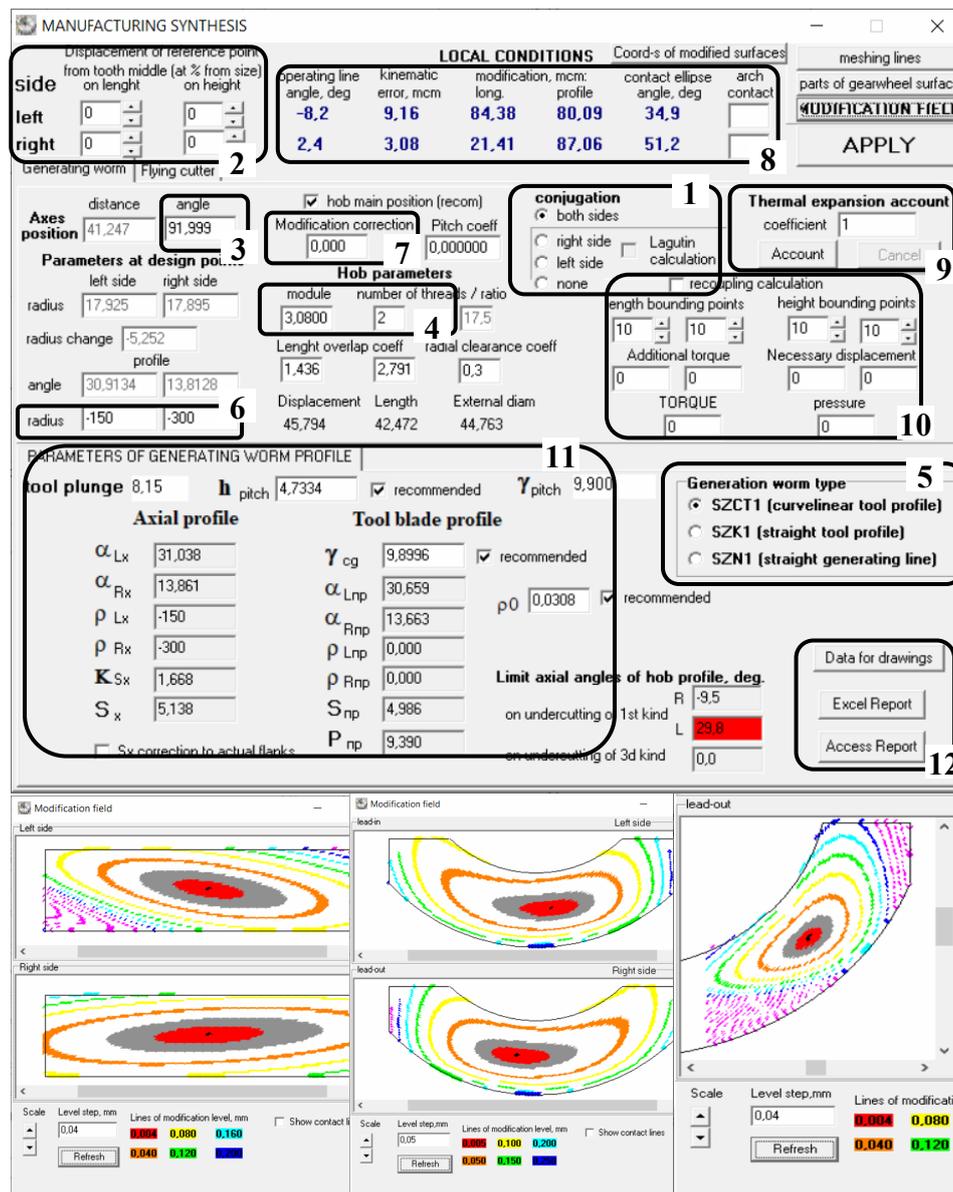


Рис. 5. Окна выбора параметров нарезания колеса

Fig. 5. Windows of the gearwheel generation choice

Остальные параметры наладки (диаметр, углы профиля инструмента, станочное межосевое расстояние) при двухстороннем нарезании являются расчетными (нередатируемыми). Выбранному набору параметров дается комплекс локальных оценок в расчетных точках (угол наклона дейст-

