

Дж. Алижанов¹, К. Шавазов¹, Е. Л. Жилич²

¹НИИУ «Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства»
г. Ташкент, Узбекистан

E-mail: kadirjon.shavazov@bk.ru

²РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»
г. Минск, Республика Беларусь

РЕГУЛИРОВАНИЕ ДОПУСКОВ СОПРЯЖЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ МЕХАНИЗМОВ ЖИВОТНОВОДЧЕСКИХ ФЕРМ ПРИ РЕМОНТЕ

Аннотация. В работе рассматривается алгоритм оптимизации эффективного распределения ресурсов, определяющих стоимость выполнения сборочных работ при соблюдении ограничений, обеспечивающих высокое качество сборки животноводческих машин и оборудования.

Ключевые слова: допуск, посадка, деталь, механизм, метод, решения, ресурс, эксперимент.

J. Alizhanov¹, K. Shavazov¹, E. L. Zhilich²

¹NRU “Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural Mechanization Engineers”
Tashkent, Uzbekistan

E-mail: kadirjon.shavazov@bk.ru

²RUE “SPC NAS of Belarus for Agricultural Mechanization”
Minsk, Republic of Belarus

REGULATION OF TOLERANCES OF MATING PARTS OF MECHANISMS OF ANIMAL FARMS DURING REPAIR

Abstract. The paper discusses an algorithm for optimizing the effective distribution of resources that determine the cost of performing assembly work while observing restrictions that ensure high quality assembly of livestock machines and equipment.

Keywords: tolerance, fit, part, mechanism, method, solutions, resource, experiment.

Введение

Одним из важнейших направлений повышения эффективности и качества выполнения общего комплекса работ по ремонту машин и механизмов животноводческих ферм является совершенствование сборочных технологических процессов как узловой, так и общей сборки [1]. В современных технологических процессах ремонта машин объемы сборочных работ достаточно велики и могут составлять до 35–40 % от общего их объема в мелкосерийном производстве [2, 3]. Выполнение ремонтных работ в условиях дефицита ресурсов требует развития и применения оптимизационных процедур, современных ресурсосберегающих технологий и вычислительных сред при минимальных затратах на их реализацию. Оптимизация технологических операций сборки машин и механизмов животноводческих ферм на основе научно обоснованных положений, методов и моделей с применением эффективных технических решений позволяет кардинально решать проблему ресурсосбережения с использованием операционных технологий. Исследования показали, что в процессе сборки механизмов целесообразно использовать алгоритмы и модели параметрической оптимизации, эффективного распределения ресурсов, определяющих стоимость выполнения сборочных работ при соблюдении ограничений, обеспечивающих высокое качество сборки.

Основная часть

Ремонт деталей, узлов и сборка механизмов должны производиться с соблюдением технических норм, допусков и технологий обработки поверхностей, предусмотренных соответствующими

технологическими документами. Если в процессе изготовления деталей допущены значительные отклонения от требований чертежа, то при сборке не будет обеспечена необходимая собираемость сборочных единиц. Дополнительная обработка деталей или их выбраковка приводят к повышению себестоимости продукции. В случае ужесточения требований к предельным отклонениям производственные расходы увеличиваются, поскольку с повышением точности обработки значительно возрастают стоимость и время изготовления деталей. Если же отсутствует оборудование, обеспечивающее высокую точность изготовления, то на сборке неизбежны сортировка деталей и переход к селективной сборке.

Применение статистического контроля совокупности деталей при нормальном законе распределения основано на том, что поле допуска задается параметром 6σ («статистический допуск»), где σ – среднее квадратичное отклонение нормального распределения. В этом случае число бракованных изделий из партии деталей не будет превышать 0,27 %.

При сопряжении деталей предельные отклонения их размеров рассчитываются при условии выполнения требований, предъявляемых к допуску сборочной единицы. Можно полагать, что общий допуск собранного узла равен сумме допусков отдельных деталей, входящих в узел.

