

УДК 621.753

Ю. А. Леконцева, магистрант, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова  
 В. В. Ермилов, кандидат технических наук, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

## АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ РАСЧЕТ РАЗМЕРНЫХ ЦЕПЕЙ С ПЕРЕМЕННЫМИ ПЕРЕДАТОЧНЫМИ ОТНОШЕНИЯМИ НА ОСНОВЕ ИНТЕРВАЛЬНЫХ МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ

На сегодняшний день в мире широко используются системы автоматизированного проектирования (САПР), призванные снизить трудоемкость и облегчить труд проектировщиков в самых различных предметных областях, в частности при технологическом расчете и анализе размерных цепей. Анализ размерных цепей необходим при назначении допусков на размеры или проверки собираемости и работоспособности механизма и используется для более точного проектирования машин и механизмов. Расчет максимально возможных допусков при соблюдении условий собираемости и работоспособности позволяет снизить себестоимость изготовления деталей механизма.

Существующие коммерческие САПР в большинстве своем используют вероятностный метод расчета или метод минимума-максимума. Вероятностные методы расчета применяются для расчета тех размерных цепей (РЦ), в которых не требуется достижения полной взаимозаменяемости [1]. В случаях, где требуется полная взаимозаменяемость, применяется метод минимума-максимума. Такие САПР, как SETOL, NX, SolidWorks, MITCalc и др., в которых используется этот метод, могут гарантировать полную взаимозаменяемость для простых размерных цепей с постоянными передаточными отношениями звеньев, однако результаты расчета для цепей с переменными передаточными отношениями звеньев зачастую являются неверными.

Переменные передаточные отношения звеньев РЦ не являются редкими и возникают очень часто в механизмах, в которых есть подвижные детали с изменяющимся углом поворота.

Одной из причин того, что современные расчетные системы не могут гарантировать точность результатов расчета РЦ с подвижными звеньями, являются используемые методы расчета, которые, как правило, основаны на ряде упрощений и допущений исходной задачи [2, 3]. Такие допущения в случае размерных цепей с подвижными звеньями могут давать существенные искажения результатов.

Одна из самых «раскрученных» автоматизированных систем расчета размерных цепей SETOL6σ фирмы Sigmatrix на примере простой размерной цепи с подвижными звеньями, представленной на рис. 1, дает ошибку порядка 65 %.

В табл. 1 приведены результаты аналитического расчета и в системе SETOL6σv.7.

Пример расчета еще одной тестовой РЦ (рис. 2) представлен в табл. 2.

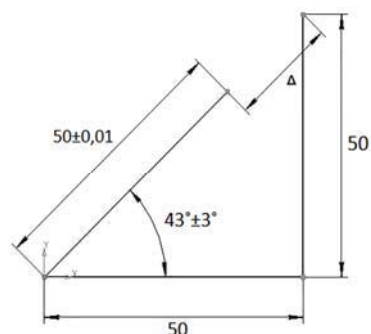


Рис. 1. Размерная цепь с одним подвижным звеном

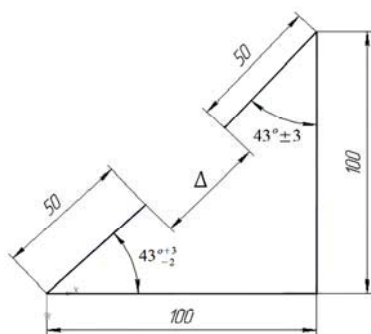


Рис. 2. Размерная цепь с двумя подвижными звеньями

В самом общем виде, без упрощений и допущений, задача расчета предельных величин замыкающего звена может быть легко сведена к двум задачам оптимизации функции величины замыкающего звена в области ограниченной полями допуска составляющих звеньев размерной цепи. Целевая функция – функция величины замыкающего звена цепи в зависимости от величин составных звеньев размерной цепи. Полноценным решением задачи расчета РЦ является глобальный минимум и глобальный максимум целевой функции. Областью поиска экстремумов функции является область, определяемая интервалами допусков составных звеньев размерной цепи. Задача нахождения максимума функции тривиально сводится к нахождению минимума.

Важной особенностью оптимизационной постановки задачи является то, что помимо нахождения интервала предельных значений функции определяются также точки, в которых находятся экстремумы. Координаты этих точек содержат сочетания конкретных значений величин составных звеньев размерной цепи, при которых достигаются предельные значения замыкающего звена. Это позво-

ляет верифицировать получаемые предельные значения контрольными расчетами и в целом повышает доказательность расчетов в отличие от суще-

ствующих систем, которые выдают результаты как «черный ящик», практически ничем их не подкрепляя.

