



**ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ**  
**Машиностроителен Факултет**  
**Катедра „Автоматизация на дискретното производство“**

**Маг. инж. Велислав Петков Ценов**

**„Оптимизация на параметричните редове на технически изделия“**

## **А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**

на дисертация за придобиване на образователна и научна степен  
**„ДОКТОР“**

Област: 5. Технически науки  
Професионално направление: 5.1. Машинно инженерство  
Научна специалност: Автоматизация на производството

**Научен ръководител: Проф. д-р инж. Иво Кръстев Малаков**

СОФИЯ, 2018 г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от Катедрения съвет на катедра „Автоматизация на дискретното производство“ към Машиностроителен Факултет на ТУ-София на редовно заседание, проведено на 26.02.2018 г.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на 19.06.2018 г. от 15,00 часа в Конферентната зала на БИЦ на Технически университет – София на открито заседание на научното жури, определено със заповед № ОЖ-78/09.03.2018 г. на Ректора на ТУ-София в състав:

1. проф. д-р Димчо Чакърски – председател
2. проф. д-р Иво Малаков – научен секретар
3. проф. д-тн Христо Шехтов
4. проф. д-р Тодор Нешков
5. доц. д-р Гено Хаджикосев

Рецензенти:

1. проф. д-р Димчо Чакърски
2. проф. д-тн Христо Шехтов

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на Машиностроителен Факултет на ТУ-София, блок № 4, кабинет № 4407.

Дисертантът е редовен докторант към катедра „Автоматизация на дискретното производство“ на Машиностроителен Факултет. Изследванията по дисертационната разработка са направени от автора, като някои от тях са подкрепени от научноизследователски проекти.

Автор: маг. инж. Велислав Ценов

Заглавие: "Оптимизация на параметричните редове на технически изделия"

Тираж: 30 броя

Отпечатано в ИПК на Технически университет – София

# **I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД**

## **Актуалност на проблема**

Типоразмерните редове са често срещани при масовите продукти. Те се намират почти навсякъде – машинни елементи като болтове, шайби или зъбни колела, потребителски стоки като телевизори, хладилници, газови турбини, самолети и обработващи машини.

Продуктите могат да бъдат мащабирани по размер, мощност, капацитет, скорост, сила и т.н., за да задоволят различните нужди на клиентите. Типоразмерният ред според Pahl и Beitz е продукт, който изпълнява една и съща функция, но е наличен в различни размери, за да покрие широк спектър на приложение (Pahl & Beitz, 1974).

Чрез създаване на оптимален типоразмерен ред се намаляват значително времето и разходите за проектиране, намалява се номенклатурата от предлагани изделия и използвани материали, увеличава се серийността на предлаганите изделия, което от своя страна води до намаляване на себестойността. Подобрява се надеждността, облекчава се обслужването, поддръжката, ремонта и др.

В специализираната литература са известни различни методики за избор на оптимален типоразмерен ред на технически обекти, които имат и някои недостатъци и нерешени проблеми.

На първо място може да се постави игнорирането на многокритериалната същност на оптимизационната задача. Използват се предимно еднокритериални математически модели, които не отразяват адекватно многобройните изисквания и ограничения на потребителските изисквания към техническите изделия. Отчитането на всички съществени критерии е един от важните и отговорни етапи в процеса на избор на оптимален типоразмерен ред, тъй като ако построенният математически модел не е адекватен на изходната задача, то никакъв метод за оптимизация не може да помогне и получаваното „оптимално решение“ винаги ще бъде лошо.

Друг недостатък на някои от използваните модели е отсъствието на метод за отчитане на ограниченията върху приложимостта на елементите на типоразмерния ред на техническото изделие.

На трето, но не на последно място е неотчитането на неточността и неопределеността на изходните данни (Малаков, 2009).

Целта на разработката е да се създаде методика за определяне на оптимален параметричен ред на техническо изделие, в която е направен опит да се предложат решения на някои проблеми.

## **Цел на дисертационния труд, основни задачи и методи за изследване**

В резултат на анализа на известни публикации и изследвания, посветени на избора на оптимални типоразмерни редове е формулирана целта на дисертационната работа:

**Да се разработи и апробира методика за избор на оптимален типоразмерен ред на технически изделия.**

За постигане на поставената цел е необходимо да се решат следните задачи:

1. Да се определят основните етапи и съответните задачи при избор на оптимален типоразмерен ред на технически изделия.
2. Да се предложи критерий за оценка на типоразмерните редове и да се построят математически модели на задачите.
3. Да се създаде методика за събиране на данни и определяне на потребностите от технически изделия с определени стойности на главните параметри.
4. Да се разработят алгоритми и приложна програма (софтуерен продукт) за оптимизация на типоразмерни редове.
5. Да се приложи разработката за оптимизация на типоразмерен ред на изделие „Гъвкав кабел”.

### **Научна новост**

На основата на анализ са определени характерните особености на задачата за определяне на оптимални типоразмерни редове на технически изделия. Разработена е методика за оптимизация на типоразмерни редове на технически изделия. Разработени са математически модели и алгоритми за решаване на задачата за избор на оптимален типоразмерен ред на техническо изделие при едно- и двупараметрична задача, както без, така и с наличие на ограничения върху приложимостта на елементите на типоразмерния ред.

Изведена е аналитичната зависимост за критерия за оптималност „сумарни разходи“, включващ технологичната себестойност и допълнителните разходи в сферата на експлоатация от несъответствие между търсене и предлагане, като е определена и функционалната зависимост между сумарните разходи и влияещите параметри чрез регресионен анализ на данни от индустрията.

### **Практическа приложимост**

Чрез създаване на оптимален типоразмерен ред се намаляват значително времето и разходите за проектиране, намалява се номенклатурата от предлагани изделия и използвани материали, увеличава се серийността на предлаганите изделия, което от своя страна води до намаляване на себестойността. Подобрява се надеждността, облекчава се обслужването, поддръжката, ремонта и др.

### **Структура и обем на дисертационния труд**

Дисертационният труд е в обем от 155 страници, като включва увод, 4 глави за решаване на формулираните основни задачи, списък на основните приноси, списък на публикациите по дисертацията и използвана литература. Цитирани са общо 182 литературни източници, като 164 са на латиница и 18 на кирилица. Работата включва общо 86 фигури и 36 таблици. Приложението включва общо 62 фигури и 8 таблици. Номерата на фигурите и таблиците в автореферата съответстват на тези в дисертационния труд.

## **II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД**

### **Глава 1. Обзор и анализ на съществуващи решения**

В настоящата глава са разгледани съществуващи методики за определяне на оптимални типоразмерни редове на технически изделия. Направено е сравнение на изложените методики и са посочени техните предимства и недостатъци.

#### **1.1. Размерни редове на технически изделия**

Типоразмерните редове предоставят рационализация на проектантски и производствени процедури (Pahl & Beitz, 1974).

*За производителя имат следните предимства:*

- Работата по дизайна може да се извърши еднократно и да се използва за множество приложения.
- Производството на избрани размери може да се повтори в партиди. По този начин може да се постигне по-висока рентабилност.
- Възможно е постигането на по-високо качество.

*Това предполага следните предимства за потребителя:*

- конкурентни и висококачествени продукти
- кратко време на доставка
- лесен достъп до резервни части и принадлежности.

*Неблагоприятни последици за производителя и потребителя са:*

- ограничен избор от размери, не винаги с оптимални оперативни свойства.

*С типоразмерни редове се отнасяме за технически артефакти (машини, възли и компоненти) за широка сфера на приложения, които:*

- изпълняват една и същата функция
- се основават на един и същи принцип
- са изработени в различни размери
- включват сходни производствени процеси.

Съставянето на параметрични редове допринася за рационализиране на конструирането, намаляване сроковете за тестване на опитните образци, унифициране на технологията на производството, намаляване номенклатурата на използваните материали, преминаване към едросерийно и масово производство със съответно увеличаване на производителността и намаляване на стойността на продукцията.

#### **1.2. Обзор и анализ на известни методики за избор на оптимален типоразмерен ред**

##### **1.2.1. Методика за съставяне на параметрични редове от съединители (Лефтеров et al., 1986)**

Предложената методика разделя типоразмерния ред според физичните характеристики на изделията. Проф. Лефтеров е взел под внимание зависимостите между характеристиките на изделието и по този начин е определил параметрична зависимост между представителите на типоразмерния ред. Методиката е много подходяща, когато е налага да се разработи ново техническо изделие. Определянето на параметрите на представителите на типоразмерния ред като членове на прогресия, позволява по-бърз дизайн, както и стандартизиране на изграждащите го елементи. В методиката обаче, не е взето

под внимание потребителското търсене и техническата приложимост на изделията. В днешното време на пазарна икономика, най-важни са нуждите на пазара и желанията на клиентите. Една такава методика, базирана единствено на геометричното подобие на техническите изделия, би превърнала компанията в неконкурентноспособна и неатрактивна за масовия потребител.

#### **1.2.2. Оптимизация на параметричните редове на основните възли на автоматичните линии (Дашенко & Белоусов, 1983)**

Предложената от Дашенко методика е базирана на разходите за производство и експлоатация на модулите от типоразмерния ред. Счита се, че при несъответствие между търсеното и предлаганото изделие, потребителят е принуден да инвестира повече в закупуването, както и да претърпи загуби от непълното натоварване на оборудването си. Методиката на Дашенко е насочена към това да намери баланс между потребностите на потребителите и интереса на производителите.

Недостатък на методиката е, че като оптимален се взема възелът с по-високи параметри. При определяне на критерий за оптималност трябва да се вземе под внимание и конкретното приложение на съответният възел. За един потребител може оптималното решение да бъде възел с по-високи параметри и съответно по-висока цена, докато за друг по-ниските параметри и съответно по-ниска цена да бъде предпочитано компромисно решение.

#### **1.2.3. Типоразмерни редове и модулни продукти (Pahl & Beitz, 2007)**

Методиката на Pahl и Beitz е базирана основно на законите за подобие. Авторите определят съставянето на типоразмерни редове, като една последователност от създаване на основен дизайн, който да бъде проектиран и конструиран в съответствие с изискванията на потребителите, а след това този основен дизайн да бъде използван за база за генериране на всички останали представители на типоразмерния ред. Според Pahl и Beitz, всички елементи на типоразмерния ред трябва да бъдат в средата на работния диапазон. Това позволява да не се навлиза в гранични състояния с възможни неприятни последици.

В методиката не е обърнато внимание на конкретните потребителски изисквания, а е съставен типоразмерен ред, базиран на стандартни редове предпочитани числа. Недостатък е, че въпреки това, редът не покрива изцяло нуждите на клиентите, а е базиран отново на стандартни редове с определена стъпка.

Положително качество на методиката е, че е направено проучване на търсенето на подобни изделия в миналото и въз основа на тях е съставен параметричният ред.

#### **1.2.4. Оценка на разходите за определяне на оптимален параметричен ред (Mueller, 2011)**

Проектирането на типоразмерен ред в посочената методика се характеризира с факта, че всички размери са извлечени от основния проект. Тъй като подобряването на основния типоразмер с цел намаляване на производствените разходи предизвиква разходи за развойна дейност от своя страна, възниква въпросът за оптимални дейности за проектиране. Целта на производителя да се намалят разходите за широк типоразмерен ред, т.е. производствени и развойни разходи, като се произвежда само един типоразмер противоречи на желанието на клиентите за голям брой на типоразмерите с оптимални оперативни свойства. Този компромис също трябва да бъде решен от проектанта. Оптимални решения за проектиране, свързани с тези комбинации са

възможни само с един модел, който дава възможност за много ранна оценка на разходите, породени от тези решения. В статията е развит модел за изчисляване на разходите, който включва ефектите от подобряване на основния проект и броят на типоразмерите върху общите разходи. Този модел дава възможност за идентифициране на най-доброто решение, т.е. дизайн на типоразмерен ред с минимални разходи. Важни източници на разходи, които могат да бъдат повлияни най-ефективно от проектанта, могат да бъдат представени, изчислявани и променяни по време на процеса на проектиране и изработка. Подходът е анализируем и гъвкав и затова е подходящ за изчисление на разходите в този ранен етап от жизнения цикъл на изделието. Стойността на пределната полезност на допълнителни разходи за развойна дейност, както и връзката между стойностите на абсолютно намаляване на разходите и допълнителните разходи за развойна дейност са ограничаващите фактори на практическото използване на модела.