вующей линии, погрешность пересопряжения, прогноз профильной и продольной модификации, угол между большой осью контактного эллипса и вектором скольжения) – поз. 8. Главные нелокальные оценки (упрощенно говоря, форма и степень локализации пятна контакта, получае-

мые для текущего набора параметров наладки) можно визуализировать по нажатию на кнопку Modification field (в иностранной литературе Ease Off) и открытию подчиненного окна (рис. 5, б).

Для продвинутого проектирования можно дополнительно учесть:

- объемную деформацию («раздувание» или усадку) при термообработке или полимеризации/спекании колеса (поз. 9);
- нагруженность передачи с заданием границ пятна контакта и контролем передаваемого момента или максимальных контактных напряжений (поз. 10).

Эта стадия проектирования доопределяет параметры, необходимые для чертежей деталей и технологического проектирования. Текущий контроль параметров профиля инструмента делается в области поз. 11, а выгрузка чертежных и прочих проектных параметров в нужном формате – по кнопкам поз. 12.

### **Моделирование передачи с погрешностями (ТСА)**

Этап (в иностранной литературе ТСА – Tooth Contact Analysis) актуален для исследования точности передачи, в том числе нормирования точности (Трубачев Е. С., Береснева А. В. Моделирование технических ошибок при разработке норм точности спироидных передач // Теория и практика зубчатых передач : труды научно-технической конференции с международным участием. Ижевск, 2004. С. 113–120. Там же даны геометрические модели, использованные в программе), а также при анализе конкретных дефектов суммарного пятна контакта, полученных на практике, с выработкой компенсирующих мероприятий.

Исходными данными для этапа являются следующие погрешности (рис. 6):

- продольных линий червяка (винтовой линии, поз. 1) и колеса (поз. 2);
- профиля витков червяка (поз. 3) и зуба колеса (поз. 4);
- деления на заходы червяка (поз. 5) и шага зубьев колеса (поз. 6);
- толщины витка червяка (поз. 7) и зуба колеса (поз. 8);
- монтажные (поз. 9).

Оценка передачи с погрешностями производится на основе расчета зазоров между контактирующими поверхностями на всей протяженности их взаимодействия [17].

Главные критерии:

- относительная площадь суммарного пятна контакта (поз. 10) с визуализацией в отдельном окне;

- погрешность зубцовой частоты (поз. 11) – характеристика плавности работы – с графиком изменения по фазе зацепления;

- наибольшая кинематическая погрешность передачи (поз. 12);

- минимальный и максимальный боковой зазор в передаче (поз. 13);

- необходимое для обеспечения зазора смещение колеса – для регулируемого при сборке осевого положения последнего (поз. 14).

### **Моделирование распределения нагрузки между зубьями (LTCA)**

Стадия (в иностранной литературе LTCA – Load Tooth Contact Analysis) продолжает предыдущую, является углублением анализа передачи, также применяется при исследовании проектного решения и/или анализе конкретных, получаемых на практике недостатков суммарного пятна контакта.

Примененный итерационный метод расчета основан на дискретизации нагруженной системы с односторонними связями и предусматривает раскрытие многократной статической неопределимости в упругой и упругопластической постановках и изложен в публикациях разработчиков [18, 19]. Исходными данными для этой стадии являются погрешности и поле зазоров, определенные на предыдущем этапе, свойства материалов звеньев (рис. 7, поз. 1), параметры микронеровностей (поз. 2), данные о деформативности элементов конструкции, опции расчета (поз. 3 и 4).

Главные результаты – площадки нагруженного контакта (поз. 5) и распределение контактных напряжений (поз. 6).