Таблица 1. Результаты аналитического расчета

Метод (система)	Результат расчета*	Допуск	Изображение допуска	Ошибка
Аналитический расчет	[20,700678118654; 21,359978184099]	0,66		—
Cetol 7 Метод системных моментов (расчет по 1-й производной)	[20,4941; 21,1347]	0,64		65 %
Cetol 7 Метод системных моментов (расчет по 2-й производной)	[20,7243; 21,3649]	0,64		4,3 %
Cetol 7 Метод Монте-Карло (10000 итераций)	[20,70; 21,293]	0,59		10 %
Cetol 8	[19,8045; 21,8243]	2,02		206 %

\* в том виде, в котором выдавали системы расчета.

Таблица 2. Результаты расчета размерной цепи

Метод (система)	Результат расчета*	Допуск	Изображение допуска	Ошибка
Аналитический расчет	[41,42135 ; 42,464478]	1,04		—
Cetol 7 Метод системных моментов (расчет по 1-ой производной)	[41,3438 ; 41,8104]	0,47		70 %
Cetol 7 Метод системных моментов (расчет по 2-ой производной)	[41,3958 ; 41,8229]	0,43		64 %
Cetol 7 Метод Монте-Карло (10000 итераций)	[41,43 ; 42,202]	0,77		26 %

\* в том виде, в котором выдавали системы расчета.

Применение классических оптимизационных методов для решения задачи расчета РЦ в такой оптимизационной постановке не дает качественных результатов, поскольку классические численные методы оптимизации не могут гарантировать глобальную оптимальность получаемых экстремумов [4]. По этой причине оптимизационная постановка задачи расчета РЦ до сих пор не нашла своего применения в практических реализациях.

Однако развитие теории численных методов, в частности появление концепции интервальных численных методов, привело к разработке новых численных интервальных методов оптимизации, способных гарантировать нахождение глобальных экстремумов целевой функции в заданной области поиска с заданной точностью. Исследованию возможностей применения данных методов в рамках оптимизационной постановки задачи расчета размерных цепей и посвящена наша работа.

Для решения задачи нахождения глобального минимума предлагается использовать алгоритм глобальной интервальной оптимизации по методу Хансена, подробно описанный в [5] с усовершенствованиями, предложенными в [6], которые позволяют

решать реальные по сложности задачи с высокой точностью за разумное время.

Работоспособность предлагаемого метода проиллюстрируем на примере решения реальной задачи расчета сложной РЦ спускового механизма пистолета ПСМ (рис. 3), обеспечивающей его безотказную работу.

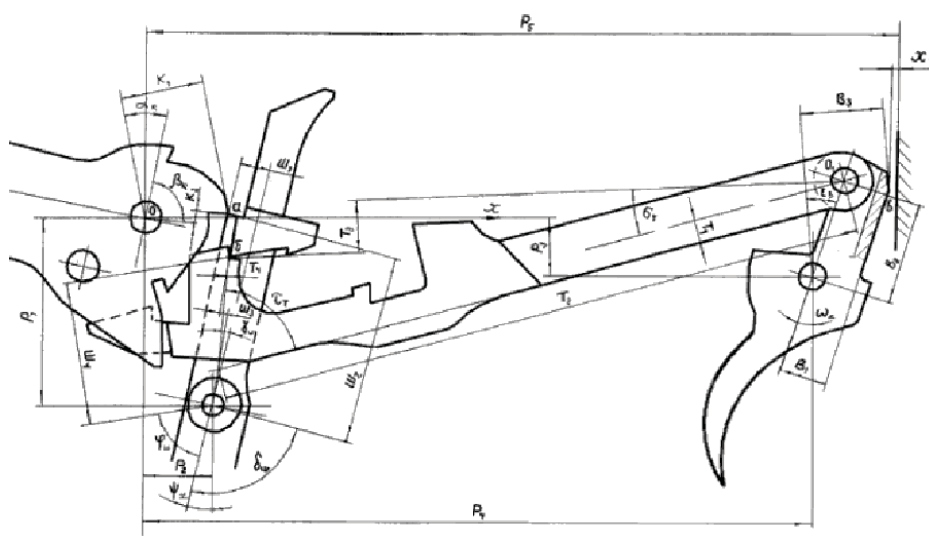
Спусковой механизм состоит из 5 деталей: шептало, рамка, крючок спусковой, тяга крючка спускового, курок. Задача состоит в расчете предельных значений зазора  $x_1$  между стенкой рамки и спусковым крючком в момент срыва курка с боевого взвода при заданных отклонениях на размеры деталей механизма по методу максимума-минимума [7].