#### **1.2.5. Оценка на неопределеността при избор на оптимален типоразмерен ред (Lotz et al., 2016)**

Тази методика класифицира различни видове неопределеност на мащабирането, които възникват при разработване на типоразмерен ред. Неопределеността на типоразмерния ред може да бъде разделена на две групи: една, която се отнася до различията в свойствата на продукта или процеса и друга, която се отнася до ефекти, които са пренебрегнати целенасочено или поради невежество. Неопределеността от този тип е свързана с продуктовите модели и води до недостатъчни математически модели за процеса на мащабиране. Последствията от това са, че се изискват итерации, за да се осигури подходящ резултат в процеса на мащабиране. Изследването на различните ефекти от мащаба на неопределеността показва как процесът на развитие на типоразмерен ред се влияе от неопределеността по по-детайлен начин. В зависимост от ефекта, процесът на развитие на типоразмерния ред може да бъде подобрен чрез очакване на зависими от размера ефекти по време на ранните етапи на процеса на проектиране на продукта. Това е начин да се приложи стратегия за предварително задаване на размери в развитието на типоразмерните редове. Потенциалът за подобрене се анализира качествено и е свързан с възникващата неопределеност.

След обобщаване на основните полета на мащабиране, проектирането на типоразмерите, неопределеност и мащабиране на неопределеността, е представен анализ на видовете мащаба неопределеност (епистемична и алеаторна). Анализът на процеса на развитие на типоразмерния ред на Pahl и Beitz показва, че връзката между различните видове неопределеност може да бъде намерена при трансфера от продуктови модели на основен дизайн до математически мащабируеми модели, както и от тях към продуктови модели на последователен дизайн. Наличието на неопределеност води до увеличаване на разходите, дължащо се на повишената полу-подобност.

#### **1.2.6. Типоразмерен ред базиран на взаимодействието човек-машина (MMI) (Lotz et al., 2015)**

Методите от ергономията създават взаимодействието човек-машина, който е подходящ за определена задача. Ако това взаимодействие е оптимизирано за среден типоразмер от типоразмерния ред, е осигурена максимална съвместимост или минимум адаптивна дизайнерска работа. Разумно изключение би било, ако геометрично сходен продукт отговаря на ергономичните изисквания на всички последователни типоразмери от типоразмерния ред или най-малкото на повечето

от тях, което води до незначително допълнително конструктивно усилие и само малки допълнителни разходи в производството.

Важната част от модела е взаимодействието между потребителя и уреда. То може да бъде разделено на две категории. Първо, има планирано взаимодействие, напр. сила, която потребителят предвижда при натискане лост, бутон и т.н., както и информация, която трябва да бъде обработена от потребителя. Вторият тип взаимодействие може да се моделира като смущение, напр. ако потребителят разлее чаша вода върху изделието. Този вид смущения не е пряко свързана с разработването типоразмерен ред (това е от значение за основния дизайн).

### **1.3. Обзор и анализ на известни методики за определяне на потребностите от технически изделия**

Прогнозирането на търсенето е важен проблем при оптимизацията на типоразмерните редове. От него зависи до голяма степен изборът на елементите, които да бъдат включени в типоразмерния ред. (Malakov et al., 2015). За решаването на този проблем е необходимо събирането на голям обем информация.

Употребата на конвенционални методи за прогнозиране на търсенето (Greene, 2011), (Gujarati & Porter, 2008), (Gujarati, 2009), (Kadric et al., 2015) е трудно, когато създаваме нов продукт, за който няма необходимата информация относно продажби или клиентски потребности от предишни периоди. В този случай, прогнозирането е съпроводено с редица проблеми, произтичащи от високата степен на несигурност и свързаните неясни въпроси за необходима и достатъчна мярка за точност на изчисленията, когато първоначалните условия са неточни и непълни.

В рамките на жизнения цикъл на продукта и услугата на всяка организация има няколко момента, в които компанията взаимодейства с клиентите си. Всяка комуникация е възможност за събиране на данни от клиенти и за повлияване на поведението им.

## **Глава 2. Теоретични основи на оптимизацията на типажа**

### **2.1.1. Постановка и анализ на задачата за избор на оптимален параметричен ред**

Обект на разглеждане са изделия  $Z$ , всеки от които представлява съвкупност от стойности на избрани параметри:

$$Z = \{x_1, x_2, \dots, x_w, \dots, x_W\}, \quad (2.1)$$

където  $x_w$  е стойността на  $w$ -тия параметър на изделието, а  $W$  – броят на параметрите, характеризиращи всяко изделие.

В резултат на статистическа обработка на данни от проучване на пазара е определена функцията на търсенето  $N(z) = N(x_1, \dots, x_w, \dots, x_W)$  в зависимост от стойностите на техните параметри, като за всеки параметър имаме:

$$x_w \in \tilde{X}_w = \{\tilde{x}_{w,1}, \tilde{x}_{w,2}, \dots, \tilde{x}_{w,m_w}, \dots, \tilde{x}_{w,\tilde{M}_w}\}, \quad w = 1 \div W, \quad m_w = 1 \div \tilde{M}_w, \quad (2.2)$$

където  $\tilde{X}_w$  е множеството от възможни стойности на  $w$ -тия параметър на изделието, определени от проучване на потребностите, а  $\tilde{M}_w$  – броят на възможните стойности за  $w$ -тия параметър на изделието. В този случай функцията на търсенето се удовлетворява от типоразмерния ред



$\tilde{Z} = \{\tilde{z}^1, \tilde{z}^2, \dots, \tilde{z}^I, \dots, \tilde{z}^{\tilde{L}}\}$ ,  $I = 1 \div \tilde{L}$ , където  $\tilde{L}$  е броят на елементите в него. Очевидно този брой е много голям. За редуциране на броя на типоразмерите в него, стойностите на параметрите  $x_w$ , се избират от стандарти или от редовете на предпочитаните числа, т.е.:

$$x_w \in \bar{X}_w = \{\bar{x}_{w,1}, \bar{x}_{w,2}, \dots, \bar{x}_{w,m_w}, \dots, \bar{x}_{w,\bar{M}_w}\}, w = 1 \div W, m_w = 1 \div \bar{M}_w, \quad (2.3)$$

където  $\bar{M}_w$  е броят от допустими стойности за  $w$ -тия параметър на изделието, определени от изискванията на стандарти. Приемаме, че всеки типоразмер  $\bar{z}^I$ ,  $I = 1 \div \bar{L}$ , се използва за удовлетворяване на търсенето от изделия със стойности на параметрите, които се променят в границите от  $\bar{x}_w^{I-1}$  до  $\bar{x}_w^I$ , като  $\bar{x}_w^{I-1} \in \bar{X}_w$ ,  $\bar{x}_w^I \in \bar{X}_w$ ,  $\bar{x}_w^{I-1} < \bar{x}_w^I$ ,  $w = 1 \div W$ . Следователно потребностите за всеки типоразмер  $\bar{z}^I$ ,  $I = 1 \div \bar{L}$ , са:

$$N^I = \int_{\bar{x}_1^{I-1}}^{\bar{x}_1^I} \int_{\bar{x}_2^{I-1}}^{\bar{x}_2^I} \dots \int_{\bar{x}_W^{I-1}}^{\bar{x}_W^I} N(x_1, x_2, \dots, x_W) dx_1 dx_2 \dots dx_W \quad (2.4)$$

където  $N(x_1, \dots, x_w, \dots, x_W)$  е диференциалната функция на търсенето.

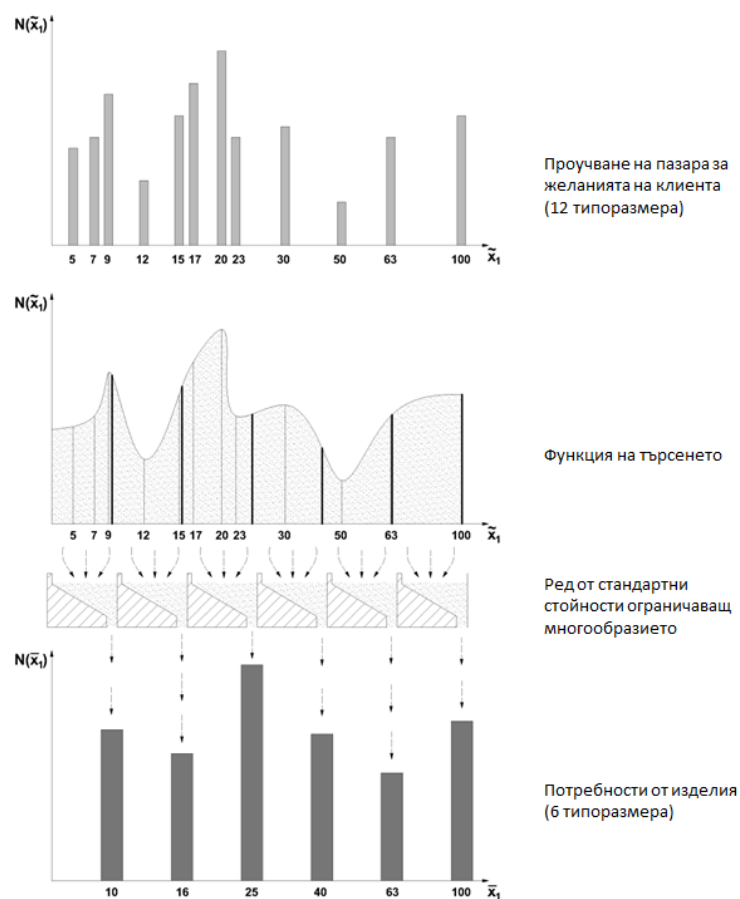
И в този случай броят на елементите  $\bar{L}$  в типоразмерния ред  $\bar{Z} = \{\bar{z}^1, \bar{z}^2, \dots, \bar{z}^I, \dots, \bar{z}^{\bar{L}}\}$ ,  $I = 1 \div \bar{L}$ , удовлетворяващ потребностите от изделия със стандартни стойности на основните параметри, е много голям и малко производители могат да си позволят да произвеждат всички типоразмери. При отсъствие на ограничения върху комбинирането на стойности на основните параметри, броят на елементите в реда  $\bar{Z} = \{\bar{z}^1, \bar{z}^2, \dots, \bar{z}^I, \dots, \bar{z}^{\bar{L}}\}$  е  $\bar{L} = \prod_{w=1}^W \bar{M}_w$ .

Следва да се отбележи, че във всеки ред при решаване на задачата задължително трябва да е включено изделие с максимални стойности на основните си параметри, т.е.  $z^L = \{x_{1,\bar{M}_1}, x_{2,\bar{M}_2}, \dots, x_{w,\bar{M}_w}, \dots, x_{W,\bar{M}_W}\}$ , което произтича от изискването за удовлетворяване на всички потребности на клиентите.

На Фиг. 2.1 е показан описаният процес на редуциране на броя на типоразмерите с използване на редовете от предпочитани числа при  $W = 1$ .

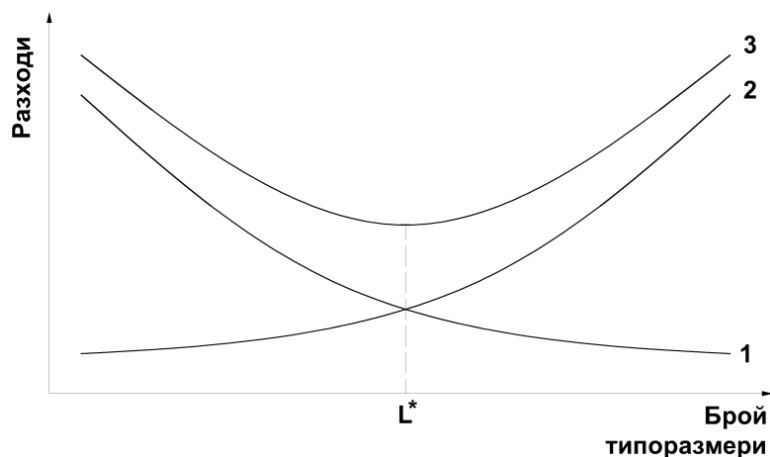
В общия случай на пазара се предлагат параметрични редове  $\hat{Z} = \{\hat{z}^1, \hat{z}^2, \dots, \hat{z}^I, \dots, \hat{z}^{\hat{L}}\}$ , включващи ограничен брой типоразмери  $\hat{L}$ , като обикновено  $\hat{L} \leq \bar{L}$ . Това неравенство изразява противоположните интереси на потребители и производители. За потребителите на изделия е по-благоприятно на пазара да се предлага възможно най-голям брой типоразмери, т.е. да е изпълнено условието  $\hat{L} \approx \bar{L}$ . В този случай произвежданите изделия ще бъдат с по-висока себестойност, тъй като намалява обемът на партидите за всеки типоразмер. Като резултат на това е възможно да се увеличат сумарните (общите) разходи и да се намали икономическата ефективност от приложението на типоразмерния ред.