### **SPDIAL+ – инструмент проектирования, исследования и инноваций**

SPDIAL+ в течение последних 20 лет является главным инструментом исследования и проектирования передач червячного типа в Ижевской научной школе. Возможности существенного улучшения самой передачи, ее компоновки или технологичности всякий раз побуждают рассматривать десятки вариантов, в подавляющем большинстве, нестандартных проектных решений. Всесторонние количественные оценки передач позволяют также сравнивать между собой разные типы передач [20, 21] (и эффективно выполнять реверс-инжиниринг известных решений). Наконец, большой опыт проектирования в SPDIAL+ подтолкнул ко многим инновациям. Отметим самые показательные.

1. Унификация зуборезного инструмента и новая постановка оптимизационной задачи,

ставшие нормой проектирования и многономенклатурного производства передач в Ижевской научной школе (Трубачев Е. С., Савельева Т. В. Постановка задачи о разработке типоразмерного ряда однозаходных спироидных фрез // Теория и практика зубчатых передач : труды научно-технической конференции с международным участием. Ижевск, 2004), [22].

2. Серийные нагруженные червячные передачи со стальными колесами:

неортогональная (Трубачев Е. С., Пузанов В. Ю. Новые свойства неортогональных червячных передач // Теория и практика зубчатых

передач и редукторостроения : труды научно-технической конференции. Ижевск, 2008);

*QN-передача* (например, упомянутый выше патент Егорова И. М., Иофика Б. Ш.), а также [23].

3. *Спироидные передачи с экстремально малыми передаточными отношениями 3...5*, считавшиеся ранее если и возможными, то крайне неудобными в проектировании и производстве.

4. *Новая разновидность конических передач с криволинейными зубьями*, обеспечивающая упрощение подготовки производства и как бы составленная из двух спироидных колес, полученных в неортогональных станочных зацеплениях [24].