Расчет РЦ спускового механизма по предлагаемому методу в разработанной экспериментальной автоматизированной системе расчета РЦ на ПК (Pentium D 3 ГГц) занял 22 секунды. Найденные системой глобальные экстремумы замыкающего звена РЦ представлены в табл. 3.

Достижение указанных предельных значений замыкающего звена  $x_1$  в размерной цепи подтверждено контрольным расчетом в САПР Pro/Engineer (рис. 4) и Компас-3D по найденным предложенным методом

координатам точек экстремума (табл. 3). Точность гарантированной локализации экстремумов – 12 знаков после запятой. Модель размерной цепи в САПР

Pro/Engineer также использовалась для сравнительного расчета в системе SETOL6σ. Расчет был выполнен за 25 секунд.



Имя	Ном.	Вер.	Ниж.
Ш.Ш1	2,5	0,05	-0,05
Ш.Ш2	16,2	0	-0,07
Ш.Ш3	0,5	0	-0,1
Ш.Ш4	12,7	0,1	0
Ш.бш	87	0	0
Ш.гш	5	0	0
Ш.фш	68	0	0
P.P1	16,5	0,05	-0,05
P.P2	6	0,05	-0,05
P.P3	5	0,05	-0,05
P.P4	60	0,05	-0,05
P.P5	66,4	0,12	0
K.C.B1	4	0	-0,2
K.C.B2	9	0,05	-0,05
K.C.B3	7,4	0	-0,2
K.C.ев	22,5	0	0
T.T1	2	0,05	-0,05
T.T2	58,1	0	0
T.T3	4,8	0,1	0
T.T4	0	0,1	0
T.гр	12,5	0	0
T.т	70	0	0
K.K1	7	0	-0,1
K.K2	1,3	0,1	0
K.ак	22	0	0
K.вк	83	0	0

Рис. 3. Схема и параметры размерной цепи спускового механизма

Таблица 3. Результаты расчета размерной цепи спускового механизма

Звено РЦ	Поле допуска звена	Глобальный min	Глобальный max
Ш.Ш1	[2,45; 2,55]	2,55	2,45
Ш.Ш2	[16,13; 16,2]	16,13	16,2
Ш.Ш3	[0,4; 0,5]	0,4	0,5
Ш.Ш4	[12,7; 12,8]	12,8	12,7
P.P1	[16,45; 16,55]	16,45	16,55
P.P2	[5,95; 6,05]	6,05	5,95
P.P3	[4,95; 5,05]	5,05	4,95
P.P4	[59,95; 60,05]	60,05	60,05
P.P5	[66,4; 66,52]	66,4	66,52
K.C.B1	[3,8; 4]	4	3,8
K.C.B2	[8,95; 9,05]	8,95	9,05
K.C.B3	[7,2; 7,4]	7,4	7,2
T.T1	[1,95; 2,05]	1,95	2,05
T.T3	[4,8; 4,9]	4,9	4,8
T.T4	[0; 0,1]	0,1	0
K.K1	[6,9; 7]	7	6,9
K.K2	[1,3; 1,4]	1,3	1,4
x1		<b>0,081104583558</b>	<b>0,953068767541</b>

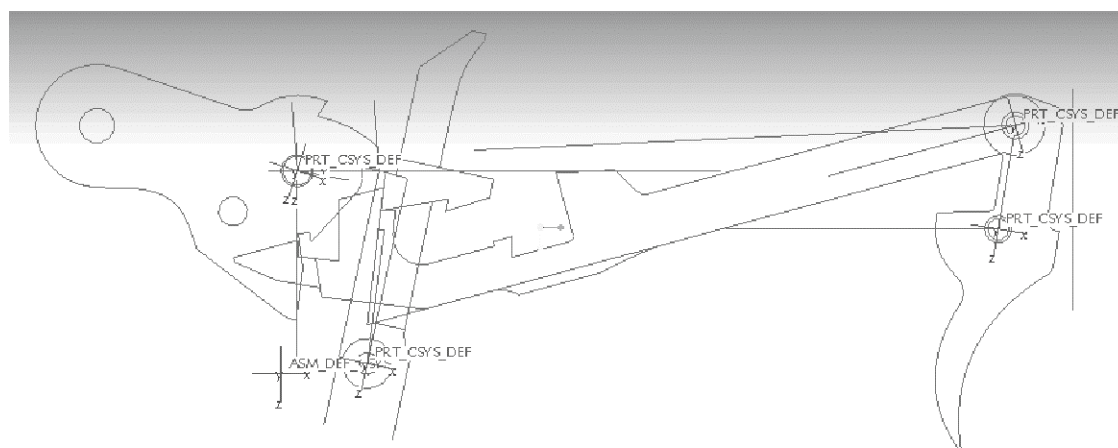
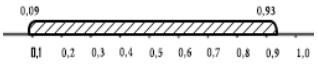
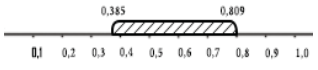
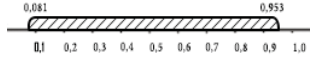