Следователно, за разрешаване на това противоречие е необходимо да се намери такъв типоразмерен ред, удовлетворяващ функцията на търсенето, който се явява компромис между изискванията на потребителите за голяма гъстота на реда за по-пълно и точно задоволяване на потребностите им и изискванията на производителите за по-разредени редове, с цел увеличаване на серийността и намаляване на разходите на произвежданите изделия.



Фиг. 2.1 Определяне на потребностите от изделия

Представа за характера на този компромис по отношение на броя на елементите в типоразмерните редове ни дава Фиг. 2.2, където с крива 1 са показани разходите за експлоатация на типоразмерните редове, с 2 – разходите за тяхното производство и с 3 – общите (сумарните) разходи, както в сферата на производство, така и в сферата на експлоатация. Всяка точка на абсцисата представлява типоразмерен ред с определен брой елементи, който удовлетворява всички потребности. Ординатите на крива 3 са равни на сумата от ординатите на криви 1 и 2. Както се вижда от фигурата, общите разходи са минимални в точка  $L^*$ , съответстваща на параметричен ред с оптимален брой типоразмери.



Фиг. 2.2 Изменение на разходите в зависимост от броя на елементите в типоразмерните редове

Намирането на този типоразмерен ред е свързан с решаване на следната задача:

*При изпълняване на условието за удовлетворяване на потребностите от изделия, зададени чрез функция на търсенето, да се определи броят на елементите в реда, стойностите на основните им параметри и необходимият брой от всеки типоразмер, така че предварително зададен критерий, отчитащ финансовите (икономическите) интереси на потребители и производители да има оптимална (минимална) стойност.*

## **2.2. Методика за избор на оптимален типоразмерен ред**

Както се вижда от направения анализ, задачата за избор на оптимален типоразмерен ред е сложна инженерно-икономическа задача, която е интересна и от математическа гледна точка. За нейното решаване се предлага подход, включващ следните основни етапи:

- Етап 1.* Избор на основни параметри на изделията.
- Етап 2.* Определяне на потребностите и построяване на функцията на търсенето.
- Етап 3.* Избор на критерий за оптималност.
- Етап 4.* Определяне на функционалната зависимост между критерия за оптималност и влияещите фактори.
- Етап 5.* Построяване на математически модел.
- Етап 6.* Избор на математически метод.
- Етап 7.* Алгоритмично и програмно осигуряване.
- Етап 8.* Изследване и анализ на чувствителност на целевата функция.
- Етап 9.* Решаване на задачата.

Същността на етапите на предлагания подход са разгледани подробно в дисертацията.

## **2.3. Методика за определяне на потребностите от технически изделия**

Методиката се основава на три основни стъпки:

### **Стъпка 1: Избиране на функции и потребители за анализ**

Първото нещо, което трябва да се разгледа, е обхватът на анализа – както по отношение на параметрите, така и по отношение на потребителите. При избор на клиенти за запитване, трябва да се изберат тези, които са типични за целевия пазар.

### **Стъпка 2: Получаване на (възможно най-добрите) данни от клиенти**

Въпросникът и начина, по който се представя, е единственият метод за въвеждане на изследването. По този начин трябва да се гарантира, че тази стъпка трябва да е толкова ефективна, колкото е възможно да бъде.

### **Стъпка 3: Анализиране на резултатите**

Това е етапът, който мотивира проучването. След като се съберат и обработят резултатите, трябва да се категоризират характеристиките и да се добие представа за най-добрия начин за подредба по приоритет.

Има две нива на анализ, които могат да бъдат направени: дискретни и непрекъснати. И двете са позовавания на математическите понятия и се отнасят до това как те отразяват отговорите на участниците на категориите "Капо".

Всеки подход е полезен, в зависимост от типа на резултати, които се търсят.

## Основна цел на модела

- Да се дефинират 5 универсални категории с изисквания на клиентите, които всички разработчици на продукти и услуги трябва да познават, за да останат конкурентоспособни.
- Да се покаже как всяка от тези 5 универсални категории може да повлияе на удовлетворението и недоволството.
- Да се покаже как две категории добавят стойност, две от категориите намалят от стойността и една от категориите добавя нова стойност.
- Да се помогне на организациите да разберат по-добре потребностите на клиентите си, отколкото клиентите им разбират собствените си нужди.
- Да се осигури механизъм, който да помогне на организациите да разберат и класифицират всички потенциални изисквания или характеристики на клиентите в тези 5 категории, така че да могат да дадат приоритет на усилията за развитие на нещата, които най-много влияят на удовлетворението и лоялността.

## Заклучение

Формулирана е задачата за избор на оптимален параметричен ред. На основата на анализ са определени характерните й особености, които трябва да се вземат под внимание при формализирането й и избора на метод за оптимизация. Предложен е подход за нейното решаване, който включва осем етапа. За основните етапи е направено описание на решаваните проблеми и са предложени средства за тяхното решаване – препоръчани са методи за определяне на потребностите от изделия, избран е критерий за оценка на параметричните редове, в който се отчита и серийността на произведените изделия и натрупването на опит, построен е математически модел на задачата, избран е подходящ математически метод за решаването й и е получена рекурентната зависимост за изчисляване на сумарните разходи.

## Глава 3. Разработване на алгоритми и програми

### 3.1. Разработване на алгоритъм за решаване на задача за оптимизация на типоразмерен ред на техническо изделие

Техническите изделия притежават множество параметри. Някои от тях са неважни или маловажни за изпълняваната от изделието функция. Други параметри са основни и от тях зависи приложението на техническото изделие. Параметричният ред на тези основни параметри е обект на оптимизацията.

Означаваме с  $x$  основния параметър на разглежданото техническо изделие.

Разглеждаме параметричните редове  $X$ , съставени от елементи на стандартния параметричен ред  $X \in X_{total}$ , които удовлетворяват прогнозираната функция на потребностите  $F(x)$ . Този ред  $X_{optimal} = (x_1, x_2, x_3 \dots, x_M)$ , който осигурява минимални сумарни разходи  $R$  през целия период на използването му, ще наричаме оптимален.

За решаване на задачата трябва да представим сумарните разходи  $R$ , като функция на главния параметър  $x_i$ , броя на изделията  $n_i$  от всеки типоразмер, които ще се произвеждат и броя  $k$  на типоразмерите в оптималния параметричен ред. Следователно целевата функция трябва да има вида:

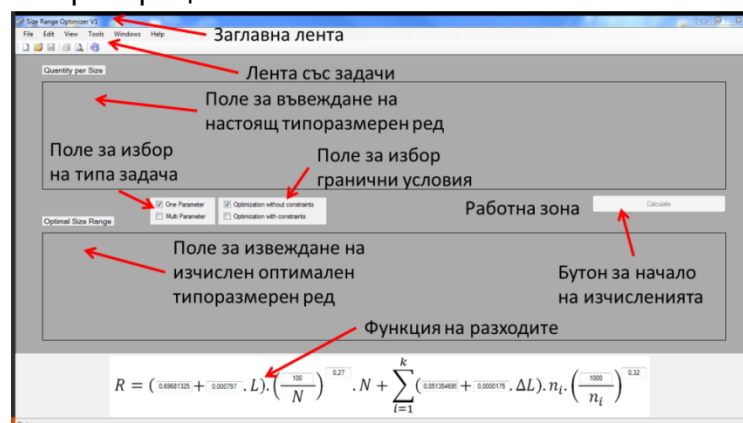
$$R_i = R(k, x_i, n_i) = \sum_{i=1}^k G(x_i, n_i) \quad (3.1)$$

### 3.2. Разработка на софтуерен продукт за решаване на задача за оптимизация на типоразмерен ред на техническо изделие

Разработен е софтуерен продукт за решаване на задача за оптимизация на типоразмерния ред на техническо изделие. Продуктът е създаден в среда за програмиране на езика C#. Подходът при създаване на софтуерния продукт е основан на обектно ориентирано програмиране и имплементиране на MVVM методика ( Model–View–ViewModel ).

Продуктът е базиран на математическите модели описани в Глава 3. За решаване на еднопараметричната задача са използвани двумерни масиви от данни съдържащи стойностите на оптимизируемите параметри на техническото изделие, потреблението на изделията за определен период от време, разходите за производство, загубите от преоразмеряване, общите сумарни разходи, както и новия оптимален типоразмерен ред. При решаване на двупараметричната задача за оптимизация на типоразмерния ред на техническо изделие са използвани тримерни масиви за съхранение на необходимата информация.

Диалоговият прозорец има няколко основни компонента:



Фиг. 3.9 Елементи на главен диалогов прозорец на софтуерния продукт „Size Range Optimizer“

### 3.3. Решаване на тестови задачи

С помощта на разработения софтуерен продукт са решени тестови задачи с цел верификация на работоспособността на продукта. Решени са задачи за оптимизация на едно- и двупараметричен ред и са сравнени резултатите от разработения софтуерен продукт и резултатите получени аналитично.

От изследването се вижда, че резултатите и при двата метода са идентични. Това дава основание да се определи разработения софтуерен продукт за работоспособен.

### 3.4. Изводи

Разработен е софтуерен продукт за решаване на едно и двупараметрична задача за избор на оптимален параметричен ред на техническо изделие. Продуктът е тестван върху множество задачи с различни комбинации между изходните параметри. Резултатите са добри и не са установени грешки и пропуски в изчисленията. Резултатите от решение на оптимизационната задача за избор на оптимален параметричен ред на техническо изделие се представят в удобен за потребителя вид. Може да се избере между табличен вид и графично представяне на функцията на търсене и функция на сумарните разходи.

Продуктът е удобен за употреба както за едно параметрична задача, така и за двупараметрична такава. Възможността за зареждане на база данни от табличен източник улеснява потребителя и подпомага интегрирането на програмата към алтернативен източник на данни за потребителското търсене на техническо изделие.

## Глава 4. Приложение на методиката

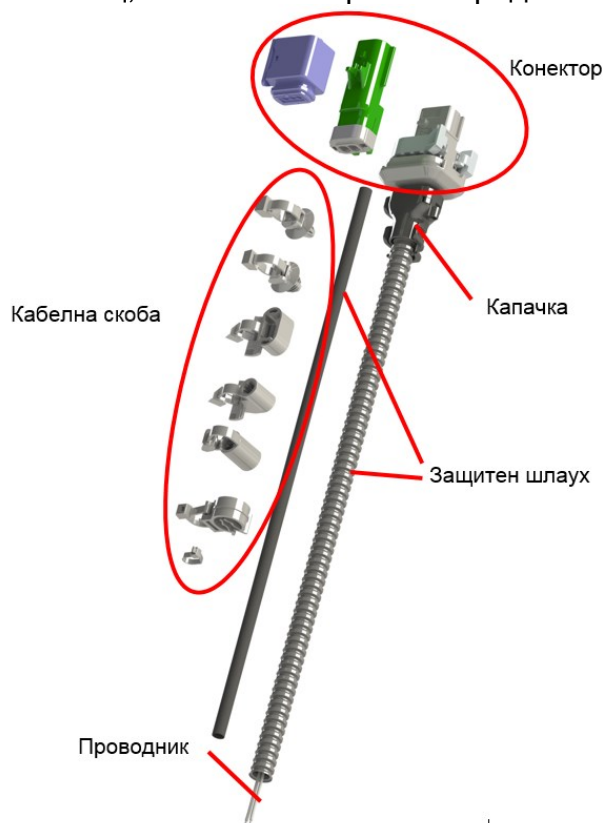
### 4.1. Описание на изделието

Цел на настоящата глава е да приложи разработения метод при стандартизиране на дължините на проводниците, което ще доведе до значително намаляване на използваната номенклатура, увеличаване на потреблението на отделни дължини за сметка на по-малко използваните такива. Това ще улесни в последствие създаването на нови дизайни, като намали възможното разнообразие от конфигурации.

За приложение на методиката е избрано техническо изделие – гъвкав кабел (Фиг. 4.1). Изделието е характерно с голямо разнообразие на параметри и конфигурации. На (Фиг. 4.2) е показана блок схема на взаимовръзките на отделните параметри и конфигурации.