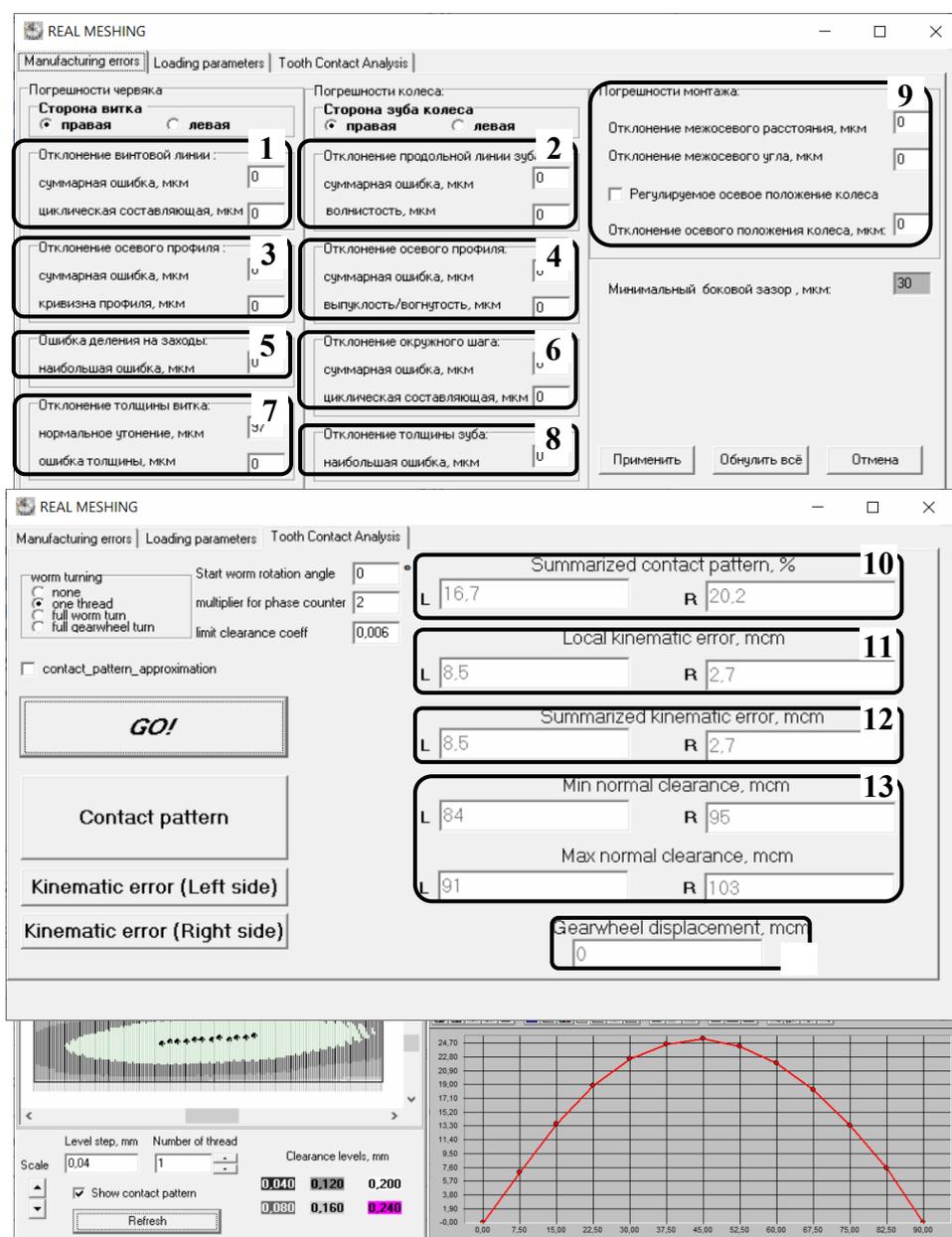


Рис. 6. Окна расчета передачи с погрешностями

Fig. 6. Windows of TCA

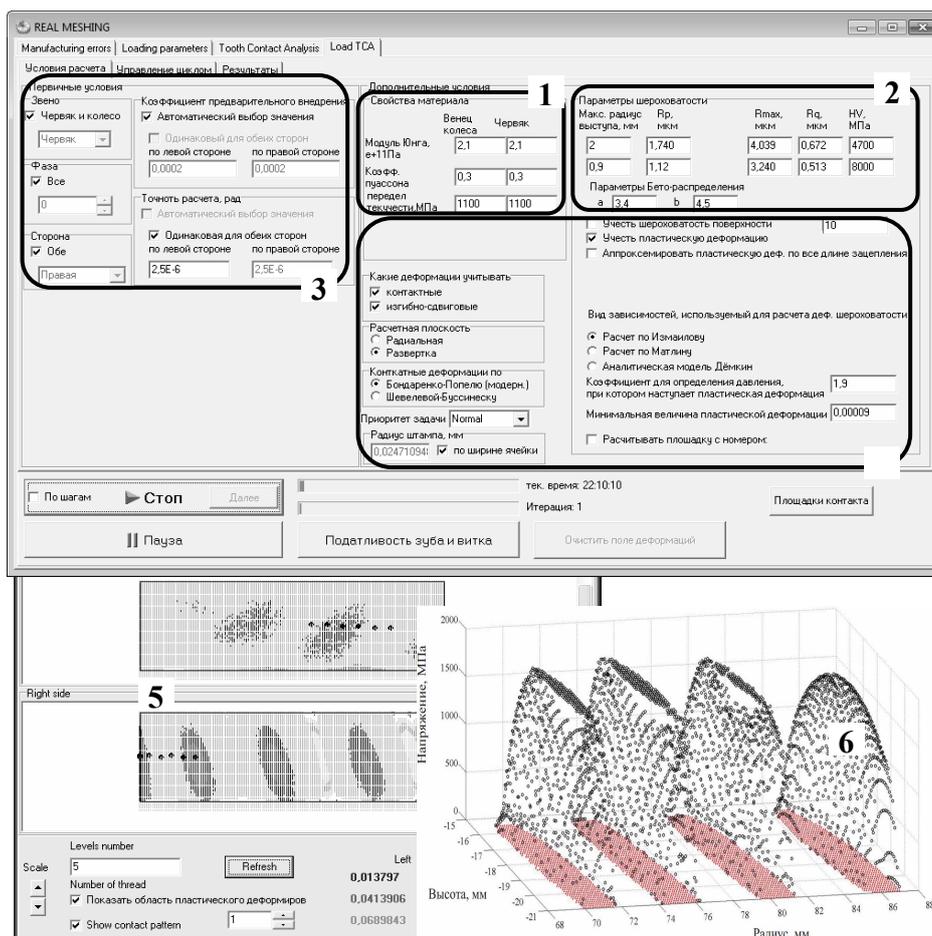


Рис. 7. Окна расчета распределения нагрузки (LTCA)

Fig. 7. Windows of LTCA

### Выводы и благодарности

Программный комплекс SPDIAL+, описанный в статье, никогда не был и не является коммерческим продуктом, использовался для исследований и проектирования зубчатых передач в Ижевской научной школе и является продуктом и примером интеграции научной, образовательной, практической инновационной и внедренческой деятельности. Руководитель его разработки, автор настоящей статьи, должен выразить искреннюю признательность участникам этого процесса бывшим/являющимся его коллегами, студентами и аспирантами:

1996–2010 гг. (здесь и далее годы участия в разработке) – Береснева А. В., инициирование разработки, расчет геометрии зубьев и погрешностей;

1996–1998 гг. – Сутягин А. П., Мяжков К. Н., Пovyшев О. Н., начало разработки, общие и расчетные модули проектирования сопряженного зацепления;

1997–2004 гг. – Орешин А. В., администрирование комплекса, общие модули, расчет линий сопряженного контакта;

1998–2002 гг. – Монаков А. В., сплайн-аппроксиматор, расчет нагрузочной способности, общие вопросы;

1998–2000 гг. – Шмаков С. Г., Бугреев А. Н., расчет геометрии витков червяка;

1999–2000 гг. – Захаркевич Л., 2000–2003 гг. – Семакин Н. Н., 2004 – наст. время – Савельева Т. В., 2009–2011 – Злобина П. А., 2010–2014 – Логинов С. Е., расчет станочных зацеплений;