Существуют различные методы расчета составляющих допусков сопряженных деталей. Методы, основанные на статистической оценке допусков и нахождении их среднеквадратических отклонений, позволяют уменьшить степень риска при расширении пределов допуска на сопряженные детали и сократить потери при сборке. Правильное назначение допусков позволяет достигнуть значительной экономии материальных средств и снизить расходы на производство. Наиболее эффективными могут быть решения, полученные путем реализации оптимизационных процедур, обеспечивающих минимизацию критерия качества в условиях ограничений, определяемых составляющими технологического процесса сборки узла.

Модели распределения ресурсов играют важную роль в решении задач создания операционных технологий для совершенствования технологических процессов в животноводстве. Эти модели позволяют в условиях ограничений объемов ресурсов в каждой конкретной ситуации использовать их с наименьшими потерями, что достигается за счет алгоритмизации и использования оптимизационных методов и эффективных вычислительных процедур.

Следует отметить, что для определенного класса моделей задача оптимальной сборки узла по заданному суммарному допуску может быть решена аналитически. Предположим, что требуется собрать узел, состоящий из n различных деталей. Поскольку допуск узла не должен превышать заданного значения T единиц, и он равен сумме допусков n деталей, то условие сопряжения можно записать:

$$T = t_1 + t_2 + \dots + t_n = \sum_{i=1}^n t_i = \Phi(t_1, t_2, t_3, \dots, t_n), \quad (1)$$

где t_i – допуск i -й детали ($i = 1, 2, 3, \dots, n$).

Предположим, что стоимость изготовленной i -й детали g_i состоит из двух составляющих: постоянной g_{pi} , представляющей собой стоимость заготовки, и переменной c_i , зависящей от сложности и качества обработки. В общем случае переменная составляющая должна быть нелинейной функцией t_i :

$$g_i = g_{pi} + c_i(t_i). \quad (2)$$

Будем полагать, что переменная составляющая $c_i(t_i)$ обратно пропорциональна допуску t_i в m -й степени и может быть представлена зависимостью

$$c_i(t_i) = \frac{K_i}{t_i^m}, \quad (3)$$

где K_i – постоянный коэффициент, зависящий от формы, размеров и свойств материала i -й детали; m – целое число. Тогда стоимость всех деталей, входящих в узел, равна

$$G = \sum_{i=1}^n g_i = \frac{K_1}{t_1^m} + \frac{K_2}{t_2^m} + \dots + \frac{K_n}{t_n^m} + g_{p1} + g_{p2} + \dots + g_{pn} = f(t_1, t_2, \dots, t_n). \quad (4)$$

Задача состоит в минимизации стоимости всех деталей G , входящих в узел, при выполнении ограничения (1), если известны (2) и (3). Поиск минимума G осуществляется путем вариации допусков t_i . Из всех возможных значений t_i , входящих в (1), следует выбирать такие величины допусков деталей узла

$$t_1^* + t_2^* + \dots + t_n^* = T, \quad (5)$$

чтобы функция стоимости (4) принимала минимальное значение.

Для определения требуемых значений допусков деталей можно воспользоваться известными методами параметрической оптимизации. В частности, рассмотрим решение задачи с помощью метода множителей Лагранжа. Согласно этому методу, для поиска экстремума требуется решить систему уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial t_1} + \lambda \frac{\partial}{\partial t_1} &= 0, \\ \frac{\partial f}{\partial t_2} + \lambda \frac{\partial}{\partial t_2} &= 0, \\ \frac{\partial f}{\partial t_n} + \lambda \frac{\partial}{\partial t_n} &= 0, \end{aligned} \quad (6)$$

где λ – множитель Лагранжа.