### 4.2. Анализ на съществуващото положение

Компанията използва гъвкави електрически кабели за осъществяване на връзка между произвеждания от нея сензорен елемент и електронното изчислително устройство. Поради голямото разнообразие на приложения и клиентски изисквания, компанията през годините е създавала база данни от всички комбинации, които са били обект на клиентско запитване. Общият брой комбинации е 1693. Такова разнообразие от изделия е неподходящо за масово производство и създава загуби за предприятието. Голямото разнообразие води до намаляване на серийността на отделните изделия, което е причина за повишаване на себестойността на единично изделие. Голямото разнообразие на изделия изисква големи складови площи, където да се съхраняват запаси от тези компоненти, което е и причина за блокиране на голям финансов капитал. С намаляване на разнообразието от предлагани комбинации до стандартен типоразмерен ред, ще се увеличи серийността, което от своя страна ще доведе до намаляване себестойността на произвежданото изделие. Ще се намали необходимата складова площ, както и блокираните средства в складови запаси.



Фиг. 4.1 Техническо изделие - "Гъвкав кабел" с аксесоари

Техническото изделие се състои от няколко основни компонента:

- Конектор, който осъществява механичната връзка с електрическата инсталация на клиента;
- Терминали, които осъществяват електричен контакт с насрещните терминали от инсталацията на клиента;
- Покритие на терминалите, което служи за по-добра електрическа връзка;
- Проводник, в зависимост от приложението и околната температура;
- Защитен шлаух, който предпазва проводника от механични повреди;
- Капачка, която осъществява връзката между конектора и защитния шлаух;
- Различни кабелни скоби и щипки, които спомагат прикрепянето на проводника към приложението.

#### **4.3. Избор на оптимален типоразмерен ред**

##### **Етап 1. Избор на основни параметри на изделията.**

С оглед разнообразността на приложенията, замяната на един тип конектор с друг е нежелателна, а в много случаи дори невъзможна. Подходящ подход е за всички нови приложения да се предлага конектор, който е вече в серийно производство. Сходна е ситуацията с покритието на терминалите. За да се осигури надеждна връзка, без допълнително съпротивление на контакта, трябва да се използва група терминали с еднакво покритие. Това води до невъзможност да бъде намален броят терминали, като се използват в съществуващи вече приложения. Гъвкавите проводници от своя страна са произвеждани в произволни конфигурации. Това е довело до номенклатура от 704 броя различни дължини проводници.

##### **Етап 2. Определяне на потребностите и построяване на функцията на търсенето.**

##### **Стъпка 1: Избиране на функции и потребители за анализ**

###### **Избор на клиенти**

С оглед естеството на произвежданите изделия, клиентите на компанията са основно автомобилни производители или фирми произвеждащи модули и системи за автомобилните производители. Компанията не предвижда продажбата на изделия на производители, извън сферата на автомобилнопроизводството. Това свежда групата на потребители за анализ до съществуващите автомобилостроителни компании. Заявките постъпват от клиентите на компанията под формата на запитване за оферта (RFQ – Request for Quotation). След като бъдат обработени от отдел маркетинг, заявките се препращат към инженерен отдел, където биват анализирани.

Имайки предвид различията в дизайна на всеки автомобил, клиентските изисквания за конфигурацията на техническото изделие, са също много разнообразни. Това води до голяма вариация на предлаганите от компанията технически изделия.

##### **Стъпка 2: Получаване на (възможно най-добрите) данни от клиенти**

Заявката от клиентът трябва да съдържа следната основна информация:

###### **1. Информация за клиента и приложението:**

- a. Име на клиента;
- b. Краен клиент (ако има такъв);
- c. Платформа, на която ще се интегрира;
- d. Дали е замяна на съществуващ продукт или нова платформа;
- e. Производствена;
- f. Срок за експлоатация;
- g. Производствена програма за следпродажбено обслужване;
- h. Срок на следпродажбеното обслужване;

2. Информация за техническото изделие:
  - a. Дължина на проводника;
  - b. Тип конектор;
  - c. Тип конекторни терминали;
  - d. Покритие на конекторните терминали;
  - e. Наличие на защитен шланх върху проводника;
  - f. Кабелни аксесоари;
3. Информация за проекта:
  - a. Наименование на проекта;
  - b. Описание на проекта;
  - c. Статус на проекта;
  - d. Важни срокове за проекта;

### Стъпка 3: Анализирание на резултатите

След проведено проучване сред настоящите клиенти, както и нови такива за компанията, е създадена база данни с изисквания и желания на клиентите. Систематизирана информацията може да бъде намерена в Приложение 4.1.

След извършен анализ на съществуващите конфигурации е установено, че голяма част от номенклатурата е излязла от употреба. Това са изделия, за които няма прогнози за потребление или поръчки от клиенти. Анализът показва, че през следващите 5 години няма да има потребителско търсене за тях. С оглед тази информация, номенклатурата е сведена от 1693 до само 456 броя уникални изделия, които са описани в Приложение 4.2.

При задълбочена проверка на съществуващите дължини гъвкави проводници бе установено, че има 704 броя различни дължини. От тях едва 245 са активни.

#### Етап 3. Избор на критерий за оптималност.

За решаване на задачата, като критерий за оптималност се предлага да се използват сумарните разходи, включващи разходите за производство (технологичната себестойност) и допълнителните разходи в сферата на потребление, които отчитат несъответствието между търсене и предлагане. Втората група разходи се извършават от потребителите на изделието за напасване на изделието при монтаж, например поставяне на допълнителни скоби за укрепване на кабела, промяна на маршрута на кабела, допълнителна защита от околното влияние и др.

Съставена е функцията на сумарните разходи:

$$R = (a + b \cdot L_i) \cdot \left(\frac{e}{N}\right)^{\lambda_1} \cdot N + \sum_{i=1}^k (c + d \cdot \Delta L_i) \cdot n_i \cdot \left(\frac{f}{n_i}\right)^{\lambda_2}$$

Където:

$R$  – сумарни разходи за производство и внедряване;

$L_i$  – дължина на проводника за  $i$ -тия типоразмер;

$N$  – производствена програма на типоразмера, за който се изчисляват разходите;

$n_i$  – производствена програма на  $i$ -тия типоразмер, попадащ в оптимизирания типоразмер;

$(a + b \cdot L_i)$  – производствени разходи за техническото изделие от  $i$ -тия типоразмер;

$\left(\frac{100}{N}\right)^{\lambda_1}$  – мащабен фактор за производствените разходи;

$\lambda_1$  – коефициент изразяващ скоростта на „учене“ при производство на изделието;



$(c + d.\Delta L_i)$  – допълнителните разходи за внедряване на техническото изделие от  $i$ -тия типоразмер;

$\Delta L_i$  – отклонение от дължината на  $i$ -тия типоразмер от необходимия типоразмер

$\left(\frac{1000}{n_i}\right)^{\lambda_2}$  – мащабен фактор на допълнителните разходи;

$\lambda_2$  – коефициент изразяващ скоростта на „учене“ при внедряване на изделието;

#### **Етап 4. Определяне на функционалната зависимост между критерия за оптималност и влияещите фактори.**

Определянето на функционалната зависимост между критерия за оптималност и влияещите фактори (параметри, коефициенти) се извършва на основата на анализ на производството, данни за разходите за производство и за допълнителните разходи от внедряване на техническото изделие „гъвкав кабел“. За обработка на информацията е използван програмния продукт „MiniTab“.

На Фиг. 4.10 са показани резултатите от регресионния анализ за определяне на зависимостта между технологичната себестойност и дължината.

От анализ на производството са определени коефициентите (параметрите) (е) и ( $\lambda_1$ ). Коефициентите (с), (d), (f) и ( $\lambda_2$ ) са получени от клиенти, внедряващи изделието.

Регресионно уравнение:

Обща цена = 0,69681325 + 0.000797\*дължина

| Предположение | Coef       | T     | P     |
|---------------|------------|-------|-------|
| Константа     | 0,69681325 | 1.69  | 0.092 |
| Дължина       | 0.00079666 | 46.64 | 0.000 |

S = 0.103125 R-Sq = 84.9% R-Sq(adj) = 84.9%

Анализ на вариацията

| Източник   | DF  | SS     | MS     | F       | P     |
|------------|-----|--------|--------|---------|-------|
| Регресия   | 1   | 23.136 | 23.136 | 2175.53 | 0.000 |
| Отклонение | 387 | 4.116  | 0.011  |         |       |
| Общо       | 388 | 27.252 |        |         |       |



**Фиг. 4.10** Графика на отклоненията на разходите от регресионния модел

Параметрите имат следните стойности:

$$a = 0,69681325$$

$$b = 0,000797$$

$$e = 100$$

$$\lambda_1 = 0,27$$

$$c = 0,051354699$$

$$d = 0,0000175$$

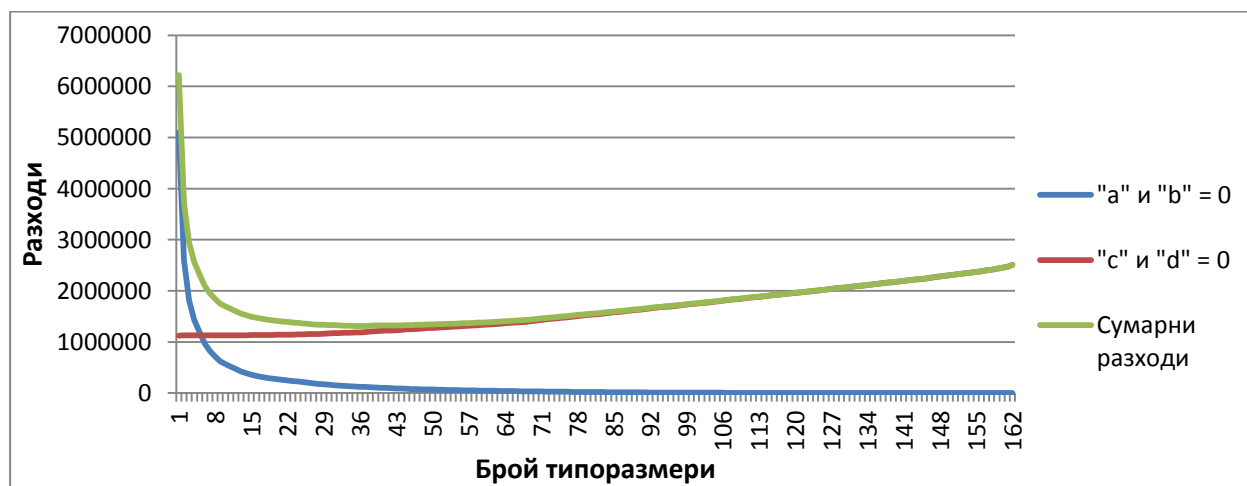
$$f = 1000$$

$$\lambda_2 = 0,32$$

Следователно функционалната зависимост между критерия за оптималност и влияещите фактори има вида:

$$R = (0,69681325 + 0,000797 \cdot L_i) \cdot \left(\frac{100}{N}\right)^{0,27} \cdot N + \sum_{i=1}^k (0,051354699 + 0,0000175 \cdot \Delta L_i) \cdot n_i \cdot \left(\frac{1000}{n_i}\right)^{0,32} \quad (4.1)$$

На Фиг. 4.11 е показано изменението на сумарните разходи и на двете компоненти включени в нея. В Приложение 4.4 са показани стойностите на разходите. То е получено чрез решаване на задачата с разработения програмен продукт при функция на търсенето, показана на Приложение 4.6, като кривата на технологичната себестойност е получена при  $c = 0$  и  $d = 0$ , а кривата на допълнителните разходи при  $a = 0$  и  $b = 0$ .



Фиг. 4.11 Изменение на целевата функция и нейните компоненти

Както се вижда от фигурата, функциите на сумарните разходи има един оптимум. Това свойство се използва при избора на метод за решаване на задачата.

#### Етап 5. Построяване на математически модел.

Построени са два еднопараметрични математически модела на задачата. Първият модел е без налагане на ограничителни условия върху приложимостта на изделията, вторият отчита ограничената приложимост на изделията, т.е. всяко изделие има препоръчителен диапазон на използване, което произтича от спецификата на изделието и неговото приложение в автомобилната индустрия.