2001–2002 – Огородников Г. Ю., 3D-визуализация;

2003–2006 – Кузнецов А. С., 2016–2020 – Санников А. М., расчет распределения нагрузки;

2018 по наст. время – Пушкарева Т. А., общие вопросы, расчет станочных зацеплений.

### Библиографические ссылки

- <https://www.gleason.com/ru/products/design-simulation-products/design-simulation/design-simulation/design-simulation> (дата обращения: 27.03.2024)
- [https://klingelInberg.com/fileadmin/News/White\\_Paper/BEVEL\\_GEAR\\_TECHNOLOGY\\_OPTIMIZED\\_BEVEL\\_GEAR\\_DESIGN\\_BY\\_MEANS\\_OF\\_LOCALIZED\\_LOAD\\_CAPACITY\\_](https://klingelInberg.com/fileadmin/News/White_Paper/BEVEL_GEAR_TECHNOLOGY_OPTIMIZED_BEVEL_GEAR_DESIGN_BY_MEANS_OF_LOCALIZED_LOAD_CAPACITY_)

CALCULATION\_WHITEPAPER\_2017\_01\_09\_EN.pdf (дата обращения: 27.03.2024).

3. Gosselin C. (2020) Advanced Computer-Aided Gear Design, Analysis and Manufacturing. New Approaches to Gear Design and Production. Mechanisms and Machine Science, vol 81. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-34945-5\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-030-34945-5_3)

4. Шевелева Г. И., Волков А. Э., Медведев В. И. Программный комплекс для подготовки производства спирально-конических зубчатых передач // Вестник машиностроения. 2005. № 9. С. 6–14.

5. Гольдфарб В. И. Аспекты проблемы автоматизации проектирования передач и редукторов // Передачи и трансмиссии: научный журнал Технического комитета по зубчатым передачам IFToMM. 1991. № 1. С. 20–24.