Рис. 4. Размерная цепь спускового механизма в Pro/Engineer

В табл. 4 сопоставлены результаты расчета размерной цепи спускового механизма пистолета ПСМ, полученные вручную аналитическим методом, в системе CETOL 6σ и по предлагаемому методу. При этом стоит отметить, что ручной расчет данной размерной цепи, проведенный сотрудниками завода в далеком 1982 г., содержит ошибки, свя-

занные с несовершенством расчетного метода, предполагающего, что передаточные отношения звеньев цепи неизменны. Для ручного расчета данных по времени расчета нет, но эту величину можно косвенно оценивать по количеству страниц рукописного расчета, который занимает 9 страниц формата А4.

Таблица 4. Сводная таблица результатов расчета разными методами

Метод (система)	Результат расчета	Допуск	Изображение допуска	Ошибка	Время расчета
Ручной расчет	[0,0902; 0,9343]	0,84		4%	–
Cetol 7 Метод системных моментов (расчет по 1-й производной)	[0,385149; 0,809035]	0,42		51%	25 сек.
Предлагаемый метод	[0,081104583558; 0,953068767541]	0,87		–	22 сек.

Таким образом, применение современных интервальных численных методов оптимизации для задачи расчета размерных цепей в общей оптимизационной постановке позволяет качественно решать реальные сложные задачи расчета РЦ с переменными передаточными отношениями с высокой гарантированной наперед заданной точностью за вполне приемлемое время.

#### Библиографические ссылки

1. РД 50-635-87. Цепи размерные. Основные понятия. Методы расчета линейных и угловых цепей : метод. указ. – М., 1987. – 46 с.

2. Цепи размерные. Методика расчета плоских размерных цепей при переменных передаточных отношениях :

Получено 31.01.2017

метод. рекомендации МР 35-82. – М. : ВНИИИзмаш, 1982. – 182 с.

3. Кадацкая М. С. Размерное моделирование функционирования составных частей и деталей машин : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08. – Ижевск, 1996. – 113 с.

4. Достоверные вычисления. Базовые численные методы / У. Кулиш, Д. Рац, Р. Хаммер, М. Хокс ; пер. с англ. – М. ; Ижевск : Регулярная и хаотическая динамика, 2005. – 496 с.

5. Прикладной интервальный анализ / Л. Жолен, М. Кифер, О. Дидри, Э. Вальтер ; пер. с англ. – М. ; Ижевск : Ин-т компьютерных иссл., 2005. – 468 с.

6. Достоверные вычисления. Базовые численные методы.

7. Ермилов В. В. Вариационное параметрическое геометрическое моделирование в САПР на основе онтологий : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.12. – Ижевск, 2008. – 178 с.

УДК 519.248

М. А. Аль Аккад, кандидат технических наук, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

## ПРОБЛЕМНО ОРИЕНТИРОВАННЫЙ АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ ЗАХВАТОМ ОБЪЕКТОВ МАНИПУЛЯТОРОМ ЧЕЛОВЕКОПОДОБНОГО РОБОТА

### Введение

Сегодня цель исследований, направленных на разработку двуруких роботов, состоит в том, чтобы сделать их настоящими партнерами человека в различных сферах, включающих космические исследования, помощь инвалидам, производство и др. При этом необходимо обеспечить возможность манипуляций различными инструментами, такими как медицинские инструменты и устройства промышленного назначения. В данном контексте решение задачи координации и управления манипуляторами робота становится одной из

приоритетных задач различных научных исследований.

Использование двух манипуляторов робота в режиме дистанционного управления исследовано в работе Дж. Тейлор и Д. Сьюард [1] в ситуации, когда оператор выполняет бимануальные задачи, которые могут передаваться двум управляемым рукам робота на расстоянии. Для манипуляций, ориентированных на цель, две руки физически не взаимодействуют друг с другом, но обе решают одну и ту же задачу (например, нажатие различных клавиш на клавиатуре). В исследовании Д. Сурдиловича и др.