### Задача I

Да се намерят  $L^*$ ,  $Z^* = \{z^{*1}, z^{*2}, \dots, z^{*l}, \dots, z^{*L^*}\} = \{x^{*1}, x^{*2}, \dots, x^{*l}, \dots, x^{*L^*}\}$ ,  $N^{*1}, N^{*2}, \dots, N^{*l}, \dots, N^{*L^*}$ , така че избраният критерий за ефективност да има минимална стойност:

$$\min R = R(L, z^1, \dots, z^l, \dots, z^L, N^1, \dots, N^l, \dots, N^L) = \sum_{l=1}^L \bar{R}(z^l, N^l) = \sum_{l=1}^L \bar{\bar{R}}(x^l, N^l)$$

при следните условия:

$$x^{*l} \in \bar{X} = \{\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_m, \dots, \bar{x}_{\bar{M}}\}, \quad l = 1 \div L^* \quad (4.2)$$

$$x^{*L^*} = \bar{x}_{\bar{M}} \quad (4.3)$$

$$\sum_{l=1}^{L^*} N^{*l} = \sum_{m=1}^{\bar{M}} N_m = N_0, \quad (4.4)$$

където:

$\bar{L}$  е броят на елементите (типоразмерите) в произволен типоразмерен ред,  $L = 1 \div \bar{M}$ ;

$L^*$  – броят на типоразмерите в оптималния типоразмерен ред;

$Z^*$  – множеството от типоразмери в оптималния параметричен ред;

$N^{*l}$  – броят на изделията от  $l$ -ия типоразмер в оптималния параметричен ред;

$N_0$  – общото количество на потребностите от изделия;

$N_m$  – потребностите от изделието  $\bar{x}_m$ ,  $m = 1 \div \bar{M}$ , което е елемент на множеството от допустими стойности  $\bar{X} = \{\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_m, \dots, \bar{x}_{\bar{M}}\}$ .

Допускаме, че всеки типоразмер  $z = \{\bar{x}_m\}$  може да изпълнява функциите на всички изделия със стойности на основния параметър в интервала  $0 \div \bar{x}_m$ .

### Задача II

Да се намерят  $L^*$ ,  $Z^* = \{z^{*1}, z^{*2}, \dots, z^{*l}, \dots, z^{*L^*}\} = \{x^{*1}, x^{*2}, \dots, x^{*l}, \dots, x^{*L^*}\}$ ,  $N^{*1}, N^{*2}, \dots, N^{*l}, \dots, N^{*L^*}$ , така че избраният критерий за ефективност да има минимална стойност:

$$\min R = R(L, z^1, \dots, z^l, \dots, z^L, N^1, \dots, N^l, \dots, N^L) = \sum_{l=1}^L \bar{R}(z^l, N^l) = \sum_{l=1}^L \bar{\bar{R}}(x^l, N^l)$$

при следните условия:

$$x^{*l} \in \bar{X} = \{\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_m, \dots, \bar{x}_{\bar{M}}\}, \quad l = 1 \div L^* \quad (4.5)$$

$$x^{*L^*} = \bar{x}_{\bar{M}} \quad (4.6)$$

$$\sum_{l=1}^{L^*} N^{*l} = \sum_{m=1}^{\bar{M}} N_m = N_0, \quad (4.7)$$

$$x^l - x^{l-1} \leq \Delta L, \quad (4.8)$$

където последното ограничение дефинира допустимата разлика  $\Delta L$  между стойностите на главния параметър на два съседни типоразмера, включени в параметричния ред.

**Етап 6. Избор на математически метод.**

За решаване на задачата е избран метод на динамичното програмиране. Методът е описан подробно в Глава 3

**Етап 7. Алгоритмично и програмно осигуряване**

Съставен е алгоритъм за решаване на еднопараметрична задача за избор на оптимален типоразмерен ред на техническо изделие „Гъвкав кабел“, описан подробно в Глава 3, а така също е разработен и съответният програмен продукт.

**Етап 8. Изследване и анализ на чувствителност на целевата функция.**

Извършено е изследване и анализ на чувствителността на избраната целева функция. За целта са проведени теоретични анализи, представляващи решаване на задачата при различни стойности на основните параметри, които са включени в целевата функция. Изследването е проведено в два варианта. Първият вариант (Задача I) е решаване на задачата без ограничения върху приложимостта на типоразмерите, а вторият (Задача II) е при наличие на ограничителни условия върху приложимостта на типоразмерите, т.е. предварително зададена разлика между стойностите на основния параметър на два съседни типоразмера в реда. И двете задачи са решени при еднаква функция на потребностите, показана на Фиг. 4.6 и Приложение 4.6, като стъпката между елементите в изходния ред е 10мм.

**Изследванията на чувствителност включват следните експерименти:**

**А. Промяна на функцията на потребностите**

При промяна на функцията на потребностите, функцията на сумарните разходи има различен вид и съответно минималната стойност е при различен брой типоразмери. Това потвърждава важността от внимателно проучване на „Гласа на клиентите“, детайлно анализиране на постъпилите заявки и коментари и коректно определяне на функцията на потребностите.

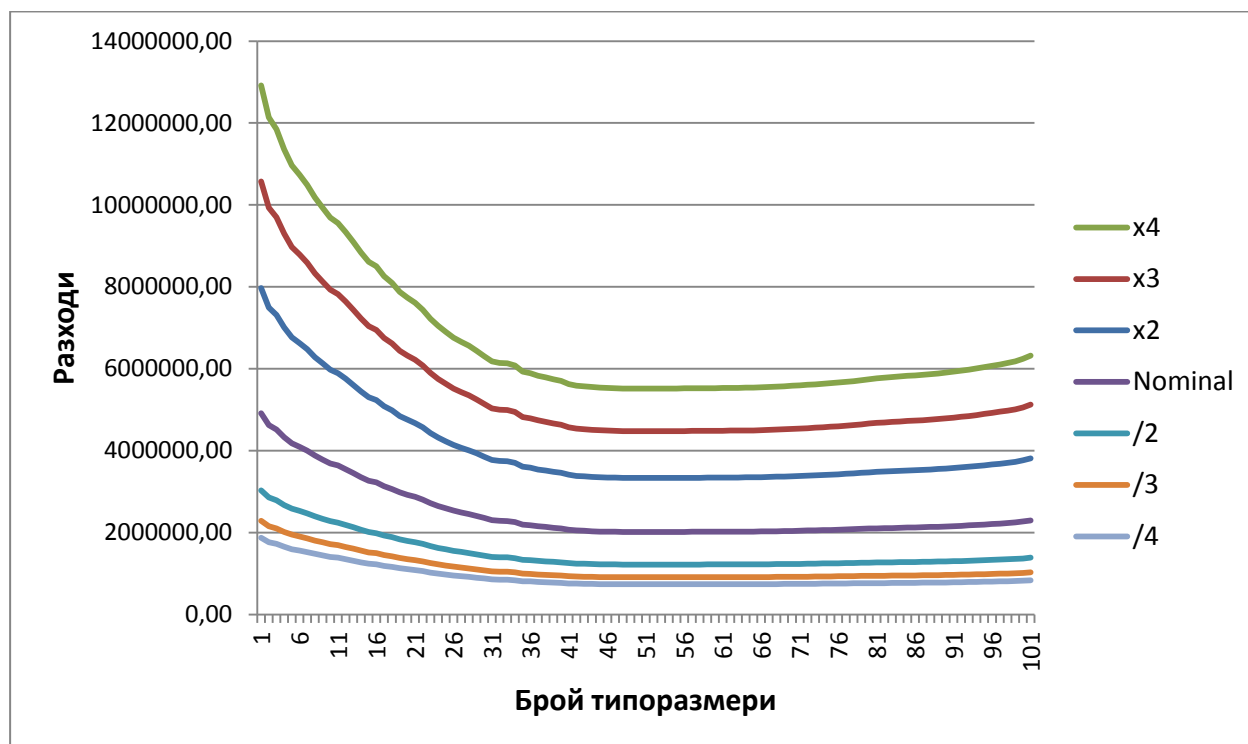
**В. Промяна на производствената програма;**

Анализът на изходната задача дава следните резултати (Фиг. 4.15):

- Увеличение на производствената програма 2 пъти води до увеличение на сумарните разходи с 40%;
- Увеличение на производствената програма 3 пъти води до увеличение на сумарните разходи с 55%;
- Увеличение на производствената програма 4 пъти води до увеличение на сумарните разходи с 63%;
- Намаляване на производствената програма 2 пъти води до намаляване на сумарните разходи с 40%;
- Намаляване на производствената програма 3 пъти води до намаляване на сумарните разходи с 55%;
- Намаляване на производствената програма 4 пъти води до намаляване на сумарните разходи с 63%;

Обобщените резултати от решаване на задачата са показани в Таблица 4.3 и Таблица 4.4, а оптималните типоразмерни редове и съответните производствени програми на всеки елемент в тях са показани в Приложение 4.8 – Приложение 4.21.

Резултатите показват, че мащабиране на функцията на потребности не води до промяна на резултата от оптимизацията, а само до промяна на общите сумарни разходи.



Фиг. 4.15 Мащабиране на функцията на потребностите, с ограничителни условия

**С. Промяна на компонента  $(a+b.L)$ , изразяващ производствените разходи за изделието;**

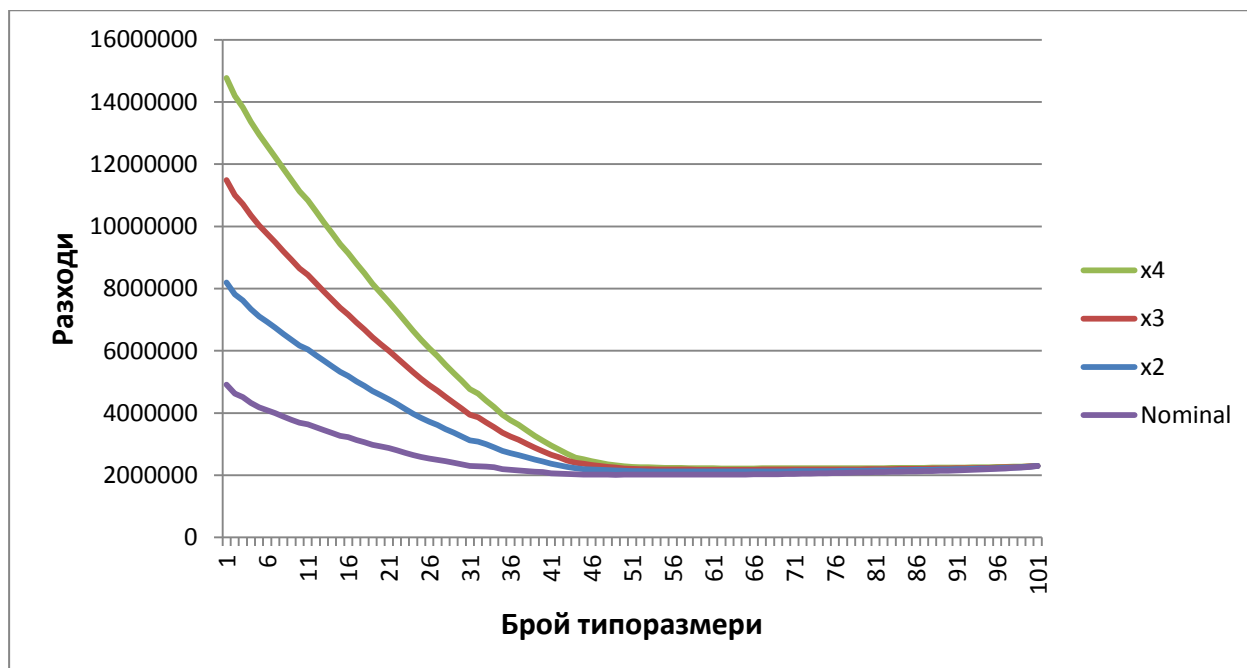
Като резултат от изследването на влиянието на компонента  $(a+b.L)$  върху поведението на функцията на общите сумарни разходи може да се посочи, че увеличението на компонента не води до съществена промяна на оптималния брой типоразмери. Изменението на компонента  $(a+b.L)$  води до увеличаване на общите сумарни разходи.

Обобщените резултати от решаване на задачата са показани в Таблица 4.5 и Таблица 4.6, а оптималните типоразмерни редове и съответните производствени програми на всеки елемент в тях са показани в Приложение 4.22 – Приложение 4.29.

**D. Промяна на компонента  $(c+d.\Delta L)$ , изразяващ допълнителните разходи за внедряване на изделието, произтичащи от несъответствието между търсене и предлагане;**

Промяната на допълнителните разходи за внедряване на изделието води единствено до увеличаване на общите сумарни разходи за оптималния брой типоразмери. Увеличаването на разходите за внедряване води до намаляване на икономическия ефект.

Обобщените резултати от решаване на задачата са показани в Таблица 4.7 и Таблица 4.8, а оптималните типоразмерни редове и съответните производствени програми на всеки елемент в тях са показани в Приложение 4.30 – Приложение 4.37.