6. Гольдфарб В. И., Русских А. Г. Компьютерный синтез схем передач типа червячных // XV Sympozjon podstaw konstrukcji maszyn, cz.II, Komunikaty, 1991, Rzeszow, Polska, pp. 101-103.

7. Трубачев Е. С. Синтез сопряженного спироидного зацепления по условиям исключения подрезания // Вестник машиностроения. 2004. № 9. С. 7–11.

8. Литвин Ф. Л. Теория зубчатых зацеплений. М. : Наука, 1968. 584 с.

9. Nelson W.D. (1957) Spiroid gearing. The American society of mechanical engineers: no. 57-A-162, USA, 1957.

10. Рациональный выбор параметров зацепления червячных цилиндрических передач / И. П. Бернацкий, Н. И. Вьюшкин, Б. К. Герасимов, В. Н. Комков // Зубчатые и червячные передачи. Л. : Машиностроение, 1974. С. 193–210.

11. Дроздов Ю. Н., Анферов В. Н. К расчету ресурса спироидных передач по износу // Расчетно-экспериментальные методы трения и износа. М. : Наука, 1980. С. 19–22.

12. Сегаль М. Г. Об определении границ пятна контакта зубьев конических и гипоидных передач // Машиноведение. 1972. № 4.

13. Trubachev E.S. (2024) Synthesis of Contact in Loaded Multi-pair Gears with a Big Contact Ratio, in: Advances in Mechanism and Machine Science. Edited by Masafumi Okada - Springer Nature Switzerland Springer Nature Switzerland, pp. 75-83. ISBN 978-3-031-45709-8

14. Трубачев Е. С., Злобина П. А., Логинов С. Е. Новая схема формообразования зубьев спироидных колес // Интеллектуальные системы в производстве. 2011. № 2. С. 178–184.

15. Trubachev E.S. (2020) New Possibilities of Tooth Cutting by Running Cutter Heads, New approaches to gear design and production. Springer International Publishing AG Switzerland, vol. 81, pp. 295-310.

16. Кузнецов А. С., Санников А. М. Метод расчета упругопластически тяжело нагруженной низкоскоростной спироидной передачи // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2017. Т. 20. № 2. С. 60-64.

17. Трубачев Е. С. Основы анализа зацепления реальных спироидных передач // Вестник машиностроения. 2004. № 10. С. 3–11.

18. Trubachev E., Kuznetsov A., Sannikov A. (2018) Model of Loaded Contact in Multi-pair Gears: Advanced Gear Engineering, Mechanisms and Machine Science 51, Springer International Publishing AG Switzerland, pp. 45-72. DOI: 10.1007/978-3-319-60399-5

19. Goldfarb V., Trubachev E., Pushkareva T., Savelyeva T. (2019) Comparative investigation of worm and spiroid gears with cylindrical worms. Advances in Mechanism and Machine Science: IFToMM WC 2019. Mechanisms and Machine Science, vol. 73, Springer, Cham, pp. 925-935. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-20131-9\\_92](https://doi.org/10.1007/978-3-030-20131-9_92)

20. Trubachev E. (2023) Spiroid Gears as an Alternative to Bevel and Hypoid Gears: Proceedings of the 9th International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2023, Lecture Notes in Mechanical Engineering, Springer, Cham. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-38126-3\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-031-38126-3_8)

21. Trubachev E.S., Savelyeva T.V., Pushkareva T.A. (2018) Practice of design and production of worm gears with localized contact. Advanced Gear Engineering, Mechanisms and Machine Science 51, Springer International Publishing AG Switzerland, pp. 327-344. DOI: 10.1007/978-3-319-60399-5

22. Trubachev E.S. (2021) Worm-Type Gear with Steel Gear-wheel. Gears in Design, Production and Education, vol. 101, pp. 185-202. ISBN 978-3-030-73022-2

23. Trubachev E.S. (2020) On Possibility of Cutting Bevel Gearwheels by Hobs, New approaches to gear design and production. Springer International Publishing AG Switzerland, vol. 81, pp. 273-294.