Простые вычисления частных производных функций (4) и (1) по переменным t_i позволяют записать

$$\begin{aligned} -mK_1 t_1^{-(m+1)} + \lambda &= 0, \\ -mK_2 t_2^{-(m+1)} + \lambda &= 0, \\ -mK_n t_n^{-(m+1)} + \lambda &= 0. \end{aligned} \quad (7)$$

Пусть $\alpha = \frac{1}{m+1}$. Тогда из первого и второго уравнений системы (7) получим оптимальный допуск второй детали t_2 как функцию оптимального допуска t_1 первой (базовой) детали:

$$t_2^* = \left(\frac{K_2}{K_1} \right)^\alpha \cdot t_1^*. \quad (8)$$

Аналогично запишем t_3^* в терминах t_1^* :

$$t_3^* = \left(\frac{K_3}{K_1} \right)^\alpha \cdot t_1^*. \quad (9)$$

Для выбранной модели (1)–(4), если $1 < i < (n-1)$, по индукции получаем

$$t_i^* = \left(\frac{K_i}{K_1} \right)^\alpha \cdot t_1^*. \quad (10)$$

Оптимальный допуск n -й детали:

$$t_n^* = \left(\frac{K_n}{K_1} \right)^\alpha \cdot t_1^*. \quad (11)$$

После подстановки (9)–(11) в уравнение (1) будем иметь:

$$T = S \cdot t_1^*, \quad (12)$$

где

$$S = K_1^{-\alpha} \cdot \left(\sum_{i=1}^n K_i^\alpha \right). \quad (13)$$

Оптимальный допуск базовой детали t_1^* определим с помощью простой зависимости

$$t_1^* = \frac{T}{S}. \quad (14)$$

Допуски других деталей узла рассчитаем по формулам (8)–(11).

Рассмотрим пример.

Выберем сборочный узел, состоящий из пяти деталей. Допуск узла $T=0.022$ (мм). Стоимость деталей оценим по формуле (2) при следующих значениях коэффициентов:

$$K_1 = 0.0035; K_2 = 0.0018; K_3 = 0.00028; K_4 = 0.0070; K_5 = 0.0012;$$

$$g_{p1} = 120; g_{p2} = 180; g_{p3} = 47.5; g_{p4} = 150; g_{p5} = 250 \text{ (у.е.)}$$

Показатели степени в формуле (3) для всех деталей одинаковы и равны $m = 2$.

В результате вычислений по формулам (8)–(14) получены оптимальные допуски деталей узла, представленные вектором:

$$t^* = [t_1^* \dots t_2^* \dots t_3^* \dots t_4^* \dots t_5^*] = [0.0051 \dots 0.0042 \dots 0.0023 \dots 0.0066 \dots 0.0037].$$

Минимальная стоимость деталей составила $P_m = 1280.2$ у.е.

Для сравнения был выполнен расчет стоимости деталей при равных допусках $t_i = \frac{T}{n}$. В этом случае $P = 1459.3$ у.е. Таким образом, оптимальное распределение допусков деталей узла позволяет уменьшить расходы на 179.1 у.е.

Решенная задача может быть отнесена к классу простых задач оптимального распределения ресурсов. Аналитическое решение получено благодаря выбору $m = 2$. Кроме того, в модели отсутствуют ограничения на элементы вектора состояния и др. Ресурсом является параметр T , который наиболее эффективным способом распределяется по n процессам.

Для функциональных зависимостей $\Phi(t_1, t_2, t_3, \dots, t_n)$, $f(t_1, t_2, t_3, \dots, t_n)$ и $g_i(t_i)$ сложной формы трудоемкость вычислений значительно возрастает. Например, для функций (3) с различными показателями степени $m1-m5$ при наличии линейных и нелинейных ограничений, а также ограничений на переменные состояния решения в аналитическом виде получить практически невозможно, и приходится использовать численные методы и алгоритмы оптимизации. Построение таких алгоритмов целесообразно выполнять с использованием инструментов различных вычислительных сред. Для решения класса задач с унимодальными функциями стоимости (3), а также семейства нелинейных задач, отвечающих условиям Куна-Таккера, в работе применен сплайн-метод оптимизации, предложен алгоритм и разработана программа, базирующаяся на применении функции *fmincon* среды MatLAB [4; 5]. Фрагмент программы представлен файл-функцией *s1.m* и блоками скрипт-файла:

```
% s1.m
% Файл-функция.
% Оптимальное распределение допуска узла как ресурса по процессам.
function L=s1(x)
global h1 h2 h3 h4 h5
L=[ppval(h1,x(1))+ppval(h2,x(2))+ppval(h3,x(3))+ppval(h4,x(4))+ppval(h5,x(5))];
```

Первый блок скрипт-файла.