Фиг. 4.19 Мащабиране на компонента  $(c+d\Delta L)$ , с ограничителни условия

**Е. Промяна на коефициента (е), изразяващ мащабния фактор на производство на изделието;**

Промяната на мащабния фактор на производство не изменя значително формата на функцията на сумарните разходи. Подобно на експеримент С, промяната се изразява в увеличение на общите сумарни разходи за оптималния типоразмерен ред.

**Г. Промяна на коефициента (f), изразяващ мащабния фактор на внедряване на изделието;**

Подобно на експеримент D, промяната на коефициента (f) води до увеличаване само на общите сумарни разходи за производство на оптималния параметричен ред.

**Г. Промяна на коефициента ( $\lambda_1$ ), изразяващ скоростта на „обучение“ при производство на изделието;**

При увеличаване на коефициента  $\lambda_1$ , общите сумарни разходи намаляват значително. Броя типоразмери в оптималния типоразмерен ред се увеличават.

Обобщените резултати от решаване на задачата са показани в Таблица 4.13 и Таблица 4.14, а оптималните типоразмерни редове и съответните производствени програми на всеки елемент в тях са показани в Приложение 4.50 – Приложение 4.59.

**Н. Промяна на коефициента ( $\lambda_2$ ), изразяващ скоростта на „обучение“ при внедряване на изделието;**

Подобно на експеримент G, увеличаването на коефициента  $\lambda_2$  води до намаляване на общите сумарни разходи за оптималния типоразмерен ред, но тук броят типоразмери в оптималния типоразмерен ред намаляват.

**Ж. Промяна на ограничението за максимално допустимата разлика между желаната от потребителя стойност на основния параметър и следващата по-голяма стойност от оптималния типоразмерен ред**

При увеличаване на максимално допустимата разлика, общите сумарни разходи намаляват. Това е в следствие на намаляване влиянието на ограничителното условие.

### Етап 9. Решаване на задачата

Формулираните задачи са решени с помощта на разработения софтуерен продукт „Size Range Optimizer“.

Поради естеството на приложението, стойностите на основния параметър на техническото изделие за произволни числа. Препоръчително е типоразмерния ред да бъде изграден от членове със стойност от реда на предпочитани числа. За целта типоразмерният ред е стандартизиран до такъв със стойности на основния параметър принадлежащи на реда на предпочитани числа, а именно 5mm, 10mm и 20mm.

Това води до допълнителни разходи както за производителя от влагане на по-голяма дължина проводник, така и за потребителя поради допълнителните разходи за внедряване на изделието.

Представена е функция описваща допълнителните разходи при стандартизиране на стъпката на типоразмерния ред използвайки ред на предпочитаните числа:

$$(0.000797 \cdot \Delta L_i) \cdot n_i \cdot K + (0,0000175 \cdot \Delta L_i) \cdot n_i \cdot \left(\frac{1000}{n_i}\right)^{0,32}$$

Където:

$(0.000797 \cdot \Delta L_i) \cdot n_i \cdot K$  – описва допълнителните разходи за потребителя от по-голямата дължина проводник, вложена в изделието;

$K$  – коефициент отчитащ увеличеното потребление на проводник;

$(0,0000175 \cdot \Delta L_i) \cdot n_i \cdot \left(\frac{1000}{n_i}\right)^{0,32}$  – описва допълнителните разходи за потребителя от разликата между нужната стойност на основния параметър и предлаганата от производителя стойност.

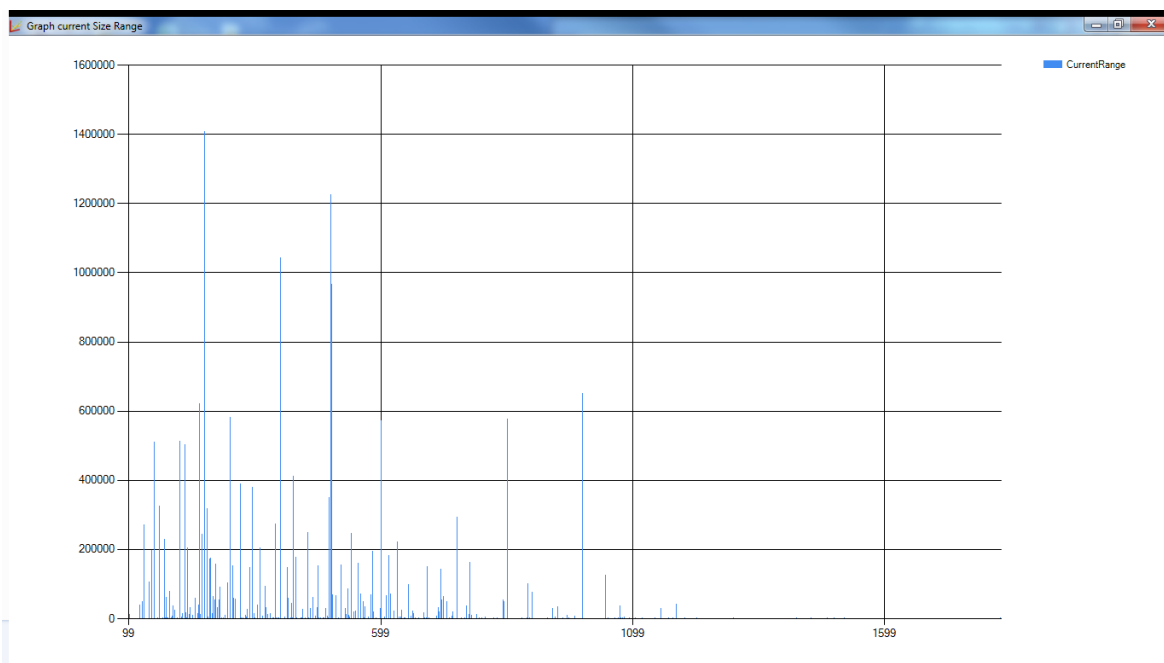
Изчислени са допълнителните разходи при стандартизиране на стъпката на типоразмерния ред използвайки ред на предпочитаните числа.

Таблица 4.17 Допълнителните разходи при стандартизиране на стъпката на типоразмерния ред използвайки ред на предпочитаните числа

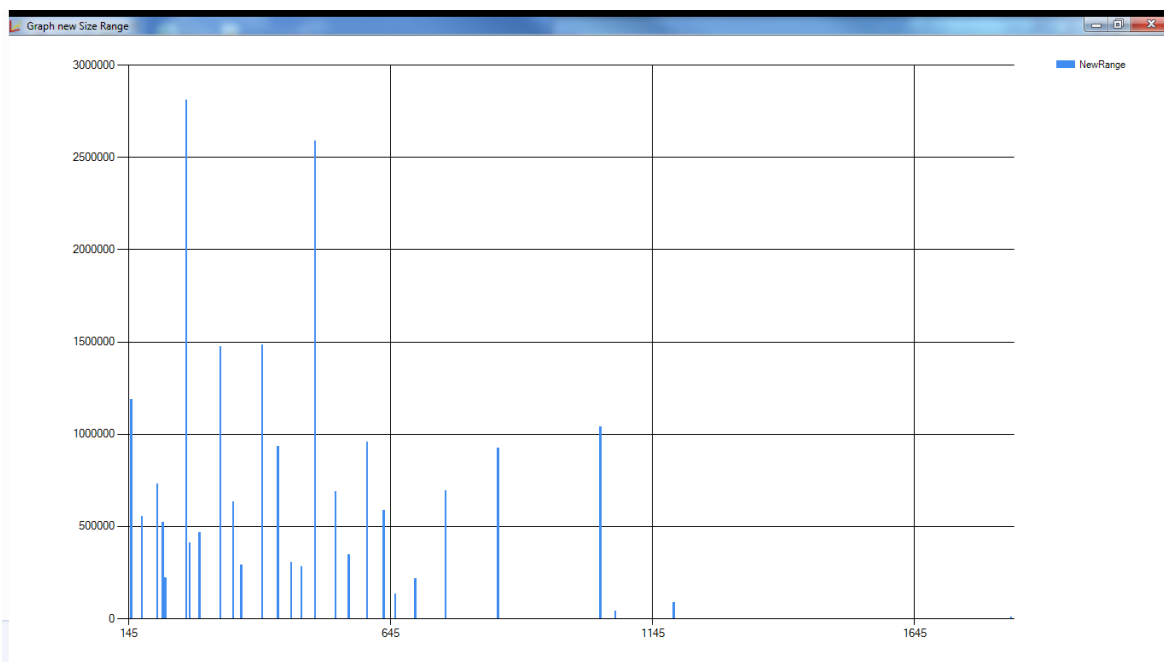
| ред                  | Входни данни | 5mm стъпка | 10mm стъпка | 20mm стъпка |
|----------------------|--------------|------------|-------------|-------------|
| Допълнителни разходи | 0            | 39227,27   | 198864,30   | 789370,20   |
| K                    | 1            | 0.98       | 0.94        | 0.90        |

### Задача I

Решена е задачата без налагане на ограничителни условия за максимално допустима разлика между два съседни типоразмера, при потребности показани на Фиг. 4.28 и в Приложение 4.70. В Таблица 4.18 са показани данните за елементите, които изграждат оптималния типоразмерен ред и съответните им производствени програми, а на Фиг. 4.29 е показана в графичен вид тази информация.



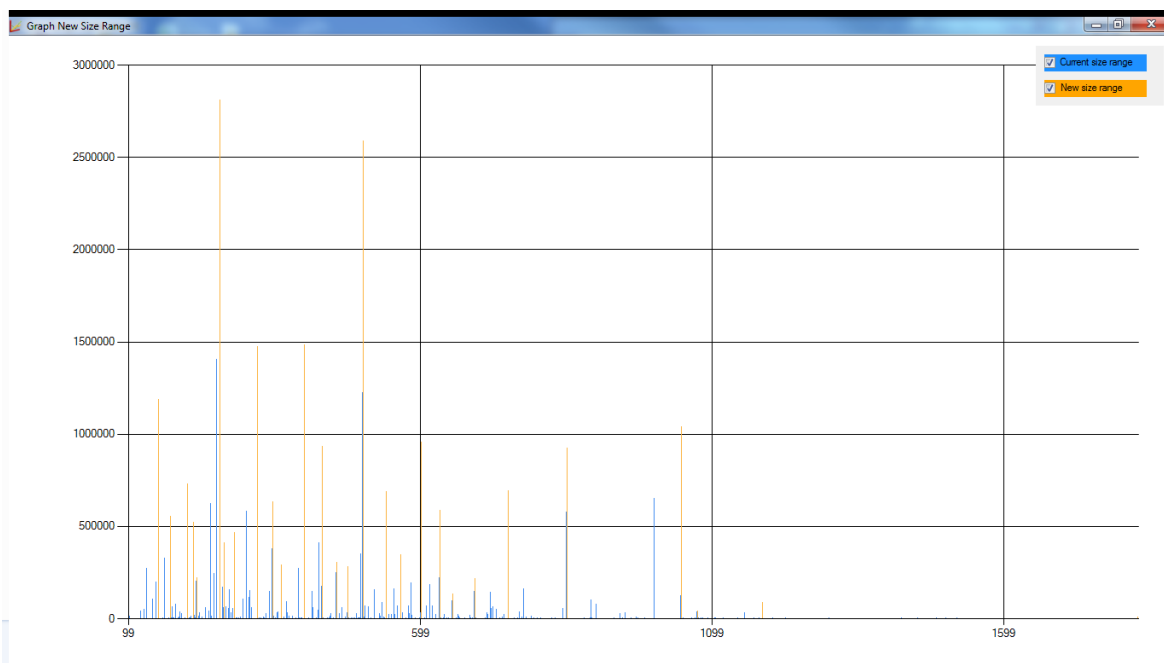
**Фиг. 4.28** Производствена програма на начален типоразмерен ред



**Фиг. 4.29** Производствена програма на оптимален типоразмер без ограничителни условия

На Фиг. 4.30 е показана комбинирана графика на производствената програма на типоразмерите при решаване на задачата без ограничителни условия.