## References

1. <https://www.gleason.com/ru/products/design-simulation-products/design-simulation/design-simulation/design-simulation/> (accessed 27.03.2024).

2. [https://klingelnberg.com/fileadmin/News/White\\_Paper/BEVEL\\_GEAR\\_TECHNOLOGY\\_OPTIMIZED\\_BEVEL\\_GEAR\\_DESIGN\\_BY\\_MEANS\\_OF\\_LOCALIZED\\_LOAD\\_CAPACITY\\_CALCULATION\\_WHITEPAPER\\_2017\\_01\\_09\\_EN.pdf](https://klingelnberg.com/fileadmin/News/White_Paper/BEVEL_GEAR_TECHNOLOGY_OPTIMIZED_BEVEL_GEAR_DESIGN_BY_MEANS_OF_LOCALIZED_LOAD_CAPACITY_CALCULATION_WHITEPAPER_2017_01_09_EN.pdf) (accessed: 27.03.2024).

3. Gosselin C. (2020) Advanced Computer-Aided Gear Design, Analysis and Manufacturing. New Approaches to Gear Design and Production: Mechanisms and Machine Science, vol. 81. Springer, Cham, [https://doi.org/10.1007/978-3-030-34945-5\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-030-34945-5_3)

4. Sheveleva G.I., Volkov A.E., Medvedev V.I. (2005) [Program complex for spiral bevel gears preparation]. *Vestnik mashinostroeniya*, no. 9, pp. 6-14 (in Russ.).

5. Goldfarb V.I. (1991) [Aspects of the problem of gears and gearboxes design]. Gears and transmissions: *Scientific magazine of IFToMM Technical committee on gears*, no. 1, pp. 20-24 (in Russ.).

6. Goldfarb V.I., Russkikh A.G. (1991) [Computer synthesis of worm-type transmission circuits]: XV Sympozjon podstaw konstrukcji maszyn, II, Komunikaty, Rzeszow, Polska, pp. 101-103 (in Russ.).

7. Trubachev E.S. (2004) [Synthesis of conjugate spiroid gearing under conditions for eliminating undercut

ting]. *Vestnik mashinostroeniya*, no. 9, pp. 7-11 (in Russ.).

8. Litvin F.L. (1968) *Teoriya zubchatyh zaceplenij* [Theory of gearing], Moscow: Nauka Publ., 584 p. (in Russ.).

9. Nelson W.D. (1957) Spiroid gearing. The American society of mechanical engi-neers: no. 57-A-162, USA, 1957.

10. Bernackij I.P., V'yushkin N.I., Gerasimov B.K., Komkov V.N. (1974) *Racional'nyj vybor parametrov zacepleniya chervyachnyh cilindricheskih peredach* [Rational choice of meshing parameters of worm gears]. Leningrad: Mashinostroenie Publ., pp. 193-210 (in Russ.).

11. Drozdov Yu.N., Anferov V.N. (1980) *K raschetu resursa spiroidnyh peredach po iznosu* [To calculate the wear life of spiroid gears]. *Raschetno-jeksperimental'nye metody trenija i iznosa* [Calculation and experimental methods of friction and wear]. Moscow: Nauka Publ., pp. 19-22 (in Russ.).

12. Segal' M.G. (1972) [On determination of contact pattern borders of bevel and hypoid gears]. *Mashinovedenie*, no. 4 (in Russ.).

13. Trubachev E.S. (2024) Synthesis of Contact in Loaded Multi-pair Gears with a Big Contact Ratio. *Advances in Mechanism and Machine Science*. Edited by Masafumi Okada - Springer Nature Switzerland Springer Nature Switzerland, pp. 75-83. ISBN 978-3-031-45709-8

14. Trubachev E.S., Zlobina P.A., Loginov S.E. (2011) [New scheme of spiroid gear tooth generation]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*, no. 2, p. 178-184 (in Russ.).