% Сборка механизма по сплайн-методу.

% Исходные данные:

global h1 h2 h3 h4 h5

% Исходные данные для расчетов:

T=0.022; k1=0.0035; k2=0.0018; k3=0.00028; k4=0.0070; k5=0.0012; m=2;

gp1=120; gp2=180; gp3=47.5; gp4=150; gp5=250; N=5;

m1=1.9;m2=1.72;m3=1.85; m4=2.05;m5=1.73;

Tmin=0.001; Tmax=0.008;

% Оценка функций стоимости в (D+1) интерполяционных узлах:

D=8;

t=Tmin:(Tmax-Tmin)/D:Tmax;

f1=k1./(t.^m1);f2=k2./(t.^m2);f3=k3./(t.^m3);f4=k4./(t.^m4);f5=k5./(t.^m5);

% Формирование матриц исходных данных:

g1=[t;f1];g2=[t;f2];g3=[t;f3];g4=[t;f4];g5=[t;f5];

% Построение сплайнов:

h1=spline(g1(1,:),g1(2,:));h2=spline(g2(1,:),g2(2,:));

h3=spline(g3(1,:),g3(2,:));h4=spline(g4(1,:),g4(2,:));

h5=spline(g5(1,:),g5(2,:));

По полученным расчетным данным построены графики функций стоимости для пяти деталей, представленные на рис. 1. Интерполяционные узлы представлены на каждой характеристике в виде точек.

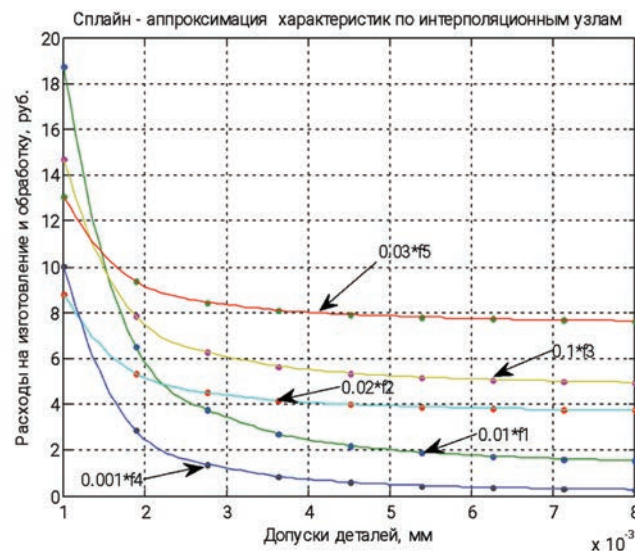


Рис. 1. Функции расходов на изготовление и обработку деталей узла

Оптимальные значения допусков деталей при вариации допуска узла от 0.015 до 0.030 мм, а также минимальные расходы на сборку получены с помощью второго блока скрипт-файла:

% Реализация алгоритма оптимального распределения ресурса T по n процессам.

% Ограничения на переменные состояния:

lb=ones(5,1)*Tmin;

ub=ones(5,1)*Tmax;

% Процедура численной оптимизации:

Aeq=[1 1 1 1 1]; beq=T;

options=optimset('Display','Iter');

```
[x,J1]=fmincon('s1',lb*4,[],[],Aeq,beq,lb,ub,[],options)
% Результаты расчетов
G=k1./(x(1).^m1)+k2./(x(2).^m2)+k3./(x(3).^m3)+k4./(x(4).^m4)+k5./(x(5).^m5)+... sum([gp1 gp2
gp3 gp4 gp5])
```

По завершении расчетов получены оптимальные параметры сборки узла для различных значений допуска T . Результаты представлены в графической форме (рис. 2).