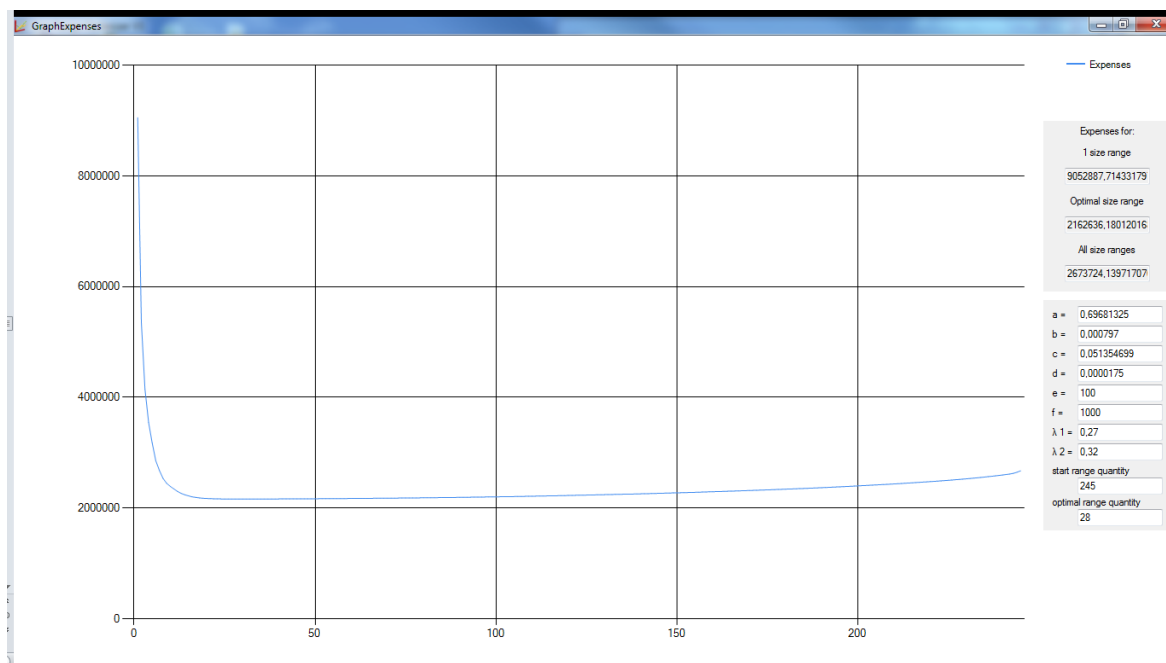


**Фиг. 4.30 Комбинирана графика на производствена програма без ограничителни условия на Задача I.**

**Таблица 4.18 Оптимален типоразмерен ред на техническо изделие без налагане на ограничителни условия**

| №  | Стойност на параметъра | Производствена програма | №  | Стойност на параметъра | Производствена програма |
|----|------------------------|-------------------------|----|------------------------|-------------------------|
| 1  | 150                    | 1188315                 | 15 | 475                    | 283928                  |
| 2  | 170                    | 556301                  | 16 | 501                    | 2588065                 |
| 3  | 200                    | 729206                  | 17 | 540                    | 688091                  |
| 4  | 210                    | 522772                  | 18 | 565                    | 346905                  |
| 5  | 215                    | 222904                  | 19 | 600                    | 956767                  |
| 6  | 255                    | 2812008                 | 20 | 632                    | 586902                  |
| 7  | 262                    | 411956                  | 21 | 654                    | 132550                  |
| 8  | 280                    | 468129                  | 22 | 692                    | 214815                  |
| 9  | 320                    | 1473624                 | 23 | 750                    | 693871                  |
| 10 | 345                    | 632916                  | 24 | 850                    | 922290                  |
| 11 | 360                    | 290331                  | 25 | 1046                   | 1039827                 |
| 12 | 400                    | 1482618                 | 26 | 1074                   | 40289                   |
| 13 | 430                    | 933119                  | 27 | 1186                   | 88784                   |
| 14 | 455                    | 306374                  | 28 | 1830                   | 8528                    |

На Фиг. 4.31 е показано изменението на сумарните разходи за типоразмерните редове. Както се вижда от графиката, оптималният брой типоразмери без налагане на ограничителни условия е 28. Това е крайно незадоволителен резултат, който не удовлетворява повечето от потребителите, тъй интервалите между два съседни типоразмера са в границите от 20мм до 640мм.



Фиг. 4.31 Графика на сумарните разходи без ограничителни условия на Задача I.

За да се построи технически приложим параметричен ред, се налагат ограничителни условия за максималната разлика между два съседни типоразмера.

### Задача II

Тази задача е решена за различна стъпка на елементите в изходния ред и съответно различен брой на типоразмерите и при налагане на ограничителни условия за максимална разлика между желаната от потребителя стойност на основния параметър и следващата по-голяма стойност от оптималния типоразмерен ред от 20мм, както и следните условия:

► S0 – променлива стъпка на стойностите на главния параметър, които са получени от проучване на пазара (т.е. без въвеждане на стандартни стойности), брой на типоразмерите – **245**.

► S1 – равномерна стъпка, като стойностите на главния параметър са кратни на 5, брой на типоразмерите – **162**.

► S2 - равномерна стъпка, като стойностите на главния параметър са кратни на 10, брой на типоразмерите – **101**.

► S3 - равномерна стъпка, като стойностите на главния параметър са кратни на 20, брой на типоразмерите – **58**.

В Таблица 4.19 са показани обобщените резултати от решаването на задачата при описаните по-горе условия, решенията.

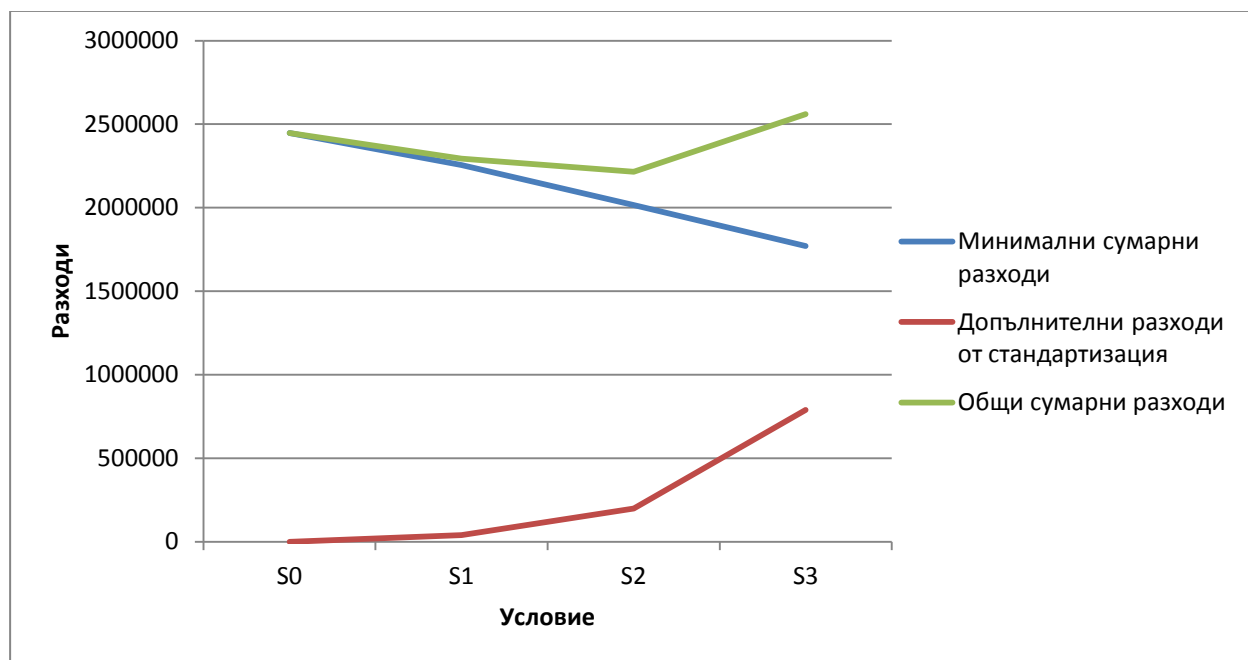
Таблица 4.19 Сумарни разходи

|                                                              | S0         | S1         | S2         | S3         |
|--------------------------------------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| Минимални сумарни разходи                                    | 2447495,49 | 2254640,15 | 2016183,91 | 1770947,43 |
| Брой елементи в оптималния типоразмерен ред                  | 136        | 90         | 55         | 26         |
| Сумарни разходи за ред от един типоразмер                    | 9052887,71 | 6730361,64 | 4916494,38 | 3563559,05 |
| Сумарни разходи за ред, включващ всички възможни типоразмери | 2673724,14 | 2507638,29 | 2298366,90 | 2070107,38 |

Добавят се изчислените допълнителни разходи от стандартизация на стойностите на основния параметър.

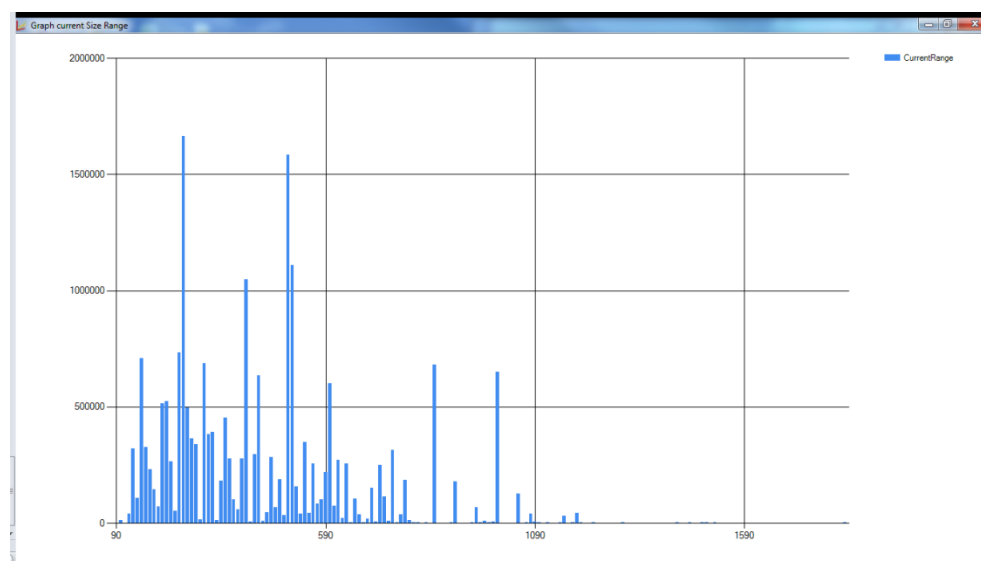
**Таблица 4.20 Минимални сумарни разходи с добавени допълнителни разходи от стандартизация на типоразмерния ред**

|                                                              | S0         | S1         | S2         | S3         |
|--------------------------------------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| Минимални сумарни разходи                                    | 2447495,49 | 2293867,43 | 2215048,22 | 2560317,64 |
| Сумарни разходи за ред, включващ всички възможни типоразмери | 2673724,14 | 2546865,57 | 2497231,21 | 2859477,59 |

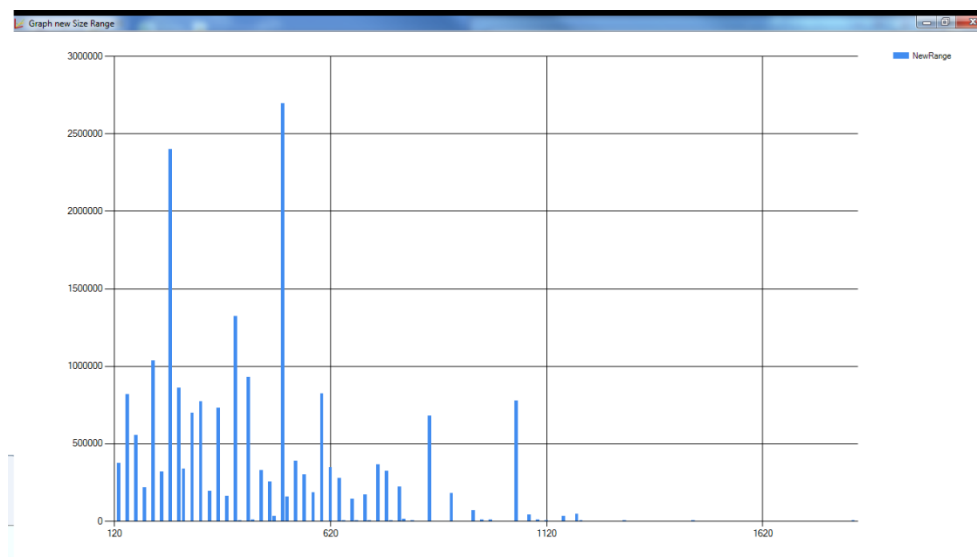


**Фиг. 4.32 Сумарни разходи с добавени допълнителни разходи от стандартизация на типоразмерния ред**

От Таблица 4.20 се избира редът, който е с минимални сумарни разходи и за него се показват описаните по-долу графики.