15. Trubachev E.S. (2020) New Possibilities of Tooth Cutting by Running Cutter Heads, New approaches to gear design and production. *Springer International Publishing AG Switzerland*, vol. 81, pp. 295-310.

16. Kuznecov A.S., Sannikov A.M. (2017) [The calculation method of elasto-plastically heavy-loaded low-

speed spiroid gear]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, vol. 20, no. 2, pp. 60-64 (in Russ.).

17. Trubachev E.S. (2004) [Fundamentals of the analysis of the engagement of real spiroid gears]. *Vestnik mashinostroeniya*, no. 10, pp. 3-11 (in Russ.).

18. Trubachev E., Kuznetsov A., Sannikov A. (2018) Model of Loaded Contact in Multi-pair Gears: *Advanced Gear Engineering, Mechanisms and Machine Science 51*, Springer International Publishing AG Switzerland, pp. 45-72. DOI: 10.1007/978-3-319-60399-5

19. Goldfarb V., Trubachev E., Pushkareva T., Savel'yeva T. (2019) Comparative investigation of worm and spiroid gears with cylindrical worms. *Advances in Mechanism and Machine Science: IFToMM WC 2019*. *Mechanisms and Machine Science*, vol. 73, Springer, Cham, pp. 925-935. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-20131-9\\_92](https://doi.org/10.1007/978-3-030-20131-9_92)

20. Trubachev E. (2023) Spiroid Gears as an Alternative to Bevel and Hypoid Gears: *Proceedings of the 9th International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2023*, Lecture Notes in Mechanical Engineering, Springer, Cham. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-38126-3\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-031-38126-3_8)

21. Trubachev E. S., Savel'yeva T. V., Pushkareva T. A. (2018) Practice of design and production of worm gears with localized contact. *Advanced Gear Engineering, Mechanisms and Machine Science 51*, Springer International Publishing AG Switzerland, pp. 327-344. DOI: 10.1007/978-3-319-60399-5

22. Trubachev E.S. (2021) Worm-Type Gear with Steel Gear-wheel. *Gears in Design, Production and Education*, vol. 101, pp. 185-202. ISBN 978-3-030-73022-2

23. Trubachev E.S. (2020) On Possibility of Cutting Bevel Gearwheels by Hobs, New approaches to gear design and production. *Springer International Publishing AG Switzerland*, vol. 81, pp. 273-294.

### Software System SPDIAL+

E.S. Trubachev, DSc in Engineering, Professor, Institute of Mechanics n. a. prof. Goldfarb, Kalashnikov ISTU; MIP "Mechanic" Ltd., Izhevsk, Russia

*Spiroid gears are direct competitors to traditional technical solutions - worm and hypoid gears; and they have proven themselves in a large number of specific technical applications, providing greater strength, smaller size, and easier production. However, their design process is much less subject to being typical and standard and to resulting in simple engineering techniques. In fact, effective solutions can be obtained only by actually researching the space of parameters. An indispensable tool for this is a computer-aided design and research system. The paper presents the summary of such a system SPDIAL+ for worm-type gears (worm, QN-gears, spiroid) developed at Izhevsk scientific school in the field of gears and gearboxes. In particular, the possibilities of designing a conjugated gear, choice of gearwheel cutting parameters, analysis of gears under the action of errors and loads are considered. The role and results of applying the program as the main tool for research, design and innovations like new varieties of gears, their new properties in specific applications, new methods and techniques of tooth machining are shown.*

**Keywords:** CAD system for gears, spiroid gear, worm gear.

Получено 15.04.2024

### Образец цитирования

Трубачев Е. С. Программный комплекс SPDIAL+ // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2024. Т. 27, № 2. С. 37–48. DOI: 10.22213/2413-1172-2024-2-37-48

### For Citation

Trubachev E.S. (2024) [Software System SPDIAL+]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2024, vol. 27, no. 2, pp. 37-48 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2024-2-37-48