Расчеты выполнены при введении ограничений на переменные состояния $x1$ – $x5$. Видно, что допуск детали $x4$ для значений $T \geq 0.020$ мм принимает максимально допустимое значение, определенное границей ub (см. фрагмент файла) и равное 0.008 мм. Допуск детали $x1$ достигает правой границы, если $T \geq 0.027$ мм. Минимальная стоимость сборки $G(T) = G(0.015) = 1335.8$ у.е. С увеличением T стоимость сборки узла уменьшается, и при $T = 0.030$ мм она составляет $G(T) = G(0.030) = 955.5$ у.е. Если допуск узла равен $T = 0.040$ мм, то согласно правой границе, все допуски деталей должны быть равны 0.008 мм, и вариация переменных состояния не производится.

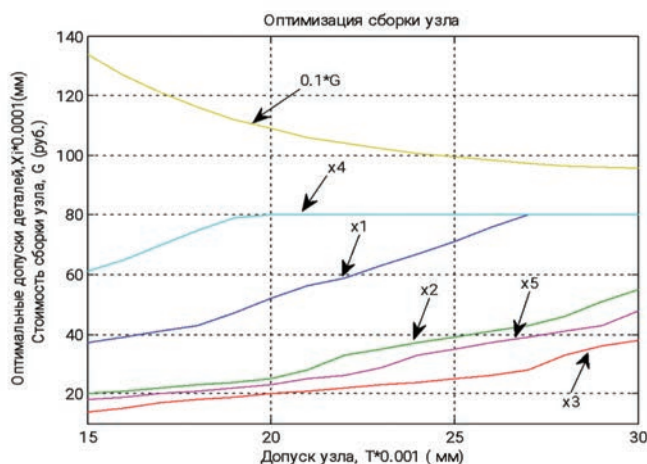


Рис. 2. Оптимизация технологического процесса сборки механизма

Выводы

Ввод исходных данных связан с получением структуры и оценкой параметров моделей (2), (3) и (4). Подготовка исходных данных является наиболее трудоемкой и ответственной частью решения и обычно базируется на эксперименте. Преимущества сплайн-метода состоят в том, что данные эксперимента могут быть введены в виде векторов измерений невысокой размерности, без определения структуры и параметров входных сигналов. Не вводятся ограничения и на выбор шага дискретности изменений. Операции по аналитическому представлению исходных характеристик по эксперименту реализованы в терминах сплайн-аппроксимаций, с использованием экспериментальных точек в качестве интерполяционных узлов, что на практике обеспечивает высокую точность и простоту выполнения вычислений.

Список использованных источников

1. Техника и технологии в животноводстве : учебник / В. И. Трухачев [и др.]. – Ставрополь : СтГАУ, 2020. – 536 с. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система.
2. Алижанов, Д. Чорвадорлар учун дон майдаловчи ихчам курилма / Д. Алижанов, Ш. Х. Абдурахмонов // Ўзбекистон қишлоқ хўжалиги. – 2018. – № 4. – С. 19.
3. Алижанов, Д. Винтсимон озуқа майдалагичнинг параметр ва режимларини мақбуллаштириш / Д. Алижанов, Я. К. Жуматов, Ш. Бекназаров // Аграр фани хабарномаси. – 2021. – № 2. – С. 92–95.
4. Дьяконов, В. П. Справочник по PC MatLAB / В. П. Дьяконов. – Москва: Наука, 1993. – 213 с.
5. Сахаров, В. В. Модели и алгоритмы оптимизации технологических процессов на объектах водного транспорта в среде MatLAB: монография / В. В. Сахаров. – Изд-во ГУМ РФ им. адм. С. О. Макарова, 2015. – 476 с.