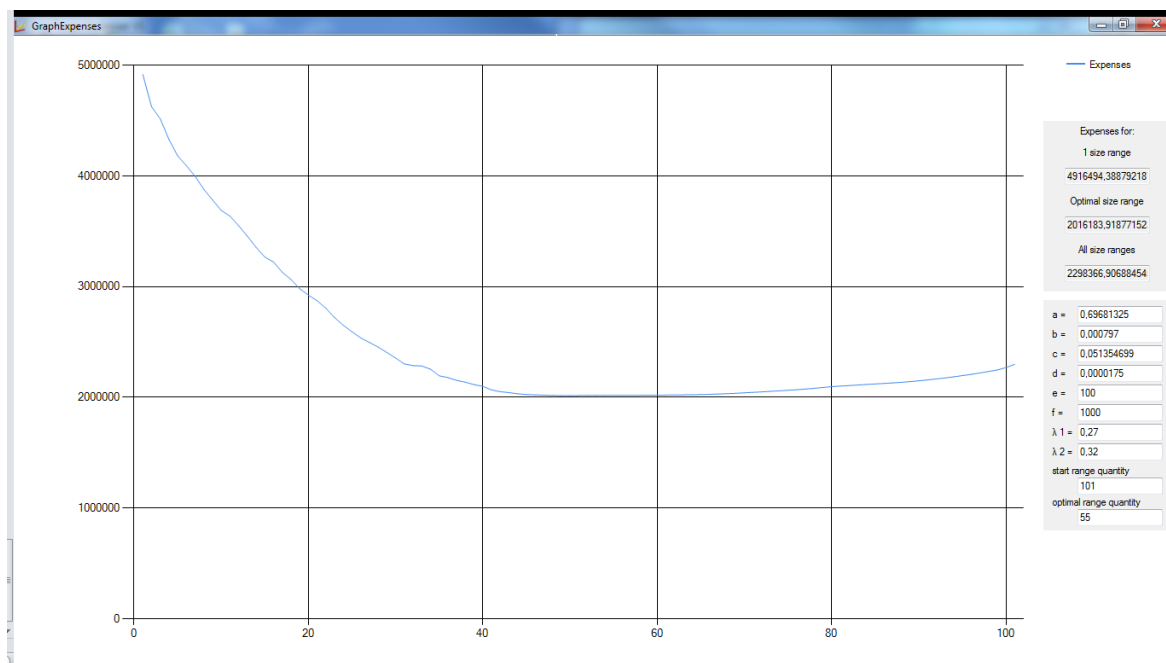
**Фиг. 4.33 Производствена програма на изходен типоразмерен ред**



Фиг. 4.34 Производствена програма на оптимален типоразмерен ред с ограничителни условия

Таблица 4.21 Производствена програма на оптимален типоразмерен ред с ограничителни условия

| №  | Стойност на параметъра, мм | Производствена програма | №  | Стойност на параметъра, мм | Производствена програма |
|----|----------------------------|-------------------------|----|----------------------------|-------------------------|
| 1  | 130                        | 372317                  | 29 | 640                        | 275257                  |
| 2  | 150                        | 815998                  | 30 | 650                        | 2068                    |
| 3  | 170                        | 556301                  | 31 | 670                        | 142533                  |
| 4  | 190                        | 214940                  | 32 | 680                        | 400                     |
| 5  | 210                        | 1037038                 | 33 | 700                        | 169801                  |
| 6  | 230                        | 317918                  | 34 | 710                        | 6293                    |
| 7  | 250                        | 2398021                 | 35 | 730                        | 364329                  |
| 8  | 260                        | 497282                  | 36 | 750                        | 323100                  |
| 9  | 280                        | 701776                  | 37 | 760                        | 900                     |
| 10 | 300                        | 700141                  | 38 | 780                        | 222006                  |
| 11 | 320                        | 773483                  | 39 | 790                        | 12886                   |
| 12 | 340                        | 193367                  | 40 | 810                        | 5137                    |
| 13 | 360                        | 729880                  | 41 | 850                        | 681361                  |
| 14 | 380                        | 159643                  | 42 | 900                        | 180759                  |
| 15 | 400                        | 1322975                 | 43 | 950                        | 66823                   |
| 16 | 410                        | 4628                    | 44 | 970                        | 9128                    |
| 17 | 430                        | 928491                  | 45 | 990                        | 6825                    |
| 18 | 440                        | 8020                    | 46 | 1050                       | 777292                  |
| 19 | 460                        | 329441                  | 47 | 1080                       | 41292                   |
| 20 | 480                        | 255789                  | 48 | 1100                       | 9941                    |
| 21 | 490                        | 34205                   | 49 | 1120                       | 1022                    |
| 22 | 510                        | 2694348                 | 50 | 1160                       | 31548                   |
| 23 | 520                        | 156516                  | 51 | 1190                       | 44270                   |
| 24 | 540                        | 388139                  | 52 | 1200                       | 573                     |
| 25 | 560                        | 298166                  | 53 | 1300                       | 1285                    |
| 26 | 580                        | 184660                  | 54 | 1460                       | 1521                    |
| 27 | 600                        | 820846                  | 55 | 1830                       | 5149                    |
| 28 | 620                        | 344357                  |    |                            |                         |



**Фиг. 4.35 Графика на сумарните разходи с ограничителни условия**

От Фиг. 4.34 се вижда, че новият оптимален типоразмерен ред е значително по-равномерен и интервалите са не повече от 20мм. На Фиг. 4.35 са показани сумарните разходи за производство на типоразмерен ред с налагане на ограничителни условия. От графиката се вижда, че оптималният брой типоразмери е 55.

Определяне на финансовият ефект от въвеждане на оптимален типоразмерен ред на техническо изделие „гъвкав кабел“:

След решение на задачата, разликата между общите сумарни разходи за производство на всички типоразмери и оптималният брой типоразмери е 11.3%. Разликата между общите сумарни разходи за производство на типоразмерен ред от един типоразмер и оптималният брой типоразмери е 56,69%. Броят типоразмери е намален от 101 на 55 (45,5%).

### **Заклучение**

1. Изчислен е оптимален параметричен ред на техническо изделие „Гъвкав кабел“ без налагане на ограничителни условия за максималната разлика между два съседни типоразмера. Резултатите показват, че този вариант не е подходящ за реалното приложение поради малкото на брой типоразмери и голямата разлика между два съседни типоразмера.

2. Изчислен е оптимален параметричен ред на техническо изделие „Гъвкав кабел“ с налагане на ограничителни условия за максималната разлика между два съседни типоразмера. Резултатите са нанесени в таблица и е определена комбинацията от стандартна стъпка и ограничително условие за максималната разлика между два съседни типоразмера така, че сумарните разходи да бъдат минимални. Графично представяне е показано на Фиг. 4.34 и Фиг. 4.35

## Научно-приложни приноси.

1. На основата на анализ са определени характерните особености на задачата за определяне на оптимални типоразмерни редове на технически изделия, които трябва да се вземат под внимание при формализирането ѝ и при избора на подходящ метод за оптимизация
2. Разработена е методика за оптимизация на типоразмерни редове на технически изделия, включваща девет етапа и съответните им задачи.
3. Разработени са математически модели на задачата за избор на оптимален типоразмерен ред на техническо изделие при едно- и двупараметрична задача, както без, така и с наличие на ограничения върху приложимостта на елементите на типоразмерния ред.
4. Предложени са алгоритми за решаване на едно- и двупараметрични задачи за оптимизация на типажа чрез използване на изведени рекурентни отношения на базата на принципа за оптималност на Белман.
5. Изведена е аналитичната зависимост за критерия за оптималност „сумарни разходи“, включващ технологичната себестойност и допълнителните разходи в сферата на експлоатация от несъответствие между търсене и предлагане.
6. Определена е функционалната зависимост между сумарните разходи и влияещите параметри чрез регресионен анализ на данни от индустрията.

## Приложни приноси

1. Въз основа на разработените математични модели, е разработен софтуерен продукт за решаване на едно- и двупараметрични задачи за избор на оптимални типоразмерни редове, позволяващ отчитане на приложимостта на елементите им.
2. Определени са потребностите от изделие „Гъвкав кабел“ в зависимост от неговата дължина.
3. Определен е оптималният типоразмерен ред на изделие „Гъвкав кабел“, както при отсъствие, така и при наличие на предварително зададени граници на приложимост на елементите на реда.
4. Чрез теоретични анализи е изследвана чувствителността на избраната целева функция при оптимизация на типоразмерен ред на изделие „Гъвкав кабел“, в зависимост от промяната на основните параметри.
5. Предложена е методика за определяне на потребностите от технически изделия с определени стойности на главните параметри на основата на използването на известни методи.
6. Основните резултати от разработката могат да се използват в учебния процес на катедра „Автоматизация на дискретното производство“ по дисциплините „Методология на проектирането“ и „Основи на проектирането на мехатронни системи“, както и в научните изследвания и инженерна практика на фирми и организации, занимаващи се с производството и експлоатацията на технически средства за автоматизация.

## **Списък на публикациите, свързани с дисертационния труд**

Основни постижения и резултати от дисертационния труд са публикувани в 5 броя научни статии , от които 2 броя самостоятелни и 7 източници на публикуване (XXIII МНТК "АДП 2014"; XXIV МНТК "АДП 2015"; Българско списание за инженерно проектиране, ScienceDirect; Elsevier; Researchgate; Proceedings of 25th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation; Proceedings of 26th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation).

1. Ценов, В., 2014. Методики за определяне на параметрични редове на технически изделия. In XXIII МНТК "АДП 2014". Созопол, 2014.
2. Ценов, В., 2015. Маркетингово проучване за определяне на функцията на потребностите. XXIV МНТК "АДП 2015".
3. Малаков, И. & Ценов, В., 2018. Избор на оптимален размерен ред на изделие „Гъвкав кабел“. Българско списание за инженерно проектиране, брой 35.
4. Malakov, I., Zaharinov, V. & Tzenov, V., 2015. Size ranges optimization. ScienceDirect, pp.791-800.
5. Malakov, I., Zaharinov, V. & Tzenov, V., 2016. Demand modeling for the optimization of size ranges. Proceedings of the 26th DAAAM International Symposium, pp.0435-44.

## **SUMMARY**

### **Optimization of size ranges of technical products**

MSc. Velislav Petkov Tzenov

Size ranges are common in mass products. They are almost everywhere - machine parts such as bolts, washers or gears, consumer goods such as TVs, refrigerators, gas turbines, airplanes and machine tools.

Products can be scaled by size, power, capacity, speed, strength, etc. to meet the different needs of customers.

By creating an optimal size range, the design time and costs are significantly reduced, the nomenclature of offered products and materials is reduced, and product series is increased, which leads to a decrease of the cost. Reliability is improved; service, maintenance, repair, etc. are improved.

Various methodologies are known in the specialized literature for choosing the optimal, dimensional order of technical objects, which also have some drawbacks and unresolved problems.

The aim of the project is to create a methodology for determining the optimal size range of a technical.

Chapter 1 includes an overview of existing methods for generation of optimal size ranges. Several known methods are analyzed and their strengths and weaknesses are defined. Based on this evaluation are defined conclusions and unsolved problems.

In Chapter 2, new methodology for generating optimal size range and collecting demand function are described. Innovative methods are used to collect information from customers and to develop adequate optimal size range based on specific application and market. All steps of methodology are described in details.

In Chapter 3 are developed algorithms for calculating single-parameter and multi-parameter tasks for calculation of total expenses for manufacturing and implementing a size range. Based on these algorithms is developed a Software product. Functionality of the product allows user to import database from external source. Software product gives as an output charts and diagrams of current size range, optimal size range and expenses. Also all output data can be exported to an external source.

In Chapter 4 methodology and the software product are tested and validated in real project. Industrial product is used as a target for optimization of main functional parameter. Functionality and relevance of the methodology and software product are confirmed.

#### **Conclusion:**

A software product has been developed to solve a single-parameter and multi-parameter tasks for generating an optimal size range of a technical product. The product has been tested on multiple tasks with different combinations of output parameters. The results are good and there are no errors and mistakes in the calculations. The results of the optimization task for generating the optimal size range of a technical product are presented in a user-friendly form. User can choose between a table type and a graphical representation of the demand function and a cumulative cost function. The product is convenient to use for both a single-parameter and multi-parameter tasks. The ability to load a database from a spreadsheet facilitates the user and helps to integrate the program into an alternative data.